

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ НА ЭЛЕКТРОФОРМОВКУ И СВОЙСТВА МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ “СЭНДВИЧ”-СТРУКТУР МЕТАЛЛ–SiO<sub>2</sub>–МЕТАЛЛ

© 2023 г. В. М. Мордвинцев<sup>1</sup>, \*, С. Е. Кудрявцев<sup>1</sup>, В. В. Наумов<sup>1</sup>, Е. С. Горлачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН,  
ул. Университетская, 21, Ярославль, 150007 Россия

\*E-mail: Mordvintsev-Viktor@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 10.07.2023 г.

Мемристоры (элементы энергонезависимой электрически перепрограммируемой памяти) на основе электроформованных открытых “сэндвич”–МДМ-структур изготавливались по тонкопленочной технологии. Исследования процесса электроформовки и особенностей вольтамперных характеристик после его проведения для структур с различными материалами электродов показали, что в случае выполнения анода из вольфрама удается минимизировать вероятность электрического пробоя при электроформовке и последующем функционировании элементов памяти. Это справедливо при любой позиции анода в МДМ-структуре: как верхней, так и нижней. Тем не менее, экспериментально показано, что вольфрам не является оптимальным материалом. Изготовление анода из молибдена сохранило все достоинства конструкции с вольфрамом, а кроме того, привело к заметному уменьшению напряжения электроформовки, что может обеспечить большую надежность этого процесса. Полученные результаты могут использоваться при оптимизации конструкции элемента памяти.

**Ключевые слова:** мемристор, элемент памяти, МДМ-структуры, материал электрода, электроформовка, проводящая среда, проводящая наноструктура

**DOI:** 10.31857/S0544126923700515, **EDN:** PZYPSZ

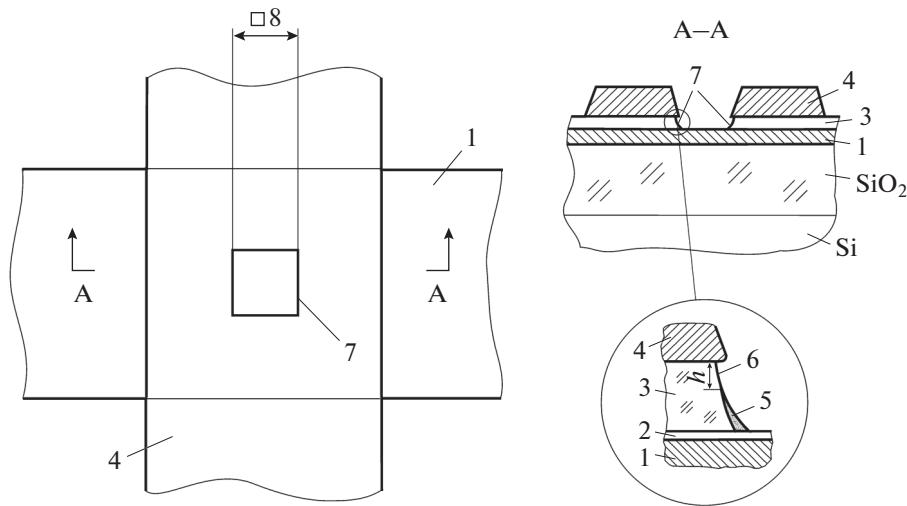
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в информационных технологиях в значительной степени зависит от успехов в развитии приборов памяти. Мемристор является одним из многообещающих кандидатов для создания универсальной энергонезависимой электрически перепрограммируемой памяти. Под мемристорным эффектом понимается переключение величины сопротивления материала, помещенного между проводящими электродами, под воздействием электрического напряжения [1]. Возникающее состояние с высокой или низкой проводимостью сохраняется неограниченно долго при отключенном питании. Мемристорный эффект наблюдается в различных материалах [2, 3]. В частности, он возможен в структурах металл–диэлектрик–металл (МДМ), в которых роль диэлектрика выполняют оксиды кремния ( $\text{SiO}_x$ ) [4–6]. Они используются в виде тонких пленок с толщиными порядка нескольких десятков нанометров. Дополнительное преимущество таких структур состоит в их согласованности со стандартной кремниевой технологией, применяемой в микроэлектронике. Если в качестве диэлектрика служит стехиометрический диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), то

необходимо наличие свободного торца пленки  $\text{SiO}_2$  [7, 8], открытого в газовую среду и расположенного между металлическими электродами (изолирующей щели). Последующее выполнение электроформовки МДМ-структур, которая состоит в приложении напряжения амплитудой около 10 В, в соответствии с определенным алгоритмом, приводит к появлению у них бистабильности. Электроформованные структуры, обладая всеми достоинствами мемристорной памяти, способны функционировать в униполярном режиме, т. е. все управляющие напряжения могут иметь одну полярность. Ограничениями для практического использования таких элементов памяти являются относительно низкие скорость и надежность процесса их электроформовки. В данной статье обсуждаются возможности увеличения этих параметров за счет выбора подходящих материалов электродов.

### 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФОРМОВКИ

Мемристоры в виде открытых “сэндвич”–МДМ-структур (рис. 1) изготавливались по тон-

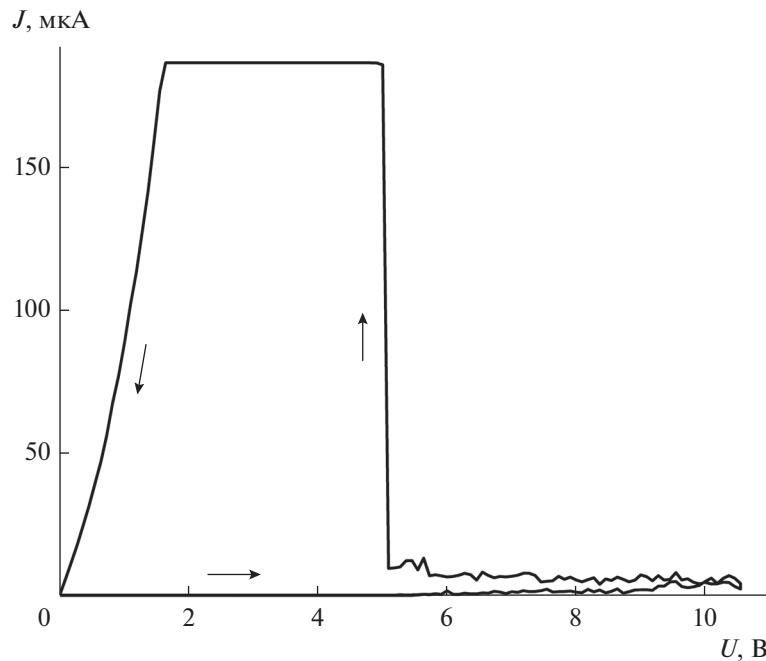


**Рис. 1.** Схематическое изображение открытой “сэндвич”-МДМ-структуры после выполнения электроформовки. 1 – нижний электрод (TiN, W); 2 – “естественный” окисел на поверхности нижнего электрода ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ); 3 – диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной около 20 нм; 4 – верхний электрод (W, TiN); 5 – проводящаяnanoструктура; 6 – изолирующий зазор с переменной шириной  $h \approx 1$  нм; 7 – изолирующая щель. Размер приведен в микрометрах.

копленочной технологии. Открытые “сэндвич”-МДМ-структуры получались из обычных “сэндвич”-МДМ-структур путем локального травления двух верхних слоев: металла (4) и тонкого диэлектрика (3). Это приводит к образованию свободного торца (7) диэлектрической пленки, открытого в газовую фазу, который выполняет функцию изолирующей щели между двумя металлическими электродами (1 и 4). Материалы верхнего и нижнего металлических электродов варьировались (использовались вольфрам, нитрид титана, молибден), толщины слоев составляли 50–120 нм. В качестве тонкого диэлектрика (3) во всех случаях применялся слой диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной около 20 нм. Структуры размещались на толстом (около 0.6 мкм) слое диоксида кремния, получаемом термическим окислением исходной кремниевой пластины, служившей подложкой. Все остальные слои осаждались методом магнетронного распыления (в вакууме, либо в атмосфере азота или кислорода). На поверхности нижнего электрода мог присутствовать “естественный” окисел (2) толщиной 1–3 нм, образующийся при экспозиции структуры в кислородной плазме перед осаждением тонкого  $\text{SiO}_2$ . Толщина “естественного” окисла зависела от температуры  $T_{\text{ox}}$  подложки. Рисунок во всех слоях формировался с помощью контактной фотолитографии и последующего жидкостного травления. Изолирующая щель в виде свободного торца 7 слоя  $\text{SiO}_2$  в плане представляла собой квадрат со стороной 8 мкм, ее ширина определялась толщиной слоя диоксида кремния. Проводящие дорожки (на рис. 1 они не показаны) к электродам открытой “сэндвич”-структуре и контактные площадки к чипу выполнялись в виде пленки алюминия толщиной около 0.6 мкм.

Кремниевая пластина скрайбировалась и разделялась на чипы, которые приклеивались и разваривались в круглые металлокстеклянные корпуса. На каждом чипе располагалось до 12 структур. Корпуса не герметизировались, что позволяло в дальнейшем размещать структуры в газовой среде вакуумной установки. Структуры хранились на воздухе под защитным слоем фоторезиста, который удалялся непосредственно перед выполнением электроформовки, игравшей роль последней технологической операции в процессе изготовления элементов памяти.

Стандартная электроформовка включала помещение структур в высокий вакуум (с остаточным давлением менее  $10^{-2}$  Па), создаваемый механическим и паромасляным насосами, и подачу на электроды структур напряжения по определенному алгоритму. Обычно подавался треугольный импульс напряжения (применялся прибор ИПП-1/2, управляемый от персонального компьютера) с амплитудой 10–12 В и скоростью изменения напряжения 1–2 В/с. Одновременно фиксировалась вольтамперная характеристика (ВАХ), что позволяло контролировать ход процесса электроформовки. Использовалось ограничение тока на уровне около 200 мА, чтобы минимизировать вероятность пробоя структуры при резком нарастании тока. Типичная кривая процесса электроформовки показана на рис. 2. Резкий скачок тока происходит на обратном ходе напряжения, демонстрируя появление N-образной ВАХ, после чего структура остается в высокопроводящем состоянии (участок вблизи вертикальной оси). Сущность процесса электроформовки состоит в образовании частиц проводящей фазы (ЧПФ) за счет деструкции материала на поверхности изолирующей щели



**Рис. 2.** Типичная ВАХ ( $U$  – напряжение между проводящими электродами, “плюс” на верхнем W электроде,  $J$  – ток через структуру) процесса электроформовки для открытой “сэндвич”-структуре TiN-SiO<sub>2</sub>-W. Параметры треугольного импульса: амплитуда 10–12 В, скорость изменения напряжения 1–2 В/с. Ограничение тока на уровне 190 мкА.

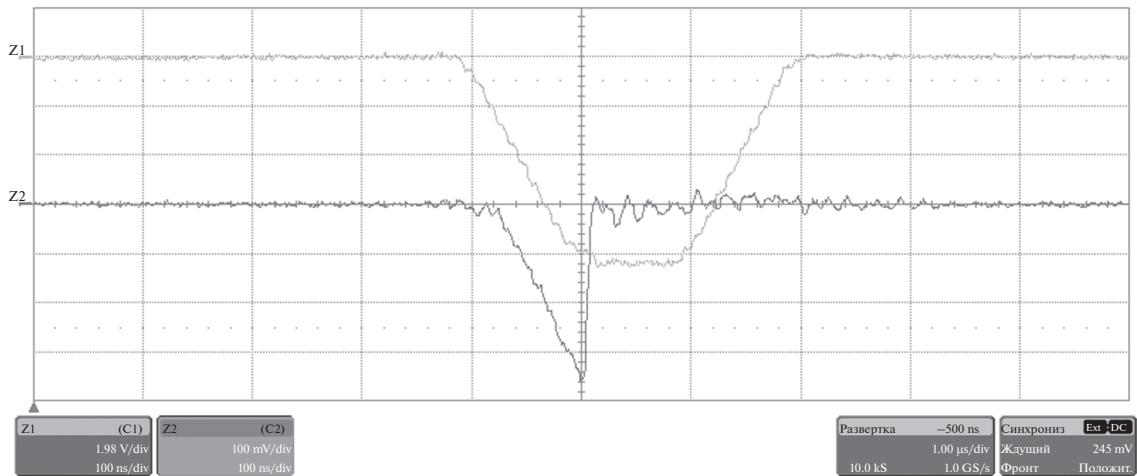
при электронном ударе, накоплении ЧПФ, образовании из них связного проводящего кластера (проводящей среды) в изолирующей щели и формировании проводящейnanoструктуры (5, рис. 1), отделенной от катода МДМ-структуры изолирующим зазором с переменной шириной  $h$  около 1 нм [8]. Величина  $h$  зависит от приложенного напряжения и определяет проводимость всей структуры. В исследуемых условиях в качестве ЧПФ служили, очевидно, частицы углеродистой проводящей среды, образующиеся из вакуумных масел [9].

Успешность электроформовки определяется двумя условиями. Во-первых, появлением N-образной ВАХ (рис. 2). Во-вторых, возникшее высокопроводящее состояние должно “отключаться” коротким (обычно около 100 нс) импульсом напряжения с амплитудой от 6 до 10 В, т.е. структура должна переходить в низкопроводящее состояние. Такие импульсы напряжения формировались генератором WW2572A, а осциллограммы фиксировались с помощью осциллографа WS423. Как видно из типичных данных рис. 3, “отключение” происходит уже на переднем фронте импульса, т.е. процесс переключения в низкопроводящее состояние является быстрым, и для него могут быть использованы импульсы еще на порядок более короткие. Если оба эти условия выполняются, то повторное “включение” структуры возможно импульсом напряжения с амплитудой, превышающей пороговое напряжение  $U_{th} \approx 3$  В образования

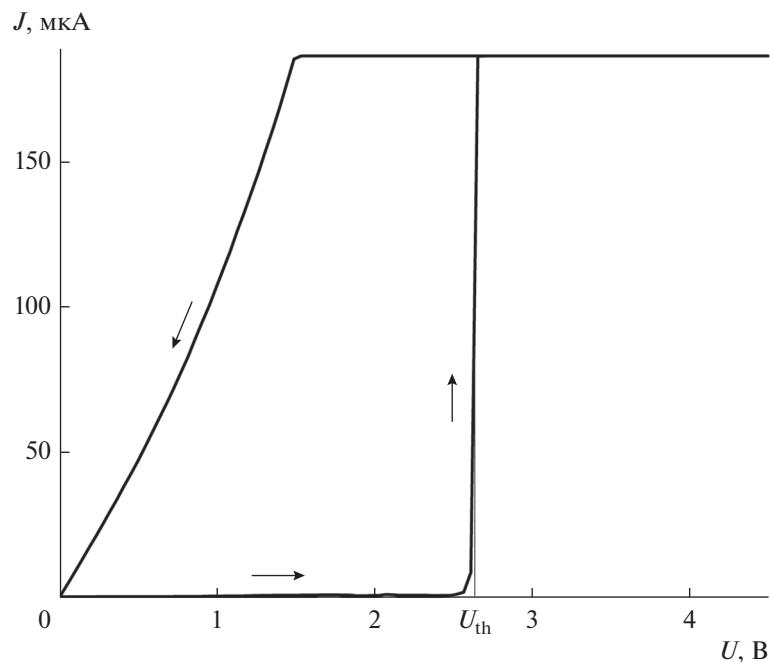
ЧПФ. Практически использовались треугольные импульсы напряжения с амплитудой 4.5–5 В с контролем ВАХ. Рис. 4 демонстрирует успешность “отключения” на предыдущем шаге и “включение” структуры при напряжении  $U_{th}$  около 3 В.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально изготавливались и исследовались ячейки памяти, которые содержали открытую “сэндвич”-структуру TiN-SiO<sub>2</sub>-W в качестве элемента памяти и кремниевый биполярный  $n-p-n$  транзистор, который обеспечивал электрическую связь ячейки в матрице. Образцы представляли собой матрицу небольшой размерности – 3 × 3 ячейки, которая позволяла продемонстрировать все функции устройства памяти [8]. Слой TiN, выполнивший функцию нижнего электрода структуры, осаждался непосредственно на  $n^+$ -слой кремния, служивший эмиттером транзистора, и находился с ним в электрическом контакте. В дальнейшем было показано, что важную роль в процессе электроформовки играет слой “естественного” оксида титана (TiO<sub>2</sub>), образующийся на верхней поверхности пленки TiN при ее экспозиции в кислородной плазме перед осаждением тонкого слоя SiO<sub>2</sub>. Толщину этого слоя можно было варьировать в диапазоне 1–3 нм за счет изменения температуры  $T_{ox}$  подложки, а его влияние становилось заметным только при толщинах больших 2 нм. Эффект состоял в том, что слой



**Рис. 3.** Типичные осциллограммы импульса напряжения (Z1) и тока (Z2) для процесса отключения после электроформовки. Одно деление: для времени – 100 нс, для напряжения – 2 В, для тока – 1 мА.



**Рис. 4.** Типичные ВАХ процесса включения. Параметры треугольного импульса напряжения: амплитуда 4.5 В, скорость изменения напряжения 2 В/с. Ограничение тока на уровне 190 мкА.

$\text{TiO}_2$ , который не удалялся в травителе для  $\text{SiO}_2$  (рис. 1), ограничивал ток через структуру, а это уменьшало вероятность развития в ней электрического пробоя в ходе электроформовки и переключений элемента памяти [11]. Поэтому фактически надо говорить о структуре  $\text{TiN}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{W}$ . Чтобы получить необходимую для хорошо выраженного эффекта толщину  $\text{TiO}_2$ , необходимо было увеличить  $T_{\text{ox}}$  с обычных 350 до 440°С.

Такая конструкция ячейки памяти (с  $n-p-n$  транзистором) позволяла использовать только одну

полярность напряжения – “минус” на верхнем вольфрамовом (W) электроде. Эксперименты с обеими полярностями были возможны для элементов памяти без транзисторной структуры (рис. 1). При этом было обнаружено, что процесс электроформовки для структур  $\text{TiN}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{W}$  при “плюсе” на верхнем W электроде протекает более стабильно. Кроме того, после электроформовки структуры демонстрируют возможность многократного прорисовывания N-образных кривых при медленном (около 1 В/с) изменении напря-

Таблица 1. Соотношения параметров процесса изготовления, электроформовки и ВАХ различных структур

№	Структура $M_{\text{bot}}\text{-D-}M_{\text{top}}$	$T_{\text{ox}}$ ( $\text{SiO}_2$ ), °C	$d$ ( $\text{SiO}_2$ ), нм	$U_{\text{br}}$ ( $\text{SiO}_2$ ), В	Параметры электроформовки				Тип ВАХ	
					полярность (верхнего электрода):				полярность:	
					+		-		+	-
					Ns/Nt	$U_F$ , В	Ns/Nt	$U_F$ , В		
1	TiN– $\text{TiO}_2$ – $\text{SiO}_2$ –W	350	26.0	23.6	12/13	10.0–17.5	2/9	10.5–16.5	A	B
2	TiN– $\text{TiO}_2$ – $\text{SiO}_2$ –W	440	22.0	21.3	28/33	9.5–12.5	7/9	10.5–12.5	A	B
3	W– $\text{SiO}_2$ –TiN	350	27.4	16.4	0/4	12.5–14.5	10/11	12.5–14.5	B	A
4	W– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN	350	27.3	18.1	2/12	10.5–14.5	15/16	10.5–14.5	B	A
5	W– $\text{SiO}_2$ –W	350	27.0	12.3	3/9	6.5–9.5	3/13	6.5–8.5	A	A
6	W– $\text{SiO}_2$ –W	350	27.7	10.9	7/10	7.5–9.5	9/14	6.5–8.5	A	A
7	TiN– $\text{SiO}_2$ –TiN	350	22.9	22.6	5/12	10.5–16.5	7/12	14.5–18.5	A 20% B 80%	A 20% B 80%
8	TiN– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN	350	24.3	21.4	8/17	8.5–16.5	8/8	8.5–10.5	A 20% B 80%	A 20% B 80%

$T_{\text{ox}}$  – температура подложки при осаждении  $\text{SiO}_2$ .  $U_{\text{br}}$  – напряжение электрического пробоя.  $U_F$  – напряжение электроформовки. Nt – общее количество исследованных структур. Ns – количество структур с успешной электроформовкой.

жения, т.е. для квазистатических ВАХ, без искусственного ограничения тока, чего не наблюдалось ранее (при “минусе” на верхнем W электроде).

В принципе, у такого эффекта возможно несколько причин. Во-первых, это может быть связано собственно с материалом электродов. Если ранее всегда катодом был W, а анодом – TiN, то теперь они поменялись местами. Во-вторых, это могло определяться формой изолирующей щели в случае изменения положения катода структур (эмиттера электронов), которая отличается для верхнего и нижнего электродов из-за наклона свободного торца после травления слоя  $\text{SiO}_2$  (рис. 1). Такая форма торца связана с изотропностью процесса травления и подтверждалась изображениями сколов образцов, полученный на растровом электронном микроскопе. В-третьих, это может иметь место в случае, если толщина “естественного” окисла на нижней поверхности пленки W ( $\text{WO}_3$ ) значительно больше, чем на поверхности TiN ( $\text{TiO}_2$ ). Тогда  $\text{WO}_3$  мог бы ограничивать ток через структуру более эффективно, чем  $\text{TiO}_2$ .

Чтобы найти действительную причину различных типов ВАХ для двух полярностей напряжения, были изготовлены образцы с различными “сэндвич”–МДМ-структурными: обычные TiN– $\text{TiO}_2$ – $\text{SiO}_2$ –W, W– $\text{SiO}_2$ –TiN, W– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN, W– $\text{SiO}_2$ –W, TiN– $\text{SiO}_2$ –TiN, TiN– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN. Основное различие между ними состояло в материалах верхнего и нижнего электродов, тонкий диэлектрик всегда оставался одним и тем же. Технологии изготовления всех структур были аналогичными, но имели некоторые второсте-

пенные отличительные детали. Например, в случае изготовления верхнего электрода из нитрида титана наличие дополнительного слоя  $\text{TiO}_2$  на его нижней границе (структуры W– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN и TiN– $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$ –TiN), моделирующего “естественный” окисел, обеспечивалось осаждением пленки титана и ее предварительного (до последующего осаждения пленки TiN) прокисления в кислородной плазме. Электроформовка во всех случаях выполнялась при обеих полярностях напряжения, после чего прорисовывались квазистатические ВАХ. Основные результаты приведены в табл. 1.

Типичные квазистатические ВАХ двух типов для электроформованных структур показаны на рис. 5. ВАХ A-типа (рис. 5a) – это относительно гладкие N-образные кривые, которые могли быть прорисованы многократно (они повторялись 10 раз и более). Положение максимума близко к пороговому напряжению образования ЧПФ  $U_{\text{max}} \approx U_{\text{th}} \approx 3$  В. Электрический пробой отсутствует без искусственного ограничения тока. Переключения элемента памяти сохраняются. Для структуры с одинаковыми (W) электродами кривые симметричны относительно начала координат. ВАХ B-типа (рис. 5b) могли быть прорисованы только единожды, поскольку сопровождались электрическим пробоем структуры, если не использовалось искусственное ограничение тока на уровне меньше 1 мА. Напряжение  $U_{\text{br}}$  пробоя тоже было близко к  $U_{\text{th}}$ , после чего переключение элемента памяти (перевод в низкопроводящее состояние) становилось невозможным.

Из данных табл. 1 может быть сделано несколько заключений. Во-первых, A-тип ВАХ на-

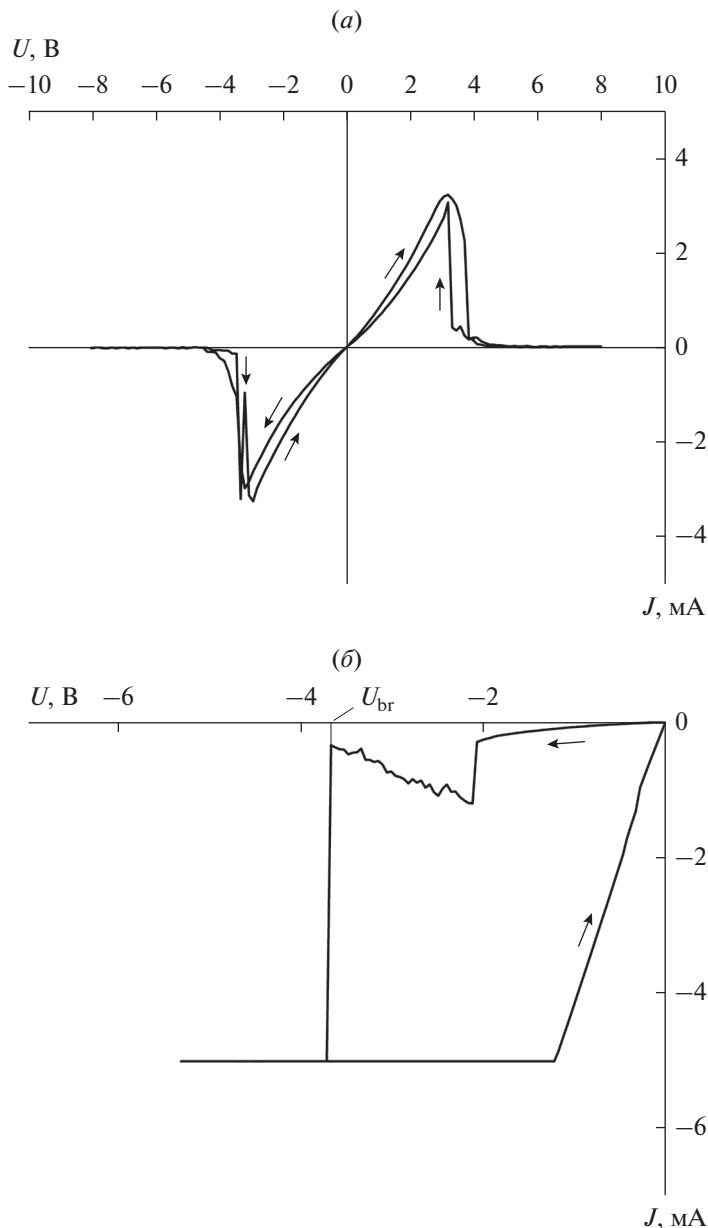
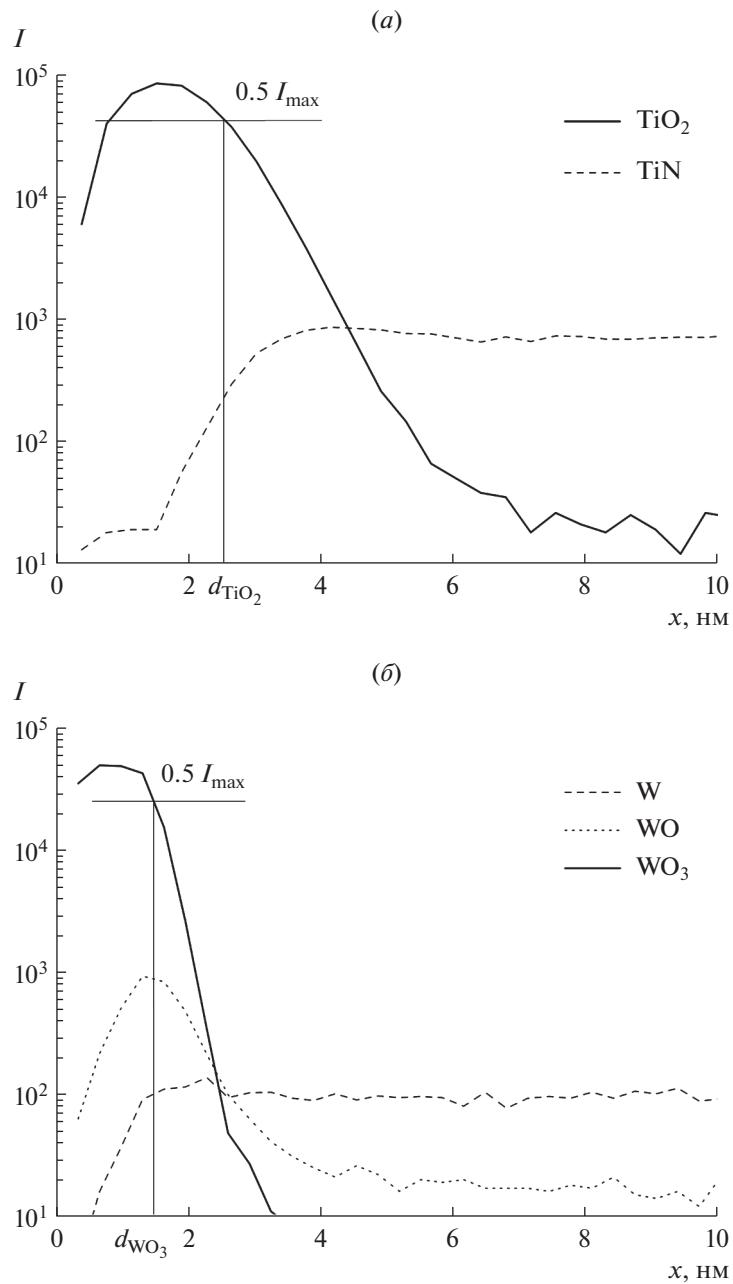


Рис. 5. Типичные ВАХ А-типа (а) и В-типа (б) после электроформовки. Структура: (а) W–SiO<sub>2</sub>–W, (б) TiN–SiO<sub>2</sub>–W (TiN–TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub>–W).

блодается, когда анод структуры изготовлен из W, при любом (верхнем или нижнем) положении этого электрода. Во-вторых, В-тип ВАХ наблюдается, когда анод структуры изготовлен из TiN, при любом (верхнем или нижнем) положении этого электрода. Это, в частности, означает, что форма изолирующей щели не влияет на тип ВАХ, что становится особенно наглядным на примере открытой “сэндвич”-структуре, оба электрода которой выполнены из W (рис. 5а), – кривые практически не отличаются (с точностью до знака) для обеих поларностей напряжения. Таким образом, основным фактором, ответственным за наличие

стабильной электроформовки и отсутствие электрического пробоя на квазистатических ВАХ (А-тип), является изготовление анода структуры из вольфрама при любом положении этого электрода. В-третьих, наличие “естественного” окисла TiO<sub>2</sub> с относительно большой толщиной на “внутренней” (обращенной к слою SiO<sub>2</sub>) поверхности пленки TiN не влияет на тип квазистатической ВАХ, как это видно из сравнения данных для строк 1 и 2, а также 3 и 4 табл. 1. Однако нельзя было исключать, что толщина “естественного” окисла на поверхности W значительно больше, чем на поверхности TiN. Это могло бы объяснить обнаруженное

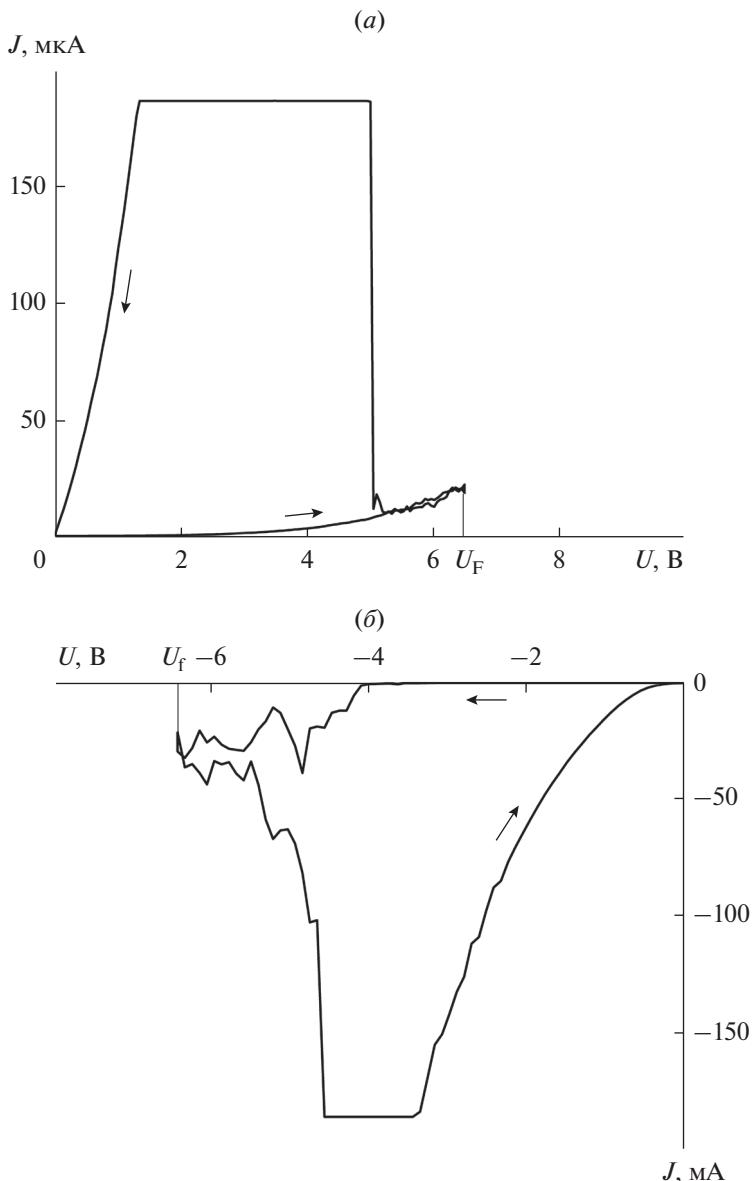


**Рис. 6.** Послойные ВИМС-профили соответствующих ионов для окисленной поверхности пленки: TiN (a) и W (б). Образцы экспонировались в кислородной плазме.  $T_{\text{ox}}$ , °C: (a) 400, (б) 350.

различие между электродами из W и TiN. В связи с этим, были выполнены специальные эксперименты по измерению толщины “естественных” окислов с использованием вторичной ионной массспектрометрии (ВИМС).

Использовался масс-спектрометр TOF.SIMS. Методика экспериментов была ранее описана в [11]. Образцы поверхностей пленок TiN–TiO<sub>2</sub> и W–WO<sub>3</sub> были приготовлены в условиях, близких к существовавшим при изготовлении открытых “сэндвич”-структур TiN–TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub>–W

и W–(WO<sub>3</sub>)–SiO<sub>2</sub>–TiN соответственно. В случае верхнего положения W электрода толщина WO<sub>3</sub> на внутренней поверхности могла быть только меньше, чем в нижнем его положении, поскольку и температура подложки при его осаждении, и экспозиция в плазме были меньше. На рис. 6 показаны профили, полученные послойным травлением, для ионов, характеризующих окисленные состояния поверхности для пленок TiN и W. Как видно, в действительности, толщина WO<sub>3</sub> ( $d_{\text{WO}_3} \approx 1.5$  нм) да-



**Рис. 7.** Типичные ВАХ процесса электроформовки для структур TiN—SiO<sub>2</sub>—Mo. Полярность напряжения на Mo электроде: (a) “плюс”, (б) “минус”.

же меньше толщины TiO<sub>2</sub> ( $d_{\text{TiO}_2} \approx 2.5$  нм). Таким образом, различие между А- и В-типами ВАХ не может быть объяснено более эффективным ограничением тока за счет более толстого слоя “естественног” окисла на поверхности W.

Однако, существует другое, не количественное, а качественное различие свойств оксидов на поверхности TiN и W. TiO<sub>2</sub> – это хороший диэлектрик, а WO<sub>3</sub> и другие оксиды вольфрама имеют относительно высокую удельную проводимость. Поэтому в структуре с W электродом последовательно проводящейnanoструктуре (рис. 1) оказывается соединенным активное сопротивление. Оно действительно может эффективно ограничи-

вать ток. В структуре с TiN электродом последовательно проводящей nanoструктуре включается конденсатор. Проводимость его диэлектрика (TiO<sub>2</sub>) определяется механизмом лавинного пробоя, который может быть причиной резкого уменьшения сопротивления диэлектрического слоя. Поэтому он не может эффективно ограничивать ток через структуру.

Даже если различие между А- и В-типами квазистатических ВАХ объясняется каким-то другим механизмом, из экспериментальных результатов ясно, что он связан исключительно с физическими (или химическими) свойствами материала анода. В связи с этим, было бы разумным опробовать

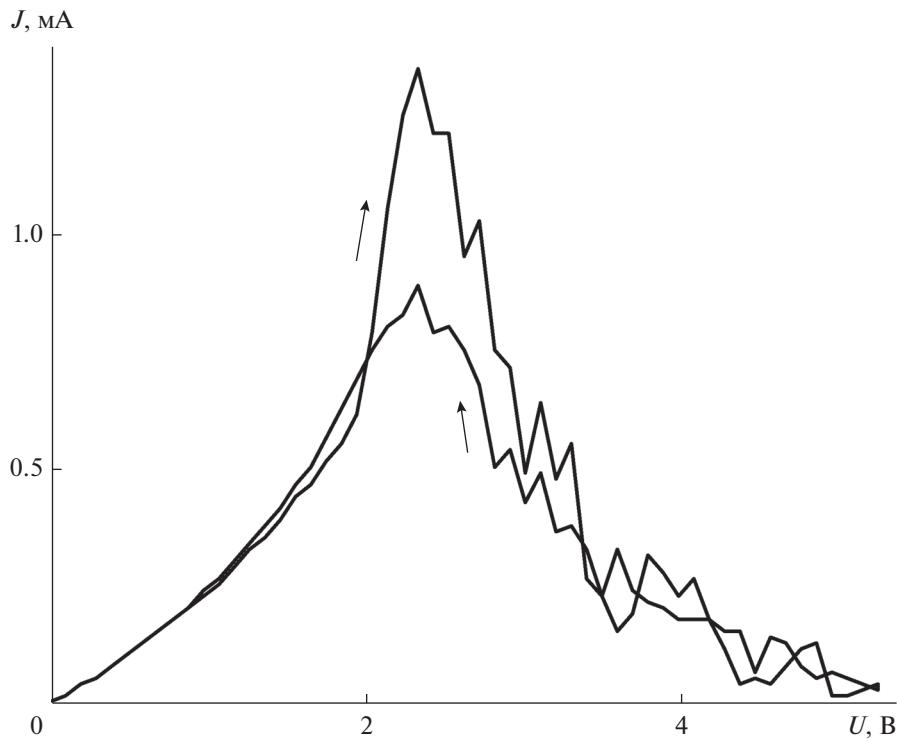


Рис. 8. Характерные ВАХ А-типа после электроформовки структур TiN–SiO<sub>2</sub>–Mo.

другие материалы для анода открытой “сэндвич”-структур. Для последующих экспериментов был выбран молибден (Mo). Существует несколько соображений, обосновывающих такой выбор. Во-первых, молибден, как и вольфрам, имеет высокую температуру плавления. Это важно для условий (высокие плотности тока) функционирования “сэндвич”-структур в таких элементах памяти. Во-вторых, молибден хорошо обрабатывается методами микротехнологии. В-третьих, молибден принадлежит той же группе в таблице Менделеева, что и вольфрам, который демонстрирует наиболее подходящий А-тип ВАХ после электроформовки.

Первые же эксперименты дали обнадеживающие результаты. На рис. 7 показаны типичные ВАХ процесса электроформовки для открытой “сэндвич”-структур TiN–SiO<sub>2</sub>–Mo при различных полярностях напряжения. Основной особенностью таких структур являлись высокие начальные токи  $J_{in}$  до электроформовки, которые были существенно больше (~1 мкА при 1 В), чем для структур TiN–SiO<sub>2</sub>–W (~1 нА при 1 В). Очевидно, в связи с этим, напряжения электроформовки  $U_F$  могли быть заметно меньше – около 7 В, как видно из рис. 7 (сравнить с данными табл. 1). Этот результат наблюдался для обеих полярностей. Рис. 8 подтверждает, что электроформовка при любой полярности напряжения тоже приводит к А-типу квазистатических ВАХ для положительной полярности, причем максимум сдвигается ближе к 2 В.

Для установления причин отмеченных отличий структур с молибденовым электродом требуются дополнительные исследования. Однако, в прикладном плане ясно, что они позволят заметно уменьшить напряжения электроформовки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования процесса электроформовки и формы ВАХ после его выполнения для открытых “сэндвич”–МДМ-структур с различными материалами электродов продемонстрировали, что для того, чтобы минимизировать вероятность электрического пробоя при электроформовке и последующем функционировании элементов памяти на основе таких структур их анод должен быть изготовлен из вольфрама. При этом, анод может занимать любое положение: верхнего или нижнего электрода. В то же время, показано, что вольфрам может не быть оптимальным материалом анода. Изготовление его из молибдена сохранило все достоинства вольфрама, а кроме того, позволило заметно уменьшить напряжения электроформовки, что делает этот процесс более надежным. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации конструкции элемента памяти.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за участие в изготавлении экспериментальных образцов Левиной Л.В., Сергушову Д.Н., Хребтюкову А.А., Якубинской А.И., а также Симакину С.Г. – за измерения ВИМС-профилей.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук Министерства образования и науки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0018 “Фундаментальные и поисковые исследования в области создания приборных структур и активных сред для хранения информации на основе элементов спинtronики и мемристорного эффекта”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abunahla H., Mohammad B.* Memristor Device Overview. In: Memristor Technology: Synthesis and Modeling for Sensing and Security Applications. Analog Circuits and Signal Processing. Cham: Springer. 2018. 106 p.
2. *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. 3453–1–13.
3. *Ielmini D.* Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling // Semicond. Sci. Technol. 2016. V. 31. P. 063002–1–25.
4. *Mehonic A., Shluger A.L., Gao D., Valov I., Miranda E., Ielmini D., Bricalli A., Ambrosi E., Li C., Yang J.J., Xia Q., Kenyon A.J.* Silicon Oxide (SiO<sub>x</sub>): A Promising Material for Resistance Switching? // Adv. Mater. 2018. P. 1801187–1–21.
5. *Tихов С.В., Горшков О.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П., Королев Д.С., Белов А.И., Михайлов А.Н., Тетельбаум Д.И.* Изменение иммитанса при электроформовке и резистивном переключении в мемристивных структурах “металл–диэлектрик–металл” на основе SiO<sub>x</sub>// ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 107–111.
6. *Захаров П.С., Итальянцев А.Г.* Эффект переключения электрической проводимости в структурах металл–диэлектрик–металл на основе нестехиометрического оксида кремния // Труды МФТИ. 2015. Т. 7. № 2. С. 113–118.
7. *Мординцев В.М., Кудрявцев С.Е., Левин В.Л.* Электроформовка как процесс самоформирования проводящих наноструктур для элементов энергонезависимой электрически перепрограммируемой памяти // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 1–2. С. 174–182.
8. *Мординцев В.М., Кудрявцев С.Е., Левин В.Л.* Высокостабильная энергонезависимая электрически перепрограммируемая память на самоформирующихся проводящих наноструктурах // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 1–2. С. 183–191.
9. *Mordvintsev V.M., Gorlachev E.S., Kudryavtsev S.E.* A mechanism for the formation of a conducting medium in memristors based on electroformed open sandwich MDM structures // Russian Microelectronics. 2022. V. 51. № 4. P. 255–263.
10. *Mordvintsev V.M., Kudryavtsev S.E.* Effect of constructional features of the insulating gap of open TiN–SiO<sub>2</sub>–W and Si–SiO<sub>2</sub>–W “sandwich” structures on the process of their electroforming // Russian Microelectronics. 2017. V. 46. № 4. P. 243–251.
11. *Mordvintsev V.M., Naumov V.V., Simakin S.G.* Secondary Ion Mass Spectrometry Study of the Formation of a Nanometer Oxide Film on a Titanium Nitride Surface // Russian Microelectronics. 2016. V. 45. № 4. P. 242–255.