

УДК 621.382

К ВОПРОСУ О ДЕГРАДАЦИИ СОСТОЯНИЙ HRS И LRS МЕМРИСТОРОВ И ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

© 2021 г. А. В. Фадеев^{а, *}, К. В. Руденко^{а, **}^аФизико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской АН,
Нахимовский проспект, 34, Москва, 117218 Россия

*E-mail: AlexVFadeev@gmail.com

**E-mail: rudenko@ftian.ru

Поступила в редакцию 09.03.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 27.03.2021 г.

Представлен обзор экспериментальных работ, в которых изучается время хранения информации и устойчивость к многократной перезаписи мемристорных элементов RRAM-памяти, основанной на обратимых резистивных переключениях в оксидных диэлектриках. Обсуждается влияние внешних параметров – управляющих импульсов, температуры окружающей среды, а также внутренних факторов – эволюции концентрации кислородных вакансий в области филамента, материала, структуры и толщины активного диэлектрического слоя, материала металлических электродов на долговременную стабильность высокоимпедансного (HRS) и низкоимпедансного (LRS) состояний мемристора.

DOI: 10.31857/S0544126921050021

ВВЕДЕНИЕ

В связи с открывающимися перспективами построения ИС энергонезависимой памяти терабитной емкости и применений для нейроморфных вычислений [1] количество исследований в области устройств памяти, основанной на резистивном переключении в диэлектриках, в последнее время носит взрывной характер. Ячейки памяти, основанные на хранении электрического заряда, подошли к физическим пределам масштабирования из-за отсутствия идеальных диэлектриков, ограничивающих утечки тока через дефекты структуры, а также туннельных эффектов. Напротив, в ячейках памяти, базирующихся на механизмах резистивных переключений (ReRAM) идеальный диэлектрик не нужен, а требуется управление структурой его локальных дефектных областей, ограниченных наноразмерными масштабами. Катионно-анионный транспорт заряда в этой области под воздействием внешнего электрического поля, приводит к локальному и обратимому изменению структурных дефектов диэлектрика, что внешне выражается в ступенчатых изменениях проводимости ячейки, резистивных переключениях между ее состояниями, – с высоким сопротивлением (HRS или RESET состояние) и с низким сопротивлением (LRS или SET состояние). Эти состояния устанавливаются после воздействия импульса тока определенной полярности, длительности и амплитуды. В отсут-

ствии внешних электрических полей, идеальный мемристор (буквально – резистор, обладающий памятью) способен как угодно долго сохранять состояния HRS и LRS с фиксированным значением электрического сопротивления ячейки. Таким образом, бит информации в мемристорной ячейке памяти хранится в виде структурных изменений в локальной области диэлектрика, заключенного между двумя проводящими электродами. Мемристоры, обладающие только двумя уровнями электросопротивления (однобитовые), интегрированные в кросс-бар архитектуру [2–6], а также и в 3D конфигурациях [7, 8], представляются основой будущих ультрабольших интегральных схем быстрой энергонезависимой памяти ReRAM с длительным временем хранения. В то же время, многоуровневые (мультибитовые) мемристоры, обладающие набором промежуточных дискретных уровней электросопротивления ячейки (от 4 до 20) [9–17], открывают перспективы создания систем с параллельным механизмом вычислений и функцией синаптической пластичности, которые необходимы для построения рекуррентных нейронных сетей и архитектур искусственного интеллекта следующего поколения [18–21].

Возможны униполярные [16, 22] и биполярные [23–25] переключения между состояниями HRS и LRS. В униполярных устройствах переключение между резистивными состояниями осуществляется за счет импульсов напряжения одной

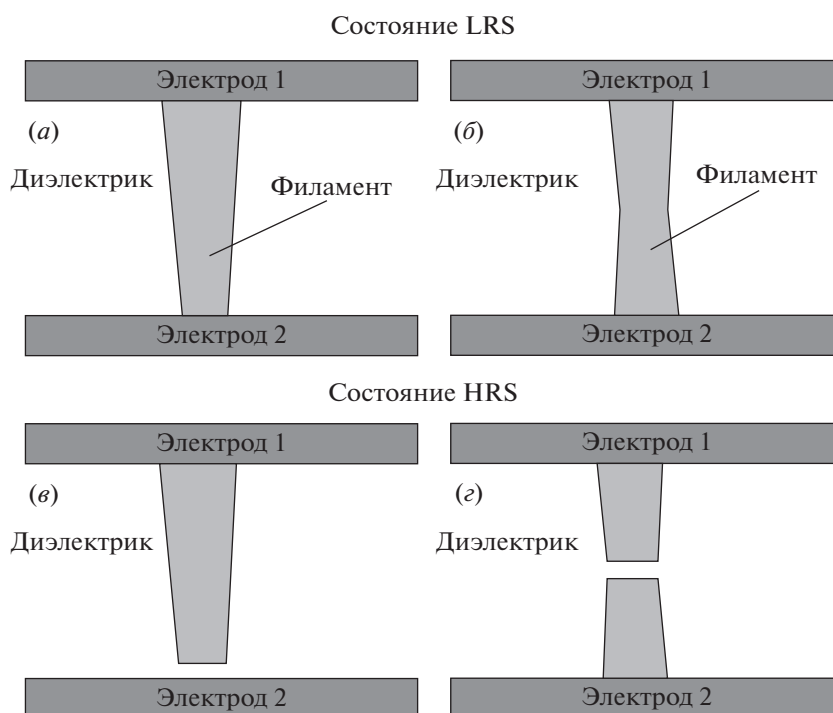


Рис. 1. Схема мемристорной ячейки в высокопроводящем (а), (б) и низкопроводящем (в), (г) состояниях. Для несимметричного (а), (в) и симметричного (б), (г) случаев.

полярности, но разной амплитуды. В биполярных мемристорах для смены состояний ячейки необходимо изменить полярность прикладываемого импульса на обратный [26]. В режиме чтения состояний HRS и LRS используются малые измерительные импульсы напряжения, не приводящие к переключению между состояниями мемристора, однако их параметры требуют тщательного анализа с точки зрения возможного накопительного долговременного эффекта.

Различные конструкции и структуры резистивных ячеек могут обладать различными механизмами переключения. Например, в ряде мемристоров, величина сопротивления HRS и LRS зависит от площади контакта [27–29]. Это может быть обусловлено как дрейфово-ловушечным механизмом носителей заряда [27, 29], так и образованием множественных филаментов [28]. Преимуществом устройств первого типа является более низкое энергопотребление, но при этом они обладают худшим отношением сопротивлений состояний HRS/LRS, и меньшей скоростью переключения. Кроме того, они имеют значительно худшие перспективы для масштабирования в интегральных схемах с большой плотностью элементов. Устройства второго типа могут быть использованы как мультибитовые.

Более перспективны для систем с высокой степенью интеграции другие, анализируемые далее структуры ячеек, где в процесс резистивного пе-

реключения не вовлекается вся площадь интерфейса металл-диэлектрик, а резкое изменение электросопротивления обусловлено образованием одной или нескольких электропроводящих нитей суб-10 нм толщины – филаментов (рис. 1).

Образование филаментов в слоях диэлектрика наблюдалось экспериментально в работах [30–32]. Ячейки филаментарного типа характеризуются высокой скоростью переключения и большим отношением сопротивлений HRS/LRS, и наиболее широко изучаются в настоящее время [33, 34]. Филаментарные мемристоры, в свою очередь, подразделяются на те, в которых переключение основано на движении анионов кислорода (заряженных кислородных вакансий) [4, 35–37], и такие, где проводящий филамент образован катионами металлов (Ag, Ni, Cu) [11, 20, 38, 39].

Мемристоры, принцип действия которых основан на транспорте анионов, должны содержать избыточное количество вакансий (обычно вакансий кислорода в оксидных диэлектриках). Избыточная концентрация вакансий может быть получена за счет (i) выбора в качестве активной среды нестехиометрического оксида металлов, (ii) использования окисляющегося металла в качестве электрода, контактирующего с диэлектриком, или (iii) использование в качестве генератора вакансий многослойных композитных диэлектриков. В последних двух случаях на интерфейсах слоев

создаются нестехиометрические области – резервуары кислородных вакансий.

Также встречаются структуры мемристоров, где процесс переключения включает в себя транспорт как ионов кислорода, так и катионов металлов [2, 27, 40–43] одновременно. Например, движение катионов Ta наблюдалось в анионном мемристоре Ta/HfO₂/Pt [11]. Даже атомы химически инертных электродов, таких как Pd в Pd/AlO_x/Pd [35], или Pt в Pt/TiO₂/Pt [44] в некоторых случаях могут участвовать в механизмах резистивного переключения.

Для образования начального филамента во вновь изготовленной ячейке обычно необходим импульс более высокого напряжения (формовка) [45, 46], по сравнению с импульсами дальнейших переключений. Из-за неоднородностей состава и структуры в диэлектрической пленке ячейки, а также наношероховатостей (иглообразных выступов) металлических электродов, формовочный импульс напряжения создает локальную неоднородность напряженности поля, и, соответственно, контролируемый пробой диэлектрика, что формирует проводящий канал (каналы) в виде филаментов с высоким содержанием вакансий кислорода либо катионов металла. Вообще говоря, индивидуальная формовка каждой ячейки для чипа гига- и терабитной памяти экономически не реализуема, поэтому в настоящее время интенсивно ищутся пути создания бесформовочных филаментарных мемристоров, не требующих индивидуальных формовочных процедур [17, 40, 47, 48].

К современным однобитовым ячейкам резистивной памяти для построения на их основе УБИС предъявляются ряд требований: масштабируемость конструкции прибора, напряжение перезаписи SET/RESET менее 1 В, энергопотребление менее 10 пДж на переключение, время переключения менее 10 нс, время хранения информации не менее 10 лет при 85°C, число циклов перезаписи (надежность) 10¹² и более. Ряд параметров, такие как масштабируемость [40, 49, 50], быстродействие [9, 50, 51], энергоэффективность [52, 53], уже достигнуты, правда, в различных конструкциях ячеек и с различными материалами активного диэлектрика.

В то же время, текущими приоритетными проблемами являются надежность (*endurance*) рассматриваемых устройств и время хранения информации (*retention time*). Данные проблемы являются темой анализа в настоящей работе.

ДЕГРАДАЦИЯ МЕМРИСТОРОВ

Несмотря на то, что надежность более чем 10¹² переключений наблюдалась, например, в работах [6, 47, 50], а необходимое время хранения было за-

явлено в [54–57] данные результаты были достигнуты при исследовании единичного устройства.

Переключение мемристоров филаментарного типа заключается в разрыве/восстановлении филаментов. Для вакансионных мемристоров филамент представляет собой область с избыточной концентрацией вакансий. Имея эффективный положительный заряд, вакансии кислорода притягивают электроны, образуя нейтральные комплексы. Такой комплекс (F – центр) может быть представлен в виде квазиатома с энергетическими уровнями, расположенными в запрещенной зоне. Отрываясь от вакансии, электрон переходит в зону проводимости согласно реакции: $F^x \rightarrow V_x^+ + e^-$. В катионных мемристорах филамент представляет собой проводящую нить, образованную катионами металлов. Преимущество первой группы состоит в более длительных временах хранения, обусловленных достаточно высокой энергией миграции ионов кислорода в объемах большинства оксидов (>1 эВ) [4, 58, 59]. В случае же движения катионов их энергия активации объемной диффузии значительно ниже (<0.3 эВ) [60], что способствует низким напряжениям переключения, но и низким временам хранения [61].

Наблюдением филаментов и исследованию динамики их переключения посвящены работы [31, 62, 63]. В [64, 65] предлагается стохастический подход, моделирующий микроскопические процессы внутри оксидов переходных металлов. Модель основана на теории перколяции и резисторной сети. Динамика миграции вакансий кислорода без учета джоулева нагрева филамента в процессе протекания электрического тока [66–70] и с учетом джоулева нагрева [21, 71–76] исследовались теоретически на основе кинетических уравнений.

Время хранения информации для мемристоров определяется стабильностью состояний LRS и HRS во времени. Для его определения после перехода SET/RESET к структуре периодически ($\Delta t \approx 1$ с) прикладывают импульс напряжения ($V_{\text{read}} \approx 0.1$ В, $t_{\text{read}} \approx 1$ мс) и снимают зависимость силы тока от времени для каждого резистивного состояния. Для исключения эффекта накопления заряда полярность импульса переключения следует периодически изменять. Это было сделано, например, в работе [37]. Прогнозируемое время сохранения состояний мемристора должно составлять 10 лет при температуре 85°C. Реальные измерения осуществляются в течение нескольких часов/дней, после чего данные экстраполируются во времени [48, 77, 79]. Благодаря Аррениусовской зависимости вероятности образования/рекомбинации точечных дефектов, а также их диффузионно/дрейфовых процессов определение времени хранения информации зачастую осуществляются при повышенных температурах [37, 80, 81]. После

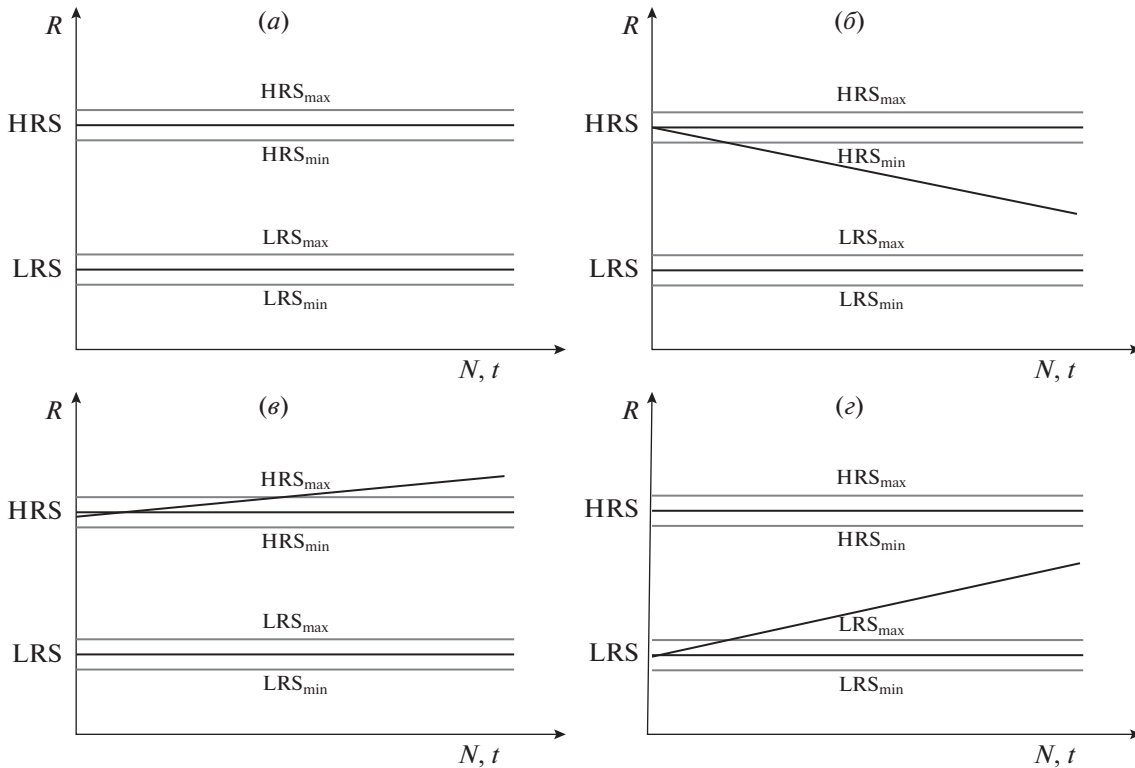


Рис. 2. Зависимость сопротивления мемристора (R) от количества циклов переключения (N) либо времени хранения (t) при отсутствии деградации (a), монотонной деградации высокоомного (b), (c) и низкоомного (d) состояний.

чего проводится пересчет времени хранения на требуемую величину температуры. Указанный подход, также, таит в себе возможность ошибки. Так в работе [77] исследовались зависимости сопротивления от времени хранения информации для мемристора $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ при комнатной и повышенной (85°C) температурах. При комнатной температуре сопротивления LRS и HRS росли с течением времени наблюдения, а при 85°C уменьшались. В [37] на примере мемристора $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{Pt}$ было показано, что оценка времени хранения на основе экстраполяции данных может быть неверной в связи обнаруженной резкой (скачкообразной) деградацией HRS состояния — полным отказом в определенный момент времени.

Надежность мемристорной ячейки определяется ее стабильностью в результате многократных циклов переключений. Каждый цикл состоит из набора импульсов напряжения: V_{set} ($\sim 1\text{ В}$, $\sim 10\text{ нс}$) — V_{read} ($\sim 0.1\text{ В}$, $\sim 10\text{ нс}$) — V_{reset} ($\sim -1\text{ В}$, $\sim 10\text{ нс}$) — V_{read} ($\sim 0.1\text{ В}$, $\sim 10\text{ нс}$). В результате получается зависимость силы тока (сопротивления) от числа таких циклов [33].

Анализируя экспериментальные данные множества публикаций по структурам, переключения в которых обусловлены формированием/разрывом проводящего филамента, можно видеть, что

после проведения ряда циклических переключений в мемристорной ячейке состояния HRS и LRS не воспроизводятся с идеальной точностью. В практически приемлемом случае сопротивления высокоомного и низкоомного состояний однобитовых мемристоров должны оставаться в пределах допустимых окон для HRS и LRS, задаваемых максимальным и минимальным значениями (рис. 2а). Такое поведение означало бы отсутствие деградации состояний. Однако в ряде случаев оказывается, что либо высокоомное, либо низкоомное сопротивление выходит из заданного диапазона.

Деградация мемристора выражается путем изменения сопротивлений со временем или числом переключений. В конечном счете, деградация приводит к отказу прибора путем “залипания” мемристора в состоянии с определенным значением сопротивления [82]. При исследовании на надежность, наиболее часто происходит деградация состояния HRS (рис. 2б) приводящая к снижению сопротивления в этом состоянии и в результате к невозможности переключения состояния LRS в HRS [9, 15, 21, 42, 83]. Иногда R_{HRS} растет по мере увеличения циклов переключения [52, 84] (рис. 2в), а в некоторых случаях наблюдается рост сопротивления R_{LRS} [25, 85] (рис. 2г).

Для времени хранения наиболее характерными являются случаи роста сопротивления в состоянии LRS и уменьшения в состоянии HRS [28, 48, 80, 81, 86–88] (рис. 2б, 2с). В работах [80, 81] исследовалось время хранения у мемристора $\text{Ir}/\text{Ta}_2\text{O}_{5-8}/\text{TaO}_x/\text{TaN}$. Было получено, что для мемристора с филаментом большего сечения наблюдается уменьшение сопротивления в HRS состоянии, а для филаментов меньшего сечения рост сопротивления в LRS состоянии. Этот результат говорит о том, что деградации состояний LRS и HRS при исследовании времени хранения в первую очередь определяются диффузионными процессами. Для филаментов малого диаметра за счет радиальной диффузии происходит растворение филамента, приводящее к уменьшению сопротивления в HRS состоянии, а для филаментов большего диаметра, за счет продольной диффузии в области разрыва, деградирует состояние HRS.

Во время циклов переключения состояний, авторы работ [36, 82, 89–90] обнаружили ситуацию, когда, в результате деградации, мемристор принимает некоторое промежуточное состояние между сопротивлениями R_{HRS} и R_{LRS} (рис. 3). В [36] исследовалась деградация мемристора $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$. В тесте на надежность сбой произошёл при 2.5×10^4 циклах переключения после приложения отрицательного импульса. Мемристор залип в промежуточном положении между HRS и LRS. До отказа сопротивление LRS постепенно уменьшалось, а HRS оставалось практически стабильным. Причина деградации, по мнению авторов, вызвана тем, что повторения переключений SET/RESET приводят к возникновению дополнительных дефектов, что вызывает (i) увеличение резервуара дефектов около верхнего электрода и (ii) снижению энергии их миграции из-за большей плотности вакансий, что приводит к увеличению филамента. Получено, что максимальное значение ограничивающего напряжения (V_{stop}) во время цикла RESET является ключевым параметром, контролирующим надежность переключений (Уменьшение V_{stop} приводит к росту надежности). “Залипание” в промежуточном состоянии наблюдалось, также, для мемристора $\text{Ti}/\text{HfSiO}_x/\text{TiN}$ [89]. В нем выявлено слабое снижение HRS и LRS при числе циклов мене 1.5×10^5 , затем LRS начало расти, а HRS резко спадать до их совпадения. Обнаружено, что сбой всегда вызывается отрицательным напряжением, т.е. при разрыве филамента. Авторы полагают, что сбой обусловлен инжекцией дефектов из нижнего электрода. В результате филамент утолщается, вызывая понижение HRS.

Плавное изменение сопротивлений HRS и LRS с первых циклов переключения/времени наблюдения наблюдался в работах [5, 10, 25, 42, 43, 48, 49, 80, 81, 85, 86] (рис. 2). Анализ устройств

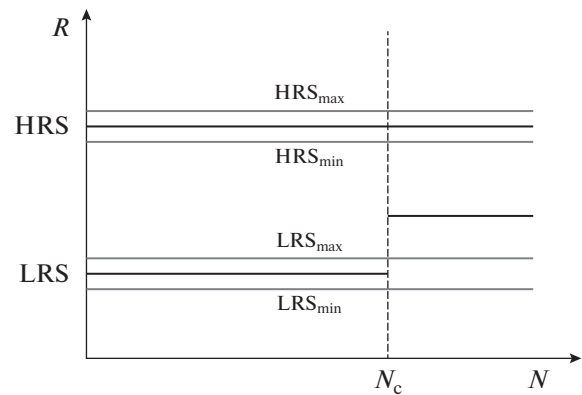


Рис. 3. Зависимость сопротивления (R) мемристора от количества циклов переключения (N) в случае отказа мемристора в промежуточном состоянии сопротивлений.

$\text{Cu}/\text{HfO}_2/\text{Pt}$ [42] показал, монотонный спад HRS с первых циклов переключения и “залипание” в состоянии LRS (рис. 2б). Было выявлено уменьшение V_{SET} с ростом количества циклов переключения, тогда как V_{RESET} росло. Основное отличие между начальными и подвергшимися переключениям филаментами была концентрация меди, которая во втором случае была значительно выше. Настройкой напряжений переключений удалось добиться $>10^9$ циклов переключения. Массивы мемристоров $\text{Cu}/\text{TaO}_x/\text{Pt}$ состоящих из 50 ячеек исследовались в [42]. Исследование времени сохранения состояний HRS и LRS проводилось после 1, 100 и 1000 циклов переключения. Наблюдалось, что с ростом числа циклов переключения времени сохранения LRS состояния растут, а HRS — падают. При этом уменьшается дисперсия сопротивлений от устройства к устройству. Согласно работам [15, 42] вновь сформированный филамент принимает свою стационарную форму, соответствующую параметрам переключающего импульса, после определенного числа циклов переключения. Если параметры импульса выбраны некорректно, то эволюция филамента к равновесному состоянию будет сопровождаться деградацией состояний LRS и/или HRS.

Во многих случаях сопротивление начинает изменяться только после некоторого критического значения времени наблюдения/импульса переключения [24, 37, 42, 52, 90] (рис. 4).

Для мемристора $\text{TaN}/\text{ZnO}/\text{ZrO}_2/\text{Pt}$ [24] в пределах 10^3 циклов переключения LRS не меняется, а HRS начинает спадать после 900 циклов (рис. 4а). Возможными причинами ухудшения HRS авторы связывают с нестабильными операциями RESET, возникающими из-за чрезмерного роста проводящей нити, а также создания других филаментов во время циклов переключения. Уменьшение HRS с

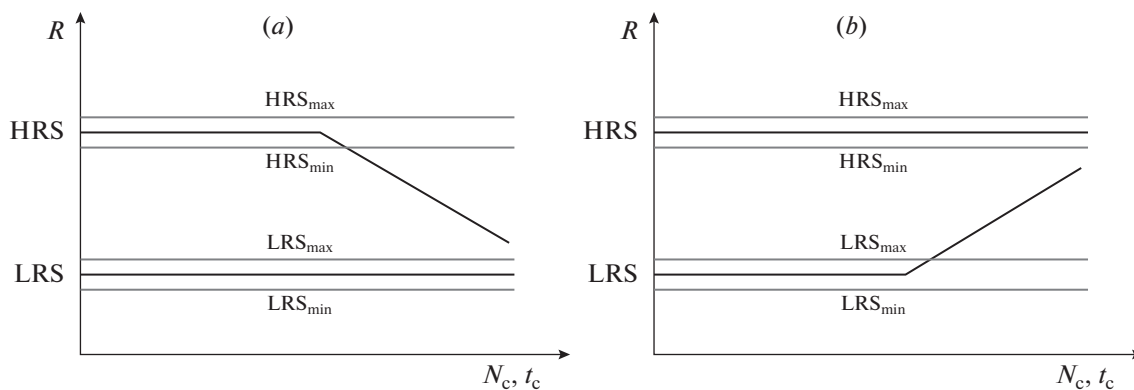


Рис. 4. Зависимость сопротивления (R) мемристора от количества циклов переключения (N) или времени хранения (t) при резкой деградации высокоомного (а) и низкоомного (б) состояний.

ростом циклов переключения, вызванное невозстановленными дефектами в оксидной матрице, накапливающимися от цикла к циклу, наблюдались также в мемристорах $TiN/HfO_x/AlO_x/Pt$ [10].

В работе [90] наблюдалась деградация высокопроводящего состояния (рис. 4б). При этом был обнаружен рост напряжения V_{SET} после 10^7 и 10^9 циклов переключения. По мнению авторов, данное увеличение указывает на снижение подвижности кислородных вакансий. Поскольку отказ мемристора происходит при фиксированном напряжении, то увеличивая напряжение на затворе мемристора его можно снова вернуть в рабочее состояние. В [91] на примере мемристора $TiN/Hf/HfO_2/TiN$ был предложен метод управления движением дефектов. В зависимости сопротивления состояний LRS и HRS от числа циклов переключения обнаружены четыре области: (i) где состояния сопротивления стабильны, (ii) растет сопротивление в LRS состоянии, (iii) мемристор залип в состоянии HRS, и (iv) восстановленную область приложением более высокого положительного напряжения. Обнаружено, что после отказа область разрыва окружена дефектами с более низкими/высокими уровнями энергии, которые исчезают после восстановления мемристора, что подтверждает их роль в деградации. Когда концентрация указанных дефектов, достигает критического уровня, они (i) отталкивают другие дефекты от перехода в область разрыва, вызывая сбой SET; (ii) могут формировать шунтирующий путь тока при V_{set} , уменьшая напряжение в области разрыва филамента и способствуя деградации мемристора; (iii) дефекты затрудняют проводимость при V_{read} из-за смещения уровней энергии и/или более длинного пути туннелирования электронов.

Возможность восстановления мемристорной ячейки памяти после ее отказа обсуждается также в работе [52]. Так надежность мемристора $TiN/Hf/HfO_2/TiN$ составляет $\sim 10^7$ переключе-

ний, но после каждого отказа удавалось восстановить устройство подачей повышенного SET напряжения (как минимум 5 раз). Таким образом, введение операции проверки может значительно увеличить срок службы указанных устройств. Для мемристора $Pt/TiO_2/TiN$ [9] тест на время хранения при $85^\circ C$ показал, что сопротивления с более высокими значениями немного растут со временем, тогда как состояния с более низкими сопротивлениями оставались практически неизменными более 256 ч. Тест на надежность выдержал 2×10^6 циклов переключения, после чего мемристор залип в состоянии LRS. Операция RESET с использованием режима развертки постоянного тока вернула устройство в рабочее состояние, после чего оно и выдержало еще $\sim 10^6$ циклов переключения.

Далее обсуждаются различные факторы оказывающие влияние на надежность и время хранения информации в мемристорных ячейках памяти.

1. Влияние температуры

Работа мемристоров основана на дрейфе ионов внутри диэлектрического слоя и реакциях образования/рекомбинации точечных дефектов. Деградация мемристоров вызвана диффузионными процессами через проводящие электроды, а также в окружающей филамент области диэлектрика. Все перечисленные процессы имеют Аррениусовскую зависимость, и, следовательно, резко зависят от температуры. Поэтому следует ожидать, что рост температуры приводит к понижению надежности и времени хранения мемристоров [42, 43]. Снижение времени хранения с ростом температуры подтверждается множеством работ. Так испытания при повышенных температурах ($100, 125, 140^\circ C$) [92] показали, что время хранения (τ) падало с ростом температуры, причем $\ln \tau$ оказалась линейной функцией от обратной температуры, что говорит о диффузионном характере деградации. Рост температуры приводит к более ранней

деградации также и для мемристора Cu/HfO₂/Pt [42]. При этом HRS практически не зависело от температуры, что указывает на туннелирование как доминирующую форму проводимости в слабопроводящем состоянии. На металлические свойства LRS данного мемристора указывает линейность вольт-амперной характеристики с положительной температурной зависимостью. В [78] получен безформовочный мемристор W/AlO_x/Al₂O₃/Pt/Ti обладающий высокой скоростью переключения (28 нс). Исследование данного мемристора при повышенных и пониженных, относительно комнатной, температурах показало уменьшение отношения сопротивлений HRS/LRS (~10³ при 100, ~10³ при 298 и ~80 при 400 K) и времени хранения (~10⁶ с при 100, ~10⁴ с при 400 K) при повышенных температурах.

Напротив, в [21] добавление в мемристор Au/CeO_x/Al слоя HfO_x провоцировало увеличение температуры в области филамента и повышало надежность указанной структуры. В [46] удалось снизить напряжение формовки с 2.5 до 1.7 В за счет проведения процесса при повышенных (125°C) температурах. При этом уменьшился разброс сопротивлений HRS и LRS и более чем в 40 раз увеличилось время хранения информации. Причиной полученных улучшений авторы считают комбинацию избыточных кислородных вакансий.

Тест на время хранения информации для мемристора Pt/Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃/TiN [77] проводился при комнатной и повышенной (85°C) температурах. При комнатной температуре после 10² с наблюдается параллельный рост сопротивлений LRS/HRS, а при 85°C параллельный спад. Авторы объясняют полученный результат конкуренцией двух эффектов: (i) кислород из атмосферы может медленно диффундировать в образцы при комнатной температуре, что приводит к постепенному снижению концентрации вакансий кислорода, т.е. увеличению HRS и LRS; (ii) повышение температуры провоцирует рождение кислородных вакансий. При низких температурах преобладает первый механизм, а при высоких второй.

Приведенные результаты указывают, что для увеличения времени хранения необходимо выбирать материалы с большими энергиями миграции кислородных вакансий. Однако это неизбежно будет приводить к росту напряжения переключения. С точки зрения надежности устройств, более низкие температуры не являются гарантом увеличения количества переключений так как пониженные температуры затрудняют восстановление разорванного филамента. Так для мемристора W/AlO_x/Al₂O₃/Pt/Ti [78] наилучшая надежность была достигнута при комнатной температуре (10⁸ при 100, 10¹⁰ при 298 и 10⁷ при 400 K).

2. Влияние параметров импульса переключения

Подбор параметров импульса переключения является наиболее простым способом улучшения характеристик прибора. Поэтому исследование влияния продолжительности и амплитуды применяемых SET/RESET импульсов – важный этап исследования свойств мемристоров.

На примере мемристора TiN/HfO₂/Hf/TiN авторы [79] показали, что при оптимальном подборе параметров SET/RESET импульсов надежность мемристора может превышать 10¹⁰. Большинство авторов [90–92, 94] отмечают, что рост амплитуды переключения приводит к снижению надежности прибора.

Так в работе [90] получено, что увеличение напряжения в мемристоре TiN/HfO₂/Hf/TiN приводит к его более раннему отказу, что объясняется уменьшением подвижности кислородных вакансий (увеличивается энергетический барьер), из-за локальной релаксации аморфного HfO₂ до минимального энергетического состояния (ближняя атомная перегруппировка), вызванного повышенными температурами. Также в данной работе наблюдалось увеличение надежности с увеличением сопротивления LRS (меньший рабочий ток). Мемристор, принцип работы которого основан на диффузии ионов серебра [92] показал надежность >10⁸ циклов переключения. По мнению авторов, полученный результат связан с минимизацией напряжения переключения, поскольку на устройствах с большим ограничивающим током показания выносливости снижаются. Рост напряжения RESET и его продолжительности также уменьшали надежность мемристора TiN/Ta₂O₅/Ta [94]. Получено, что при высоких напряжениях и длительностях импульса мемристор залипает в положении HRS, а при низких в LRS. Результаты объясняются постепенным окислением TiN электрода, что в конечном итоге приводит к невозможности восстановления филамента из-за трудного вывода O из TiN в первом случае. С другой стороны, переключения с более низкими RESET напряжениями могут быть недостаточными для окисления TiN, однако достаточными для диффузии ионов кислорода по междоузлиям или границам зерен. При двух значениях напряжения SET 1.5 и 2.5 В исследовался на надежность мемристор TiN/Hf(Al)O/Hf/TiN [83]. В первом случае после ~10⁷ переключений наблюдался резкий подъем LRS и более плавный HRS вплоть до их совпадения. Для 2.5 В после ~10⁷ наблюдается спад HRS до уровня LRS.

В [89] обнаружено, что надежность мемристора Ti/HfSiO_x/TiN как функция приложенного напряжения при заданной продолжительности имеет максимум (V_m). Увеличение продолжительности приводит к снижению V_m , оставляя максимальное

число переключений примерно постоянным. Зависимость площади петли гистерезиса вольт-амперной характеристики при разных напряжениях записи (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 и 1.2 В) в 10 нм мемристоре исследовано в работе [95]. Получено, что площадь петли сначала плавно растет с ростом напряжения записи, а после критического значения (~1 В) резко падает. Установлено, что сопротивление в HRS состоянии практически не зависит от частоты и напряжения записи, тогда как сопротивление LRS резко растет с ростом напряжения при малых частотах переключения и слабо при высоких частотах. В работе [48] для бесформовочного мемристора Al/ZnO/Al обнаружено, что окно гистерезиса уменьшается с ростом частоты развертки. По мнению авторов, обнаруженные междоузельные ионы кислорода играют решающую роль в процессе резистивного переключения, способствуя аннигиляции кислородных вакансий во время RESET процесса.

В ряде работ предлагается варьирование амплитуды и/или продолжительности переключающего импульса для увеличения срока службы устройства. Значения проводимости мемристора Ta/TaO_x/Pt [96] в массиве ячеек 1T1R достигались путем сочетания управления затвором транзистора и разработанного алгоритма обратной связи. Было получено, что одна ячейка мемристора TaO_x может быть точно и многократно запрограммирована (более 10⁶) для представления 6-битных значений с очень высокой точностью. Авторам [97] удалось повысить надежность мемристора Ti/HfO₂/Pt за счет плавного перехода из состояния ON в состояние OFF и обратно. Это было достигнуто использованием развертки тока с положительным смещением во время SET и растущей развертки напряжения во время RESET. За счет добавления к мемристорам Pt/Ta/TaO_x/Pt/Ta [98] последовательного резистора, с корректно подобранным сопротивлением во время циклов SET и RESET можно подавлять внутреннюю неравномерность падения напряжения на нем, что приводит к значительному возрастанию срока службы. Применение фиксированного импульса записи может привести к деградации за счет изменения толщины/длины разрыва филамента. Во избежание этого, в теоретической модели [99] предложена схема записи, которая идентифицирует оптимальную амплитуду и продолжительность для импульса записи. Установлено, что предложенная схема при различных неисправностях мемристора позволяет эффективно повысить его надежность.

3. Влияние концентрации кислородных вакансий

Концентрация вакансий кислорода является определяющим параметром для мемристоров, работа которых основана на движении анионов

кислорода. Чем больше вакансий содержится в оксиде, тем меньшее напряжение необходимо для формирования филамента. С другой стороны, накопление большого числа вакансий может с большей вероятностью привести к образованию пор, множественных филаментов и/или изменению размеров изначально образованного филамента в процессе операций перезаписи.

Согласно работе [100] механизмы деградации мемристоров можно отнести к дополнительным кислородным вакансиям, генерируемым/рекомбинированным во время переключения, что приводит к изменению исходной структуры филамента. Когда во время переключения в области филамента или вблизи нее возникает генерация дополнительных кислородных вакансий, филамент увеличивается, а HRS и LRS уменьшаются. Увеличение сопротивлений является результатом дополнительной рекомбинации между ионами кислорода и кислородными вакансиями с увеличением расстояния между зазорами во время RESET. Иногда мемристор “залипает” в промежуточном состоянии в основном из-за дефектов, которые поступают из верхнего и нижнего электродов, что может привести к разрыву нити.

В работе [50] изучалась зависимость выносимости мемристора Pt/TaO_{2-x}/Ta₂O_{5-x}/Pt от концентрации вакансий в слое TaO_{2-x}. Получено, что рост концентрации вакансий кислорода понижает сопротивление переключения, а также число циклов переключения. Для мемристора размером 30 × 30 мкм² была достигнута надежность 10¹² циклов переключения.

Однако, согласно работе [101], где исследовали структуру на основе TiO₂ с разной концентрацией кислородных вакансий (10, 20 и 30%), получено, что наилучшее проявление мемристорных свойств соответствует концентрации кислородных вакансий 20%. Изучению мемристоров на основе TiO_x посвящена также работа [102]. В ней были изготовлены четыре подслоя TiO_x с различным содержанием вакансий кислорода и исследованы различные комбинации следования слов. Получено, что отношения ON/OFF и время хранения как во включенном, так и в выключенном состояниях являются наилучшими для структуры с последовательностью слоев, отвечающих немонокотному распределению концентрации вакансий кислорода. В то же время, создание пленки TaO_x в мемристоре Pt/TaO_x/Pt [103] с градиентом концентрации кислорода от Ta₂O_{5-x} у анода до TaO_{2-x} у катода позволило повысить надежность изучаемого мемристора до значений превышающих 10⁹ циклов переключения. Для Pt/HfO_x/TiN [104] показано, что в случае избыточного количества вакансий (HfO_{1.5} по сравнению с HfO₂) требуется пониженный потенциал

формовки, но при этом наблюдается повышение разброса сопротивлений как в HRS, так и в LRS состояниях. В указанной работе предложена модель, включающая разрыв филамента, вызванный полем и температурой. Разрыв происходит вблизи анода в случае стехиометрического оксида, и на обеих границах раздела в случае дефицита кислорода. Согласно модели тепловое ионное/вакансионное движение уменьшается в мемристоре с дефицитом кислорода из-за более высокой теплоотдачи.

Таким образом, концентрация вакансий кислорода важнейший параметр при создании анионных мемристоров. Однако однозначной связи концентрации вакансий с надежностью устройства в настоящее время не прослеживается и для понимания требуется дальнейшее исследование.

4. Структура и толщина активного диэлектрического слоя

Выбор диэлектрика и его параметров кардинально меняет характеристики переключения, а также его надежность и время хранения.

Одним из важнейших параметров является толщина диэлектрического слоя. Уменьшение толщины с одной стороны приводит понижению амплитуды переключающего импульса, но с другой стороны понижает отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях. Рост толщины пленки TaO_x от 10 до 60 нм [54] для мемристора $Pt/TiO_x/TaO_x/Pt$ показывает немонотонную зависимость сопротивлений HRS и LRS от толщины пленки с минимумом соответствующим 20 нм. В тоже время согласно [83] рост толщины слоя HfO в структуре $TiN/Hf(Al)O/Hf/TiN$ увеличивает надежность прибора.

Многослойные диэлектрики являются предметом исследования многих авторов [18, 39, 105]. Добавление дополнительного слоя способствует образованию резервуара вакансий, а его толщина и состав влияет на размер указанного резервуара и энергии миграции и образования вакансий. Использование многослойных диэлектриков влияет также на энергию образования/миграции дефектов, которая понижается в области недостатка кислорода [29, 106].

Кроме того, зависимость теплоемкости, плотности и теплопроводности от толщины пленки приводит к изменению нагрева филамента при вариации толщины, а следовательно, сильно влияет на диффузию, дрейф и рождение/рекомбинацию вакансий [21]. В работах [12, 13, 27, 107–117] сообщается о повышении стабильности устройств с двухслойным диэлектриком таким как: AlO_x/HfO_2 , Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x} , ZrO_x/HfO_x , $ZrO_2/AlON$, AlO_x/Al_2O_3 и др.

В [39] изучался мемристор $Ag/SiO_2/Ta_2O_5/Pt$, переключающие свойства которого основаны на образовании/разрыве нити Ag . Из-за слоя SiO_2 , в котором подвижность ионов Ag мала, направление роста утончает нить Ag в слое Ta_2O_5 , что приводит к растворению нити Ag в слое Ta_2O_5 в следующих операциях. В однослойных структурах $Ag/Ta_2O_5/Pt$ и $Ag/SiO_2/Pt$ наблюдается сильный разброс в HRS. Мемристор $Ag/SiO_2/Ta_2O_5/Pt$ показал меньшие напряжения переключения и меньший разброс сопротивлений HRS и LRS от цикла к циклу. Также увеличилась надежность мемристорной ячейки. Граница SiO_2/Ta_2O_5 представляет собой резервуар вакансий из-за чего данный мемристор нельзя считать чисто катионным, что может объяснять повышенную надежность составного мемристора.

В [118] обнаружено, что для $Ti/TiO_2/Pt$ пробой происходит во время RESET и приводит к LRS с чрезвычайно низким сопротивлением, что подтверждает разрастание проводящих нитей. Однако добавление богатого вакансиями 2 нм слоя ZrO_{2-x} на границу Ti/TiO_2 увеличило время хранения ($>10^4$ с) без какого-либо явного ухудшения сопротивлений HRS и LRS. Согласно [119] графен может быть использован в качестве промежуточного слоя между электродами и диэлектриком для уменьшения разброса параметров между циклами, за счет подавления диффузии атомов между электродом и изолятором, тем самым увеличивая надежность. Введение графена может снизить энергопотребление из-за его высокого внеплоскостного контактного сопротивления (по сравнению с металлическими электродами), подавить поверхностные эффекты: хемосорбцию и/или фотодесорбцию. Введение слоя TiO_2 в мемристор $Pt/HfO_2/TiO_2/ITO$ [120] позволило снизить напряжение переключения за счет формирования виртуального катода в слое HfO_2 . Аналогичные результаты были получены и в [54] для мемристора $Pt/TiO_x/TaO_x/Pt$. Чтобы прояснить роль слоя TiO_x в мемристоре $Ti/HfO_2/TiO_x/Pt$ [13], были изготовлены устройства $Ti/TiO_x/Pt$ и $Ti/HfO_2/Pt$. Мемристор $Ti/HfO_2/Pt$ демонстрирует явное переключение, а $Ti/TiO_x/Pt$ – нет. Это означает, что эффект резистивного переключения в основном возникает в слое HfO_2 в то время как слой TiO_x может служить резервуаром вакансий. Влияние промежуточного слоя TiO_2 на характеристики переключения мемристора на основе ZrO_2 исследовалось в [121]. По сравнению с устройствами $Cu/ZrO_2/Pt$ и $Cu/ZrO_2/TiO_2/Pt$ напряжение формовки, напряжение переключения и ток сброса устройств $Cu/TiO_2/ZrO_2/Pt$ и $Cu/TiO_2/ZrO_2/TiO_2/Pt$ явно улучшены. Безформовочный мемристор $Ag/MnO/Ta_2O_5/Pt$ [12] обладает тремя состояниями LRS, IRS и HRS.

Третье состояние объясняется как разрыв филамента в MnO, а HRS и в MnO (резервуар вакансий) и в Ta₂O₅. Окно сопротивлений 10⁴. Система MnO/Ta₂O₅ обладает большей надежностью, а также, меньшим напряжением переключения, чем структуры с одним слоем. Влияние слоя Al₂O₃ [122] в мемристоре Ti/Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃/Pt изучалось путем сравнением его свойств с мемристором без или только с одним слоем Al₂O₃. Обнаружено, что изначальный вариант имеет наибольшее окно сопротивлений и надежность более 10⁵ циклов без видимой деградации. По мнению авторов [27] переключение в безформовочном мемристоре Pt/NbO_x/TiO_y/NbO_x/TiN осуществлялось за счет захвата/освобождения электронов, где кислородные вакансии в центральном слое TiO_y и/или примесные центры Ti в слое NbO_x вблизи верхнего Pt электрода играют роль ловушек. В этом устройстве ток переключения был намного ниже, чем у мемристоров с миграцией ионов кислорода. Добавление слоя NiO_x [123] в ИТО/TaO_x/NiO_x/Al сильно понижает напряжение переключения (ИТО-твердый раствор оксидов индия (III) и олова (IV), типично 90% первого и 10% второго). Предлагаемая конструкция позволяет избежать разрыва филамента в процессе RESET, что обеспечивает более равномерное и стабильное поведение резистивного переключения, сравнимое с другими устройствами ReRAM. Исследование влияния добавочного диэлектрического слоя на тепловые свойств проведено в [21]. При отношении толщины слоев HfO_x к CeO_x равному 0.1 для мемристора Au/CeO_x/HfO_x/Al наблюдается максимальный нагрев в области филамента, что объясняется зависимостью теплопроводности слоя оксида гафния от толщины. При данном соотношении наблюдается максимальная надежность (>2×10⁵) и минимальное рабочее напряжение переключения.

Сравнение различных диэлектрических материалов было проведено в работах [124, 125]. В [124] выявлено, что мемристор с Ta₂O₅/Ta обладает значительно лучшей надежностью (>10⁹) по сравнению с мемристором HfO₂/Hf. Сравнение оксидов металлов HfO₂, TiO₂, Ta₂O₅ и Al₂O₃ в качестве изолирующего слоя мемристора проведено в [125, 126]. Были рассчитаны энергии образования кислородных вакансий и их барьеры миграции. Показано, что контакт с активным металлом понижает энергию образования вакансий. Высокая энергия образования снижает вероятность образования новых вакансий во время циклов переключения, что обеспечивает постоянное количество вакансий и как следствие увеличивает надежность. Оксид TiO₂ содержит ряд субстехиометрических фаз TiO_{2-x}, которые будут препятствовать сохранению числа вакансий и следовательно его применение менее предпочтительно

для увеличения надежности приборов. Al₂O₃ имеет сравнительно большую энергию образования вакансии O и большую энергию миграции, так что миграция вакансий в цикле ReRAM будет затруднена. По мнению авторов высокая надежность Ta₂O₅ связана с тем, что Ta₂O₅ остается аморфным при более высоких температурах, чем HfO₂, а также адаптивностью его решетки к образованию вакансий кислорода.

Таким образом, комбинацией различных оксидов и варьированием толщины пленок активной среды можно управлять параметрами переключения мемристора, а также сроком его службы и временем хранения информации.

5. Влияние параметров проводящих электродов ячейки

Материал электродов мемристора не только влияет на параметры переключения, но и может привести к быстрой деградации устройства. Материал электрода может быть химически активным по отношению к кислороду и инертным. Электроды первого типа обычно используют для создания резервуара вакансий на границе электрод/диэлектрик посредством гетерогенной химической реакции с материалом диэлектрика. При этом, энергия образования/миграции дефектов понижается при контакте с активным электродом [125].

В [103] сравнивались различные материалы электродов для мемристора на основе TaO_x. Получено, что ячейки памяти с электродами из Ir, Pt, Au, имеющими высокую работу выхода электронов, показывают стабильное поведение переключения сопротивления в отличии от электродов из Ag или W. В данной работе получено, что стабильные переключения происходят для металлов электродов, чей электрохимический потенциал больше чем у Ta. Это указывает на то, что отсутствие реакции окисления электродов является предпочтительным для переключения сопротивления. Авторы [5] показали, что использование Ru в качестве нижнего электрода (BE) в мемристоре Pt/Ta₂O₅/BE приводит к снижению напряжения переключения и значительного (почти на 3 порядка) максимального уровня тока по сравнению с электродами BE из Ta и Pt. Замена TiN электрода на Ru [94], обладающего более низким сродством к анионам кислорода в мемристоре TiN/Ta₂O₅/Ta привело к увеличению стабильности до более чем 10⁸ циклов переключения. Авторы объясняют полученные результаты непрерывным медленным окислением TiN на гетерогранице, что изменяет баланс вакансий в резервуаре и, в конечном итоге приводит к невозможности восстановления филамента из-за трудного вывода атомов O из TiN. Сравнение характеристик мемристоров

Pt/HfO₂/TiO₂/HfO₂/Pt и Pt/HfO₂/TiO₂/HfO₂/TiN, обусловленных материалом электродов, проводилось в работе [23]. В случае Pt-электрода отношение HRS/LRS составляет ~10⁵, а для TiN-электрода ~10². Кроме того, для мемристора с TiN наблюдается сильный разброс HRS и требуются большие напряжения переключения для экстракции вакансий из резервуара.

Для Pt/Ta₂O_{5-x}/TaO_{2-x}/Al₂O₃/Pt [127] обнаружено, что шероховатость на границе Pt/Ta₂O_{5-x} влияет на механизм переключения в мемристорной ячейке. Высокая шероховатость способствует сильной локализации электрического поля, способствуя образованию единичных филаментов. В то время как, повышение гладкости контактов способствует образованию мультибитовых состояний. Ранее, в [84] было также установлено, что за счет химико-механической полировки (CMP) при изготовлении мемристорной ячейки TiN/HfO_x/TiN удалось увеличить надежность до более чем 10¹⁰ циклов переключения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре обсуждается влияние температуры, параметров импульса переключения, а также концентрации вакансий кислорода в резервуаре, материалов проводящих электродов и активного диэлектрического слоя в мемристоре на способность приборов к сохранению заданного значения сопротивления HRS и LRS с течением времени, и стабильности состояний HRS и LRS при многократных циклах перезаписи.

Согласно результатам, приведенным в обзоре, можно сделать вывод о том, что влияние указанных параметров на надежность и время сохранения состояний мемристоров является комплексным, многофакторным. Однако можно выделить следующие качественно описанные тенденции:

– Рост температуры приводит к снижению надежности мемристорной ячейки благодаря росту активационных процессов диффузии/миграции и генерации/рекомбинации точечных дефектов. Рост температуры может также приводить к образованию кристаллов новых фаз, что также снижает надежность приборов.

– Рост напряжения переключения и увеличение длительности импульса переключения сверх минимально необходимых значений также снижает надежность ячейки, что может быть объяснено избыточным ростом температуры в области филамента, и эволюцией филамента в ходе переключений к нестационарному состоянию (обрыв либо излишнее утолщение).

– Рост концентрации вакансий кислорода в резервуаре и активной области диэлектрика способствует снижению потенциала формовки, ино-

гда приводит к образованию бесформовочного мемристора, но при этом увеличивается разброс сопротивлений HRS и LRS при последовательных переключениях ячейки, а также снижается ее надежность.

– Использование электродов ячейки инертных по отношению к кислороду увеличивает срок службы и время хранения информации в мемристорных ячейках. Пленки электродов должны иметь минимальное количество дефектов, и изолировать активную среду диэлектрика от внешней среды. В ряде случаев установлено, что иногда мемристор деградирует из-за дефектов, которые приносятся электродами.

– Применение многослойных диэлектрических структур в качестве активной среды мемристора позволяет настраивать размер и положение резервуара вакансий, а также энергию образования/миграции дефектов.

– Из проанализированных диэлектриков в составе мемристоров, оксид тантала Ta₂O₅ имеет наиболее низкие энергии миграции и образования вакансий кислорода, и остается аморфным при более высоких температурах. Это объясняет его преимущество в надежности (endurance) ячеек и позволяет использовать малые потенциалы переключения.

Работа выполнена в рамках программы № 066-2019-0004 Министерства науки и образования Российской Федерации при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 18-37-20076.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ang D.S., Zhou Y., Yew K.S., Berco D.* On the area scalability of valence-change memristors for neuromorphic computing // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 115. P. 173501.
2. *Carta D., Salaoru I., Khiat A., Regoutz A., Mitterbauer C., Harrison N.M., Prodromakis T.* Investigation of the Switching Mechanism in TiO₂-Based RRAM: A Two-Dimensional EDX Approach // *ACS Applied Materials & Interfaces.* 2016. V. 8(30). P. 19605–19611.
3. *Matveyev Y., Kirtaev R., Fetisova A., Zakharchenko S., Negrov D., Zenkevich A.* Crossbar Nanoscale HfO₂-Based Electronic Synapses // *Nanoscale Res Lett* 2016. V. 11. P. 147.
4. *Sun W., Gao B., Chi M., Xia Q., Yang J.J., Qian H., Wu H.* Understanding memristive switching via in situ characterization and device modeling // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 3453.
5. *Yoon J.H., Zhang J., Lin P., Upadhyay, Yan P., Liu Y., Xia Q., Yang J.J.* A Low-Current and Analog Memristor With Ru as Mobile Species // *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 2020. V. 32. № 9. P. e1904599.
6. *Cheng H.Y., Chien W.C., Kuo I.T., Yeh C.W., Gignac L., Kim W., Lai E.K., Lin Y.F., Bruce R.L., Lavoie C., Cheng C.W., Ray A., Lee F.M., Carta F., Yang C.H., Lee M.H., Ho H.Y., BrightSky M., Lung H.L.* Ultra-High Endurance and Low IOFF Selector based on As-

- SeGe Chalcogenides for Wide Memory Window 3D Stackable Crosspoint Memory, 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA. 2018. P. 37.3.1–37.3.4.
7. Chakrabarti B., Lastras-Montañó M.A., Adam G., Prezioso M., Hoskins B., Payvand M., Madhavan A., Ghofrani A., Theogarajan L., Cheng K.-T., Strukov D.B. A multiply-add engine with monolithically integrated 3D memristor crossbar/CMOS hybrid circuit // *Sci Rep* 2017. V. 7. P. 42429.
 8. Li C., Han L., Jiang H., Jang M.-H., Lin P., Wu Q., Barnell M., Yang J.J., Xin H.L., Xia Q. Three-dimensional crossbar arrays of self-rectifying Si/SiO₂/Si memristors // *Nat Commun.* 2017. 8, 15666.
 9. Yoshida C., Tsunoda K., Noshiro H., Sugiyama Y. High speed resistive switching in Pt/TiO₂/TiN film for non-volatile memory application // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 223510.
 10. Yu S., Wu Y., Jeyasingh R., Kuzum D., Wong H.-S.P. An Electronic Synapse Device Based on Metal Oxide Resistive Switching Memory for Neuromorphic Computation, IEEE Transactions on Electron Devices. 2011. V. 58. № 8. P. 2729–2737.
 11. Wedig A., Luebben M., Cho D.-Y., Moors M., Skaja K., Rana V., Hasegawa T., Adepalli K.K., Yildiz B., Waser R., Valov I. Nanoscale cation motion in TaO_x, HfO_x and TiO_x memristive systems // *Nature Nanotech.* 2016. V. 11. P. 67–74.
 12. Lee N.J., Kang T.S., Hu Q., Lee T.S., Yoon T.-S., Lee H.H., Yoo E.J., Choi Y.J., Kang C.J. Tri-state resistive switching characteristics of MnO/Ta₂O₅ resistive random access memory device by a controllable reset process // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. P. 225102.
 13. Liu J., Yang H., Ji Y., Ma Z., Chen K., Zhang X., Zhang H., Sun Y., Huang X., Oda S. An electronic synaptic device based on HfO₂TiO_x bilayer structure memristor with self-compliance and deep-RESET characteristics // *Nanotechnology.* 2018. V. 29. P. 415205.
 14. Wu W., Wu H., Gao B., Deng N., Qian H. Suppress variations of analog resistive memory for neuromorphic computing by localizing Vo formation // *J. Appl. Phys.* 2018. 124, 152108.
 15. Wu L., Liu H., Li J., Wang S., Wang X. A Multi-level Memristor Based on Al-Doped HfO₂ Thin Film // *Nanoscale. Res. Lett.* 2019. V. 14. P. 177.
 16. Yin L., Cheng R., Wang Z., Wang F., Sendeku M.G., Wen Y., Zhan X., He J. Two-Dimensional Unipolar Memristors with Logic and Memory Functions, *Nano Lett.* 2020. V. 20. № 6. P. 4144–4152.
 17. Simanjuntak F.M., Ohno T., Chandrasekaran S., Tseng T.-Y., Samukawa S. Neutral oxygen irradiation enhanced forming-less ZnO-based transparent analog memristor devices for neuromorphic computing applications // *Nanotechnology.* 2020. V. 31. P. 26LT01.
 18. Jo S.H., Chang T., Ebong I., Bhadviya B.B., Mazumder P., Lu W. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems // *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 4. P. 1297–1301.
 19. Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D., Adam G.C., Likharev K.K., Strukov D.B. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // *Nature* 2015. V. 521. P. 61–64.
 20. Guo J., Wang L., Liu Y., Zhao Z., Zhu E., Lin Z., Wang P., Jia C., Yang S., Lee S.-J., Huang W., Huang Y., Duan X. Highly Reliable Low-Voltage Memristive Switching and Artificial Synapse Enabled by van der Waals Integration // *Matter.* 2020. V. 2. P. 965–976.
 21. Hsieh C.-C., Roy A., Chang Y.-F., Shahrjerdi D., Banerjee S.K. A sub-1-volt analog metal oxide memristive-based synaptic device with large conductance change for energy-efficient spike-based computing systems // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 109. P. 223501.
 22. Fan Z., Xu H., Wang Z., Xu J., Ma J., Liu Y. Reversible Alternation between Bipolar and Unipolar Resistive Switching in Ag/MoS₂/Au Structure for Multilevel Flexible Memory // *J. Mater. Chem. C* 2018. V. 6. № 27. P. 7195–7200.
 23. Zhang W., Kong J.-Z., Cao Z.-Y., Li A.-D., Wang L.-G., Zhu L., Li X., Cao Y.-Q., Wu D. Bipolar Resistive Switching Characteristics of HfO₂/TiO₂/HfO₂ Trilayer-Structure RRAM Devices on Pt and TiN-Coated Substrates Fabricated by Atomic Layer Deposition // *Nanoscale Res Lett.* 2017. V. 12. № 1. P. 393.
 24. Ismaila M., Rahmania M.K., Khana S.A., Choia J., Hussaina F., Batoob Z., Ranac A.M., Leea J., Choa H., Kim S. Effects of Gibbs free energy difference and oxygen vacancies distribution in a bilayer ZnO/ZrO₂ structure for applications to bipolar resistive switching // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 498. P. 143833.
 25. Tu M., Lu H., Luo S., Peng H., Li S., Ke Y., Yuan S., Huang W., Jie W., Hao J. Reversible Transformation between Bipolar Memory Switching and Bidirectional Threshold Switching in 2D Layered K-Birnessite Nanosheets // *ACS Appl Mater Interfaces.* 2020. V. 12. № 21. P. 24133–24140.
 26. Ronald (ed.) T. Memristors and Memristive Systems // New York, NY 2014, Springer.
 27. Kim K.M., Zhang J., Graves C., Yang J.J., Choi B.J., Hwang C.S., Li Z., Williams R.S. Low-Power, Self-Rectifying, and Forming-Free Memristor with an Asymmetric Programming Voltage for a High-Density Crossbar Application // *Nano Letters* 2016. V. 16. № 11. P. 6724–6732.
 28. Prakash A., Jana D., Samanta S., Maikap S. Self-compliance-improved resistive switching sing Ir/TaO_x/W cross-point memory // *Nanoscale Research Letters.* 2013. V. 8. P. 527.
 29. Xiao N., Villena M.A., Yuan B., Chen S., Wang B., Shi Y., Hui F., Jing X., Prof. Lanza M. Resistive Random Access Memory Cells with a Bilayer TiO₂/SiO_x Insulating Stack for Simultaneous Filamentary and Distributed Resistive Switching // *Adv. Funct. Mater.* 2017. P. 1700384.
 30. Kwon D.-H., Kim M., Jang J.H., Jeon J.M., Lee M.H., Kim G.H., Li X.-S., Park G.-S., Lee B., Han S., Kim M., Hwang C.S. Atomic structure of conducting nanofilaments in TiO₂ resistive switching memory // *Nature Nanotech.* 2010. V. 5. P. 148–153.
 31. Liu Q., Sun J., Lv H., Long S., Yin K., Wan N., Li Y., Sun L., Liu M. Real-time observation on dynamic growth/dissolution of conductive filaments in oxide-electrolyte-based ReRAM // *Adv. Mater.* 2012. V. 24. P. 1844–1849.

32. Chen J.-Y., Hsin C.-L., Huang C.-W., Chiu C.-H., Huang Y.-T., Lin S.-J., Wu W.-W., Chen L.-J. Dynamic Evolution of Conducting Nanofilament in Resistive Switching Memories // *Nano Lett.* 2013. V. 13. № 8. P. 3671–3677.
33. Lanza M., Wong H.-S.P., Pop E., Ielmini D., Strukov D., Regan B.C., Larcher L., Villena M.A., Yang J.J., Goux L., Belmonte A., Yang Y., Puglisi F.M., Kang J., Magyari-Köpe B., Yalon E., Kenyon A., Buckwell M., Mehonic A., Shluger A., Li H., Hou T.-H., Hudec B., Akinwande D., Ge R., Ambrogio S., Roldan J.B., Miranda E., Suñe J., Pey K.L., Wu X., Raghavan N., Wu E., Lu W.D., Navarro G., Zhang W., Wu H., Li R., Holleitner A., Wurstbauer U., Lemme M.C., Liu M., Long S., Liu Q., Lv H., Padovani A., Pavan P., Valov I., Jing X., Han T., Zhu K., Chen S., Hui F., Shi Y. Recommended Methods to Study Resistive Switching Devices, *Adv. Electron. Mater.* 2018. P. 1800143.
34. Banerjee W., Liu Q., Hwang H. Engineering of defects in resistive random access memory devices // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 127. P. 051101.
35. Wang Z., Jiang H., Jang M.H., Lin P., Ribbeb A., Xia Q., Yang J.J. Electrochemical metallization switching with a platinum group metal in different oxides // *Nanoscale.* 2016. V. 8. № 29. P. 14023–14030.
36. Wang Z.-Q., Ambrogio S., Balatti S., Sills S., Calderoni A., Ramaswamy N., Ielmini D. Cycling-induced degradation of metal-oxide resistive switching memory (RRAM), *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* 2015. P. 7.6.1–7.6.4.
37. Gao et al B. Modeling of Retention Failure Behavior in Bipolar Oxide-Based Resistive Switching Memory // *IEEE Electron Device Letters* 2011. V. 32. № 3. P. 276–278.
38. Wu X., Cha D., Bosman M., Raghavan N., Migas D.B., Borisenko V.E., Zhang X.-X., Kun Li, Pey K.-L. Intrinsic nanofilamentation in resistive switching // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 114503.
39. Guo X., Wang Q., Lv X., Yang H., Sun K., Yang D., Zhang H., Hasegawa T., He D. SiO₂/Ta₂O₅ heterojunction ECM memristor: Physical nature of their low voltage operation with high stability and uniformity // *Nanoscale* 2020. V. 12. № 7. P. 4320–4327.
40. Yoon J.H., Zhang J., Ren X., Wang Z., Wu H., Li Z., Barnell M., Wu Q., Lauhon L.J., Xia Q., Yang J.J. Truly Electroforming-Free and Low-Energy Memristors with Preconditioned Conductive Tunneling Paths // *Adv. Funct. Mater.* 2017. P. 1702010.
41. Yoon J.H., Zhang J., Lin P., Upadhyay, Yan P., Liu Y., Xia Q., Yang J.J. A Low-Current and Analog Memristor With Ru as Mobile Species // *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)* 2020. V. 32. № 9. P. e1904599.
42. Lv H., Xu X., Liu H., Liu R., Liu Q., Banerjee W., Sun H., Long S., Li L., Liu M. Evolution of conductive filament and its impact on reliability issues in oxide-electrolyte based resistive random access memory // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 7764.
43. Jiang H., Han L., P. L., Wang Z., Jang M.H., Wu Q., Barnell M., Yang J.J., Xin H.L., Xia Q. Sub-10 nm Ta Channel Responsible for Superior Performance of a HfO₂ Memristor // *Scientific Reports.* 2016. V. 6. P. 28525.
44. Jang M.H., Agarwal R., Nukala P., Choi D., Johnson A.T.C., Chen I.-W., Agarwal R. Observing oxygen vacancy driven electroforming in PtTiO₂-Pt device via strong metal support interaction // *Nano Lett.* 2016. V. 16. № 4. P. 2139–2144.
45. Jung Y.C., Seong S., Lee T., Kim S.Y., Park I.-S., Ahn J. Improved resistive switching characteristics of a Pt/HfO₂/Pt resistor by controlling of anode interface with forming and switching polarity // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 435. P. 117–121.
46. Xu X., Tai L., Gong T., Yin J., Huang P., Yu J., Dong D.N., Luo Q., Liu J., Yu Z., Zhu X., Wu X.L., Liu Q., Lv H., Liu M. 40× Retention Improvement by Eliminating Resistance Relaxation with High Temperature Forming in 28 nm RRAM Chip // *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2018. P. 20.1.1–20.1.4.
47. Hennen T., Bedau D., Rupp J.A.J., Funck C., Menzel S., Grobis M., Waser R., Wouters D.J. Forming-free Mott-oxide threshold selector nanodevice showing s-type NDR with high endurance (>10¹² cycles), excellent V_{th} stability (5%), fast (<10 ns) switching, and promising scaling properties // *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2018. P. 37.5.1–37.5.4.
48. Kumar A., Das M., Garg V., Sengar B.S., Htay M.T., Kumar S., Kranti A., Mukherjee S. Forming-free high-endurance Al/ZnO/Al memristor fabricated by dual ion beam sputtering // *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 110. P. 253509.
49. Yang J.J., Zhang M.-X., Strachan J.P., Miao F., Pickett M.D., Kelley R.D., Medeiros-Ribeiro G., Williams R.S. High switching endurance in TaO_x memristive devices // *Appl. Phys. Lett.* 2010, V. 97, P. 232102.
50. Lee M.-J., Lee C.B., Lee D., Lee S.R., Chang M., Hur J.H., Kim Y.-B., Kim C.-J., Seo D.H., Seo S., Chung U.-I., Yoo I.-K., Kim K. A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta₂O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures // *Nature Mater.* 2011. V. 10. P. 625–630.
51. Choi B.J., Torrezan A.C., Strachan J.P., Kotula P.G., Lohn A.J., Marinella M.J., Li Z., Williams R.S., Yan J.J. High-Speed and Low-Energy Nitride Memristors // *Adv. Funct. Mater.* 2016. V. 26. P. 5290–5296.
52. Govoreanu B., Kar G.S., Chen Y.-Y., Paraschiv V., Kubicek S., Fantini A., Radu I.P., Goux L., Clima S., Degraeve R., Jossart N., Richard O., Vandeweyer T., Seo K., Hendrickx P., Pourtois G., Bender H., Altimime L., Wouters D.J., Kittl J.A., Jurczak M. 10 × 10 nm² Hf/HfO_x crossbar resistive RAM with excellent performance, reliability and low-energy operation // *International Electron Devices Meeting, Washington, DC*. 2011. P. 31.6.1–31.6.4.
53. Ahn C., Jiang Z., Lee C.S., Chen H.Y., Liang J., Liyanage L.S., Wong H.S.P. 1D Selection Device Using Carbon Nanotube FETs for High-Density Cross-Point Memory Arrays // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2015. V. 62. P. 2197.
54. Srivastava S., Thomas J.P., Leung K.T. Programmable, electroforming-free TiO_x/TaO_x heterojunction-based non-volatile memory devices // *Nanoscale.* 2019. V. 11. № 39. P. 18159–18168.
55. Chen Y.Y., Komura M., Degraeve R., Govoreanu B., Goux L., Fantini A., Raghavan N., Clima S., Zhang L., Belmonte A., Redolfi A., Kar G.S., Groeseneken G.,

- Wouters D.J., Jurczak M.* Improvement of data retention in HfO₂/Hf 1T1R RRAM cell under low operating current // IEEE International Electron Devices Meeting, Washington. DC. 2013. P. 10.1.1–10.1.4.
56. *Traoré B., Blaise P., Vianello E., Grampeix H., Bonneville A., Jalaguier E., Molas G., Jeannot S., Perniola L., Desalvo B., Nishi Y.* Microscopic understanding of the low resistance state retention in HfO₂ and HfAlO based RRAM // IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco. 2014. P. 21.5.1–21.5.4.
 57. *Calderoni A., Sills S., Cardon C., Faraoni E., Ramaswamy N.* Engineering ReRAM for high-density applications // Microelectron. Eng. 2015. V. 147. P. 145–150.
 58. *Nakamura R., Toda T., Tsukui S., Tane M., Ishimaru M., Suzuki T., Nakajima H.* Diffusion of oxygen in amorphous Al₂O₃, Ta₂O₅, and Nb₂O₅ // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. P. 033504.
 59. *O'Hara A., Bersuker G., Demkov A.A.* Assessing hafnium on hafnia as an oxygen getter // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 183703.
 60. *Boalchand P., Bresser W.* Mobile silver ions and glass formation in solid electrolytes // Nature. 2001. V. 410. P. 1070–1073.
 61. *Kozicki M.N., Mira P., Mitkova M.* Nanoscale memory elements based on solid-state electrolytes // Nanotech. IEEE Trans. 2005. V. 4. P. 331–338.
 62. *Kwon D.H., Kim K.M., Jang J.H., Jeon J.M., Lee M.H., Kim G.H., Li X.-S., Park G.-Su, Lee B., Han S., Kim M. & Hwang C. S.* Atomic structure of conducting nanofilaments in TiO₂ resistive switching memory // Nature Nanotech. 2010. V. 5. P. 148–153.
 63. *Yang Y., Gao P., Gaba S., Chang T., Pan X., Lu W.* Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories // Nat. Commun. 2012. V. P. 3. 732–735.
 64. *Huang P., Gao B., Chen B., Zhang F., Liu L., Du G., Kang J., Liu X.* Stochastic Simulation of Forming, SET and RESET Process for Transition Metal Oxide-based Resistive Switching Memory // SISPAD. 2012. P. 312–315. ISBN 978-0-615-71756-2
 65. *Huang P., Liu X.Y., Li W.H., Deng Y.X., Chen B., Lu Y., Gao B., Zeng L., Wei K.L., Du G., Zhang X., Kang J.F.* A physical based analytic model of RRAM operation for circuit simulation // International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA. 2012. P. 26.6.1–26.6.4.
 66. *Strukov D.B., Borghetti J.L., Williams R.S.* Coupled Ionic and Electronic Transport Model of Thin-Film Semiconductor Memristive Behavior // Small. 2009. V. 5. P. 1058–1063.
 67. *Noman M., Jiang W., Salvador P. A., Skowronski M., Bain J. A.* Computational investigations into the operating window for memristive devices based on homogeneous ionic motion // Appl. Phys. A – Mater. Sci. Process. 2011. V. 102. P. 877–883.
 68. *Kalaev D., Riess I.* Examining the crossing of I-V curves in devices based on mixed-ionic-electronic-conductors // Solid State Ion., 2014. V. 262. P. 883–888.
 69. *Kalaev D., Yalon E., Riess I.* On the direction of the conductive filament growth in valence change memory devices during electroforming // Solid State Ionics. 2015. V. 276. P. 9–17.
 70. *Tang S., Tesler F., Marlasca F.G., Levy P., Dobrosavljevic V., Rozenberg M.* Shock Waves and Commutation Speed of Memristors // Phys. Rev. X. 2016. V. 6. P. 11028/1-16.
 71. *Larentis S., Nardi F., Balatti S., Gilmer D.C., Ielmini D.* Resistive Switching by Voltage-Driven Ion Migration in Bipolar RRAM-Part II: Modeling // IEEE Trans. Electron Devices 2012. V. 59. P. 2468–2475.
 72. *Nardi F., Balatti S., Larentis S., Gilmer D.C., Ielmini D.* Complementary Switching in Oxide-Based Bipolar Resistive-Switching Random Memory, IEEE Trans. Electron Devices 2013. V. 60. P. 70–77.
 73. *Kim S., Choi S., Lu W.* Comprehensive Physical Model of Dynamic Resistive Switching in an Oxide Memristor // ACS Nano. 2014. V. 8. P. 2369–2376.
 74. *Marchewka A., Waser R., Menzel S.* Physical Simulation of Dynamic Resistive Switching in Metal Oxides Using a Schottky Contact Barrier Model // International Conference On Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), 9–11 September, Washington D.C, USA. 2015. P. 297–300.
 75. *Marchewka A., Roesgen B., Skaja K., Du H., Jia C.L., Mayer J., Rana V., Waser R., Menzel S.* Nanoionic Resistive Switching Memories: On the Physical Nature of the Dynamic Reset Process // Adv. Electron. Mater. 2016. V. 2. P. 1500233/1-13, 2016.
 76. *Marchewka A., Waser R., Menzel S.* Physical Modeling of the Electroforming Process in Resistive-Switching Devices // International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), September 7–9, Kamakura, Japan. 2017. P. 133–136.
 77. *Wang L.-G., Qian X., Cao Y.-Q., Cao Z.-Y., Fang G.-Y., Li A.-D., Wu D.* Excellent resistive switching properties of atomic layer-deposited Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃ trilayer structures for non-volatile memory applications // Nanoscale Res Lett. 2015. P. 10. P. 135.
 78. *Huang X., Li Y., Li H., Xue K., Wang X., Miao X.* Forming-Free, Fast, Uniform, and High Endurance Resistive Switching From Cryogenic to High Temperatures in W/AlO_x/Al₂O₃/Pt Bilayer Memristor // IEEE Electron Device Letters. 2020. 41. V. 4. P. 549–552.
 79. *Kim W., Hardtdegen A., Rodenbüchera C., Menzela S., Wouters D.J., Hoffmann-Eiferta S., Buca D., Waser R., Rana V.* Forming-free metal-oxide ReRAM by oxygen ion implantation process // IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco. CA. 2016. P. 4.4.1–4.4.4.
 80. *Wei Z., Takagi T., Kanzawa Y., Katoh Y., Ninomiya T., Kawai K., Muraoka S., Mitani S., Katayama K., Fujii S., Miyayaga R., Kawashima Y., Mikawa T., Shimakawa K., Aono K.* Demonstration of high-density ReRAM ensuring 10-year retention at 85°C based on a newly developed reliability model // International Electron Devices Meeting. 2011. P. 31.4.1–31.4.4.
 81. *Wei Z., Takagi T., Kanzawa Y., Katoh Y., Ninomiya T., Kawai K., Muraoka S., Mitani S., Katayama K., Fujii S., Miyayaga R., Kawashima Y., Mikawa T., Shimakawa K. and Aono K.* Retention Model for High-Density ReRAM // 4th IEEE International Memory Workshop 2012. P. 1–4.
 82. *Chen B., Lu Y., Gao B., Fu Y.H., Zhang F.F., Huang P., Chen Y.S., Liu L.F., Liu X.Y., Kang J.F., Wang Y.Y., Fang Z., Yu H.Y., Li X., Wang X.P., Singh N., Lo G.Q.,*

- Kwon D.L.* Physical mechanisms of endurance degradation in TMO-RRAM // International Electron Devices Meeting, Washington, DC. 2011. P. 12.3.1–12.3.4.
83. *Fantini A., Goux L., Redolfi A., Degraeve R., Kar G., Chen Y.Y., Jurczak M.* Lateral and vertical scaling impact on statistical performances and reliability of 10 nm TiN/Hf(Al)O/Hf/TiN RRAM devices // Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers, Honolulu, HI. 2014. P. 1–2.
 84. *Lee H.Y., Chen Y.S., Chen P.S., Gu P.Y., Hsu Y.Y., Wang S.M., Liu W.H., Tsai C.H., Sheu S.S., Chiang P.C., Lin W.P., Lin C.H., Chen W.S., Chen F.T., Lien C.H., Tsai M.-J.* Evidence and solution of over-RESET problem for HfO_x based resistive memory with sub-ns switching speed and high endurance // International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA. 2010. P. 19.7.1–19.7.4.
 85. *Liu C.-F., Tang X.-G., Wang L.-Q., Tang H., Jiang Y.-P., Liu Q.-X., Li W.-H., Tang Z.-H.* Resistive Switching Characteristics of HfO₂ Thin Films on Mica Substrates Prepared by Sol-Gel Process. *Nanomaterials* (Basel). 2019. V. 9. № 8. P. 1124.
 86. *Ninomiya T., Takagi T., Wei Z., Muraoka S., Yasuhara R., Katayama K., Ikeda Y., Kawai K., Kato Y., Kawashima Y., Ito S., Mikawa T., Shimakawa K., Aono K.* Conductive filament scaling of TaO_x bipolar ReRAM for long retention with low current operation // Symposium on VLSI Technology (VLSIT), Honolulu, HI. USA. 2012. P. 73–74.
 87. *Chen N.H., Zheng Z.W., Cheng C.H., Yeh F.S.* Sub-micro watt resistive memories using nano-crystallized aluminum oxynitride dielectric // *Appl. Phys. A*. 2014. V. 116. P. 575–579.
 88. *Srivastava S.* Defect-Rich Size-Selected Nanoclusters and Nanocrystalline Films of Titanium (IV) Oxide and Tantalum (IV) Oxide for Efficient Photocatalyst and Electroforming-Free Memristor Applications // Waterloo, Ontario, Canada, 2016. <http://hdl.handle.net/10012/10487>
 89. *Balatti S., Ambrogio S., Wang Z.-Q., Sills S., Calderoni A., Ramaswamy N., Ielmini D.* Pulsed cycling operation and endurance failure of metal-oxide resistive (RRAM) // IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA. 2014. P. 14.3.1–14.3.4.
 90. *Chen Y.Y., Degraeve R., Clima S., Govoreanu B., Goux L., Fantini A.* Understanding of the endurance failure in scaled HfO₂-based 1T1R RRAM through vacancy mobility degradation // International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA. 2012. P. 20.3.1–20.3.4.
 91. *Chai Z., Ma J., Zhang W., Govoreanu B., Simoen E., Zhang J.F., Ji Z., Gao R., Groeseneken G., Jurczak M.* RTN-based defect tracking technique: Experimentally probing the spatial and energy profile of the critical filament region and its correlation with HfO₂RRAM switching operation and failure mechanism // IEEE Symposium on VLSI Technology (2016): 1–2.
 92. *Kim K.-H., Jo S.H., Gaba S., Lu W.* Nanoscale resistive memory with intrinsic diode characteristics and long endurance // *Intrins. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 053106.
 93. *Chen Y.Y., Govoreanu B., Goux L., Degraeve R., Fantini A., Kar G., Wouters D., Groeseneken G., Kittl J.A., Jurczak M.* Balancing SET/RESET Pulse for Endurance in 1T1R Bipolar RRAM // IEEE Transactions on Electron Devices. 2012. V. 59. P. 3243.
 94. *Chen C.Y., Goux L., Fantini A., Clima S., Degraeve R., Redolfi A., Chen Y.Y., Groeseneken G., Jurczak M.* Endurance degradation mechanisms in TiN/Ta₂O₅/Ta resistive random-access memory cells // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 053501.
 95. *Dongale T.D., Khot K.V., Mohite S.V., Desai N.K., Shinde S.S., Moholkar A.V., Rajpure K.Y., Bhosale P.N., Patil P.S., Gaikwad P.K., Kamat R.K.* Investigating Reliability Aspects of Memristor based RRAM with Reference to Write Voltage and Frequency, 2016 // <https://arxiv.org/abs/1602.01947>
 96. *Merced-Grafals E.J., Dávila N., Ge N., Williams R.S., Strachan J.P.* Repeatable, accurate, and high speed multi-level programming of memristor 1T1R arrays for power efficient analog computing applications // *Nanotechnology*. 2016. V. 27. P. 365202.
 97. *Wang G., Long S., Yu Z., Zhang M., Li Y., Xu D., Lv H., Liu Q., Yan X., Wang M., Xu X., Liu H., Yang B., Liu M.* Impact of program/erase operation on the performances of oxide-based resistive switching memory // *Nanoscale. Res. Lett.* 2015. V. 10. P. 39.
 98. *Kim K.M., Yang J.J., Strachan J.P., Grafals E. M., Ge N., Melendez N.D., Li Z., Williams R.S.* Voltage divider effect for the improvement of variability and endurance of TaO_x memristor // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 20085.
 99. *Ravi V., Prabakaran S.R.S.* Fault tolerant adaptive write schemes for improving endurance and reliability of memristor memories // *Int. J. Electron. Commun.* 2018. V. 94. P. 392–406.
 100. *Wang C., Wu H., Gao B., Zhang T., Yang Y., Qian H.* Conduction mechanisms, dynamics and stability in ReRAMs // *Mic. Eng* 2018. V. 187–188. P. 121–133.
 101. *Kamarozaman N.S., Shamsul M.U., Herman S.H., Abdullah W.F.H.* Effect of Oxygen Flow Rate on the Memristive Behavior of Reactively Sputtered TiO₂ Thin Films // *Adv. Mat. Res.* 2014. V. 1024. P. 64.
 102. *Kim M., Yoo K., Jeon S.-P., Park S.K., Kim Y.-H.* The Effect of Multi-Layer Stacking Sequence of TiO_x Active Layers on the Resistive-Switching Characteristics of Memristor Devices. *Micromachines* (Basel). 2020. V. 11. № 2. P. 154.
 103. *Wei Z., Kanzawa Y., Arita K., Katoh Y., Kawai K., Muraoka S., Mitani S., Fujii S., Katayama K., Iijima M., Mikawa T., Ninomiya T., Miyanaga R., Kawashima Y., Tsuji K., Himeno A., Okada T., Azuma R., Shimakawa K., Sugaya H., Takagi T., Yasuhara R., Horiba K., Kumigashira H., Oshima M.* Highly reliable TaO_x ReRAM and direct evidence of redox reaction mechanism // 2008 IEEE International Electron Devices Meeting.
 104. *Sharath S.U., Vogel S., Molina-Luna L., Hildebrandt E., Wenger C., Kurian J., Duerrschnebel M., Niermann T., Niu G., Calka P., Lehmann M., Kleebe H.-J., Schroeder T., Alf L.* Control of Switching Modes and Conductance Quantization in Oxygen Engineered HfO_x based Memristive Devices // *Advanced Functional Materials*. 2017. V. 27. P. 1700432.
 105. *Yin X., Wang Y., Chang T.-H., Zhang P., Li J., Xue P., Long Y., Shohet J.L., Voyles P.M., Ma Z., Wang X.* Memristive Behavior Enabled by Amorphous–Crys-

- talline 2D Oxide Heterostructure // *Adv. Mater.* 2020. P. 2000801.
106. *Clima S., Chen Y.Y., Degraeve R., Mees M., Sankaran K., Govoreanu B., Jurczak M., De Gendt S., Pourtois G.* First-principles simulation of oxygen diffusion in HfO_x : Role in the resistive switching mechanism // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. P. 133102.
 107. *Stathopoulos S., Michalas L., Khiat A., Serb A., Prodromakis T.* An Electrical Characterisation Methodology for Benchmarking Memristive Device Technologies // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 19412.
 108. *Valov I., Linn E., Tappertzshofen S., Schmelzer S., Van den Hurk J., Lentz F., Waser R.* Nanobatteries in redox-based resistive switches require extension of memristor theory // *Nat. Commun.* 2013. V. 4. P. 1771.
 109. *Zhao X., Zhang X., Shang D., Wu Z., Xiao X., Chen R., Tang C., Liu J., Li W., Lv H., Jiang C., Liu Q., Liu M.* Uniform, Fast, and Reliable Li_xSiO_y -Based Resistive Switching Memory // *IEEE Electron. Device Lett.* 2019. V. 40. P. 554–557.
 110. *Tsai T.-L., Chang H.-Y., Lou J. J.-C., Tseng T.-Y.* A high performance transparent resistive switching memory made from ZrO_2/AlON bilayer structure // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 108. P. 153505.
 111. *Chang C.-F., Chen J.-Y., Huang G.-M., Lin T.-Y., Tai K.-L., Huang C.-Y., Yeh P.-H., Wu W.-W.* Revealing conducting filament evolution in low power and high reliability $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ta}_2\text{O}_5$ bilayer RRAM // *Nano Energy.* 2018. V. 53. P. 871–879.
 112. *Woo J., Moon K., Song J., Lee S., Kwak M., Park J., Hwang H.* Improved Synaptic Behavior Under Identical Pulses Using $\text{AlO}_x/\text{HfO}_2$ Bilayer RRAM Array for Neuromorphic Systems // *IEEE Electron Device Lett.* 2016. V. 37. P. 994–997.
 113. *Park K., Lee J.S.* Reliable resistive switching memory based on oxygen-vacancycontrolled bilayer structures // *RSC Adv.* 2016. V. 6. P. 21736–21741.
 114. *Akbari M., Kim M.K., Kim D., Lee J.S.* Reproducible and reliable resistive switching behaviors of $\text{AlO}_x/\text{HfO}_x$ bilayer structures with Al electrode by atomic layer deposition // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 16704–16708.
 115. *Sadaf S.M., Liu X., Son M., Park S., Choudhury S.H., Cha E., Siddik M., Shin J., Hwang H.* Highly uniform and reliable resistance switching properties in bilayer WO_x/NbO_x RRAM devices // *Phys. Status Solidi.* 2012. V. 209. P. 1179–1183.
 116. *Huang C.Y., Huang C.Y., Tsai T.L., Lin C.A., Tseng T.-Y.* Switching mechanism of double forming process phenomenon in $\text{ZrO}_x/\text{HfO}_y$ bilayer resistive switching memory structure with large endurance // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. P. 062901.
 117. *Yang Y., Choi S., Lu W.* Oxide heterostructure resistive switching // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 2908.
 118. *Ismail M., Hashmi A., Rana A.M., Kim S.* Eradicating negative-Set behavior of TiO_2 -based devices by inserting an oxygen vacancy rich zirconium oxide layer for data storage applications // *Nanotechnology.* 2020; 31(32): 325201.
 119. *Hui F., Grustan-Gutierrez E., Long S., Liu Q., Ott A., Ferrari A., Lanza M.* Graphene and Related Materials for Resistive Random Access Memories // *Advanced Electronic Materials.* 2017. V. 3. P. 1600195.
 120. *Ye C., Deng T., Zhang J., Shen L., He P., Wei W., Wang H.* Enhanced resistive switching performance for bilayer $\text{HfO}_2/\text{TiO}_2$ resistive random access memory // *Cong Ye et al 2016 Semicond. Sci. Technol.* V. 31. P. 105005.
 121. *Li Y., Li X., Fu L., Chen R., Wang H., Gao X.* Effect of Interface Layer Engineering on Resistive Switching Characteristics of ZrO_2 -Based Resistive Switching Devices // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2018. V. 65. № 12. P. 5390–5394.
 122. *Liu J., Yang H., Ma Z., Chen K., Zhang X., Huang X., Oda S.* Characteristics of multilevel storage and switching dynamics in resistive switching cell of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sandwich structure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. P. 025102.
 123. *Zhu Y.B., Zheng K., Wu X., Ang L.K.* Enhanced stability of filament-type resistive switching by interface engineering // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 43664.
 124. *Goux L., Fantini A., Redolfi A., Chen C.Y., Shi F.F., Degraeve R., Chen Y.Y., Witters T., Groeseneken G., Jurczak M.* Role of the Ta scavenger electrode in the excellent switching control and reliability of a scalable low-current operated $\text{TiN}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ RRAM device // 2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers, Honolulu, HI. 2014. P. 1–2.
 125. *Guo Y., Robertson J.* Materials selection for oxide-based resistive random access memories // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. P. 223516.
 126. *Jiang H., Stewart D.A.* Enhanced oxygen vacancy diffusion in Ta_2O_5 resistive memory devices due to infinitely adaptive crystal structure // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. P. 134502.
 127. *Lee M.-J., Park G.-S., Seo D.H., Kwon S.M., Lee H.-J., Kim J.-S., Jung M., You C.-Y., Lee H., Kim H.-G., Pang S.-B., Seo S., Hwang H., Park S.K.* Reliable Multivalued Conductance States in TaO_x Memristors through Oxygen Plasma-Assisted Electrode Deposition with in Situ-Biased Conductance State Transmission Electron Microscopy Analysis // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2018. V. 10(35). P. 29757–29765.