Андрей Николаевич БОБЫЛЕВ[1]
Сергей Юрьевич УДОВИЧЕНКО[2]
Александр Николаевич БУСЫГИН[3]
Абдулла Хайдар Абдо ИБРАГИМ[4]

УДК 537.312.7; 621.382; 004.335

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИАПАЗОНА РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕМРИСТОРА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ БОЛЬШЕГО ЧИСЛА СИНАПТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В НЕЙРОПРОЦЕССОРЕ[*]

[1] аспирант кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт,
заведующий лабораторией НОЦ «Нанотехнологии»,
Тюменский государственный университет
andreaubobylev@gmail.com

[2] профессор кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт, руководитель НОЦ «Нанотехнологии»,
Тюменский государственный университет
udotgu@mail.ru

[3] аспирант кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт, лаборант-исследователь НОЦ «Нанотехнологии»,
Тюменский государственный университет
a.n.busygin@utmn.ru

[4] аспирант кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
abdulla.ybragim@mail.ru

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 19-07-00272.

Цитирование: Бобылев А. Н. Увеличение диапазона резистивного переключения мемристора для реализации большего числа синаптических состояний в нейропроцессоре / А. Н. Бобылев, С. Ю. Удовиченко, А. Н. Бусыгин, А. Х. Ибрагим // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 124-136.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-124-136

Аннотация

В переспективном устройстве наноэлектроники — мемристоре на основе оксидов металлов между предельными высокопроводящим и низкопроводящим состояниями имеется множество промежуточных состояний с разной проводимостью. Эти состояния можно использовать в процессах ассоциативного обучения нейросети на основе мемристорных синапсов и одновременной обработки входных импульсов, заключающейся в их взвешивании и суммировании в нейропроцессоре.

Получены тонкие пленки смешанных оксидов, содержащие разное отношение мольных долей титана и алюминия, путем одновременного магнетронного распыления двух катодов в реактивной среде кислорода. Описан метод получения смешанного оксида с заданным содержанием металлов путем контроля скоростей распыления катодов с помощью акустических пьезодатчиков. Показано, что внесение примеси Al в оксид титана улучшает электрофизические характеристики мемристора. Установлено существование оптимальной мольной доли примеси Al, при которой достигается максимальное отношение сопротивлений мемристора в высокоомном и низкоомном состояниях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реактивное магнетронное осаждение смешанного оксида металлов путем одновременного распыления двух катодов приводит к более равномерному распределению элементов по толщине активного слоя по сравнению с методом атомно-слоевого осаждения, что необходимо для повышения стабильности электрических характеристик мемристора.

Можно ожидать, что в мемристорах на смешанных оксидах $Ti_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xY_{1-x}O_y$, $Hf_xLu_{1-x}O_y$, $Zr_xSc_{1-x}O_y$, $Zr_xY_{1-x}O_y$, $Zr_xLu_{1-x}O_y$ также будет наблюдаться оптимальная доля примеси, соответствующая максимально повышенному отношению сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях. Причем мемристоры на пленках с чистыми оксидами гафния и циркония имеют значительно больший диапазон резестивного переключения, чем оксид титана.

Ключевые слова

Нейропроцессор, энергонезависимая резистивная память, резистивные переключения, синаптические состояния, нанотехнология, мемристор, смешанные оксиды металлов.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-124-136

Введение

В настоящее время интенсивно изучается структура «металл — диэлектрик — металл» как основа устройств энергонезависимой резистивной памяти. Преимущественно в качестве диэлектрика используют оксиды переходных металлов, обладающих высокой подвижностью кислородных вакансий [15].

Твердотельные мемристоры, которые используются в информационных технологиях (IT) в качестве переключателей, имеют малое время переключения из низкопроводящего в высокопроводящее состояние и наоборот. Устройства IT на основе таких мемристоров обеспечивают обработку, сжатие, фильтрацию и передачу информации за предельно короткое время. Время переключения современных мемристоров составляет единицы наносекунд.

Технически это достигается электрической формовкой мемристора при подаче на его электроды напряжения, которое значительно превышает пороговое, необходимое для переключения состояний. В результате диэлектрическая пленка из диоксида титана TiO_2 из-за миграции ионов кислорода обедняется практически во всем своем объеме, за исключением тонкого приэлектродного слоя толщиной несколько нанометров. Обедненный кислородом слой нестехиометрического оксида титана TiO_{2-x} обладает сопротивлением порядка 215 Ом и, по существу, является проводником [14]. Проводимость мемристора в низкоомном состоянии определяется одномерным проводящим каналом (филаментом), который возникает в процессе электроформовки [8, 15].

В [3, 6, 7] начата работа над мемристорной аппаратной базой, предназначенной для создания биоморфных электронных систем и нейропроцессоров. Показаны подобие свойств твердотельного мемристора свойствам живых синапсов и возможность использования мемристора как суммирующего элемента искусственного нейрона [7]. Использование мемристоров в качестве синапсов может обеспечить значительное сокращение в электрической схеме нейропроцессора IBM TrueNorth [12] числа транзисторов, которые выполняют функции нейронов и синаптических связей между ними.

В мемристоре между предельными высокопроводящим и низкопроводящим состояниями имеется множество промежуточных состояний с разной проводимостью. Эти состояния можно использовать в процессах ассоциативного обучения нейросети на основе мемристорных синапсов и одновременной обработки входных импульсов, заключающейся в их взвешивании и суммировании в нейропроцессоре [4]. Время протекания этих процессов может значительно превосходить время переключения (порядка нескольких наносекунд [10]) формованного мемристора, используемого в качестве переключателя в информационных технологиях.

Чем шире диапазон резистивного переключения мемристора, тем больше можно реализовать синаптических связей с помощью этого мемристора в нейропроцессоре. Например, в мемристоре на основе пленки диоксида титана TiO_2 толщиной 30 нм и с платиновыми электродами [9] отношение сопротивлений в высокоомном (R_h) и низкоомном (R_l) состояниях при напряжении считывания 0,2 В имеет величину $R = R_h/R_l \approx 2$. Чистый оксид циркония в структуре $Ti/ZrO_2/Pt$ дает $R = 10^4$, а гафния в $Pt/HfO_2/HfO_{2-x}/TiN$ — 10^3 соответственно [11].

Наиболее стабильными и воспроизводимыми характеристиками обладают мемристорные материалы на основе смешанных оксидов переходных металлов. В таких материалах возможно добиться увеличения диапазона переключения сопротивлений мемристоров по сравнению с мемристорами на чистых оксидах. При добавлении примеси атомов алюминия в оксиды четырехвалентных переходных металлов ($Ti_xAl_{1-x}O_y$ [5], $Hf_xAl_{1-x}O_y$ [13]) энергия связи ионов кислорода и основного металла уменьшается, что приводит к активизации процесса обеднения слоя ионами кислорода за счет их миграции в электрическом поле. Снижение энергии связи кислорода приводит к уменьшению порогового напряжения переключения. Также в смешанных оксидах при циклических переключениях наблюдается повышенная стабильность значений пороговых напряжений и сопротивлений в низкопроводящем/высокопроводящем состояниях.

При получении пленки смешанного оксида металлов с помощью метода атомно-слоевого осаждения в ней остаются примеси реагентов. Примеси и неоднородное распределение элементов по толщине пленки увеличивают неоднородность электрического поля, что приводит к нестабильности электрических характеристик устройства [7].

В отличие от метода атомно-слоевого осаждения [5, 13] метод реактивного магнетронного осаждения смешанного оксида металлов дает возможность исключить примеси и получить высокую равномерность распределения элементов по толщине пленки, что приводит к большей стабильности порогового напряжения переключения мемристора и его сопротивлений в низкопроводящем и высокопроводящем состояниях [7].

Нанотехнология изготовления мемристорных устройств на основе пленок смешанных оксидов металлов

Напыление эталонной пленки диоксида титана TiO_2 толщиной 30 нм проводилось в магнетронном модуле на постоянном токе, входящем в нанотехнологический комплекс NT-MDT «НаноФаб-100». Электромагнитные клапаны на газовых магистралях установки позволяют регулировать расход газов с точностью до 0,1 см^3/мин. Диаметр распыляемой мишени — 78 мм. Вакуумная подготовка реакторной камеры осуществлялась при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Напыление осуществлялось в импульсном режиме магнетрона при постоянной мощности 125 Вт и постоянном давлении 0,25 Па. Расход аргона для поддержания рабочего давления составлял 22 см^3/мин, расход кислорода составлял 8 см^3/мин.

Мемристоры изготовлены по технологии кроссбара (рис. 1) путем последовательного напыления слоев через маски электронного резиста (PMMA), выполненные на электронном микроскопе JSM-6510LV-EDS. Нижний электрод состоит из 5 нм адгезивного подслоя Ti и 30 нм слоя W. Активный слой — 30 нм TiO_2, $Ti_{0,93}Al_{0,07}O_x$, $Ti_{0,9}Al_{0,1}O_x$ и $Ti_{0,85}Al_{0,15}O_x$ в четырех экспериментах соответственно. Верхний электрод — 95 нм TiN. Ширина проводящих дорожек в месте пересечения составляет 1 мкм.

На рис. 2 представлены фотографии чипов мемристорных кроссбаров, в которых пленка смешанного оксида имеет разную долю алюминия.

Метод получения смешанного оксида с контролируемым содержанием металлов

При распылении в магнетронном модуле одновременно с титаном второго катода из алюминия необходимо контролировать количественный состав выращиваемого слоя смешанного оксида металлов. Для этого были проведены представленные ниже расчеты, результаты которых согласуются с экспериментальными данными.

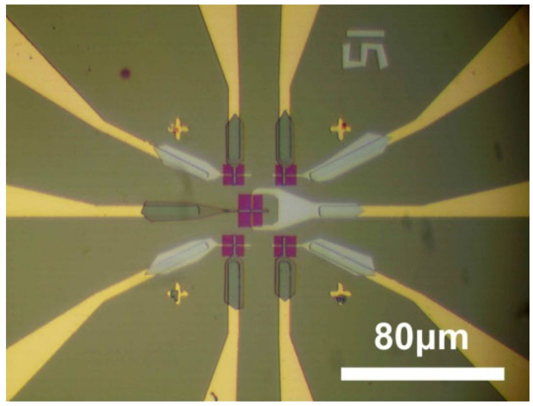

Рис. 1. Фотография с оптического микроскопа экспериментального образца мемристорного кроссбара, демонстрирующая совмещение микроразмерных и наноразмерных проводников

Fig. 1. An optical microscope image of the experimental sample of the memristor crossbar demonstrating the combination of micro-sized and nano-sized conductors

Рис. 2. Образцы мемристорных кроссбаров на основе пленки оксида титана

Примечание: цвет пленки зависит от доли примеси алюминия в оксиде.

Fig. 2. Samples of memristor crossbars based on titanium oxide film

Note: the color of the film depends on the aluminum fraction of the oxide.

Количественный состав пленки при постоянной скорости напыления должен оставаться однородным по толщине. Возле каждого катода в магнетроне имеется акустический датчик скорости напыления. Толщина напыленного на датчик слоя металла определяется выражением $d = m/\rho S$, где m — масса напыляемого вещества, ρ — его плотность, а S — площадь датчика. Отношение скоростей напыления при одновременном распылении двух катодов с постоянными скоростями равно отношению толщины пленок, осаждаемых на датчиках с одинаковой площадью: $d_1/d_2 = m_1\rho_2/m_2\rho_1$. Молекула стехиометрического оксида алюминия Al_2O_3 содержит два атома алюминия, молекула оксида титана в максимальной степени окисления (полностью оксидный режим реактивного распыления) TiO_2 содержит один атом титана. Следовательно, отношения количества вещества оксидов и их металлов отличаются в два раза: $\nu_{Ti}/\nu_{Al} = 2\nu_{TiO_2}/\nu_{Al_2O_3} = 2\nu_1/\nu_2$. Представляя массу как произведение количества вещества, молярной массы M и постоянной Авогадро, получим для отношения толщины пленок на датчиках и, соответственно, для отношения скоростей распыления катодов следующее выражение:

$$D = \frac{d_1}{d_2} = 2\frac{\nu_1}{\nu_2}\frac{M_1}{M_2}\frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Отношения скоростей напыления составили D (7 ат. % Al) = 19,4; D (10 ат. % Al) = 13,1; D (15 ат. % Al) = 8,28. Тестирование этой расчетной модели скорости распыления катодов проводилось при получении составов в образцах 1-3: $Ti_{0,9}Zr_{0,1}O_2$, $Ti_{0,8}Zr_{0,2}O_2$ и $Ti_{0,7}Zr_{0,3}O_2$ соответственно, для которых использовалось соотношение $\nu_{Ti}/\nu_{Al} = \nu_{TiO_2}/\nu_{ZrO_2} = \nu_1/\nu_2$. Полученные пленки исследовались на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре (РФЭС) Thermo Fisher Scientific — K-Alpha (таблица 1).

Таблица 1 *Table 1*

Результаты измерений РФЭС **Results of measurement XPS**

Образец	1	2	3
ν_{Ti}/ν_{Zr} расчетное	90/10	80/20	70/30
ν_{Ti}/ν_{Zr} измеренное	84,07/15,93	79,89/20,11	75,51/24,49

Таким образом, предложенный метод определения скорости распыления катодов позволял достаточно точно контролировать количественный состав выращиваемого слоя смешанного оксида металлов.

Результаты исследования распределения мольной доли металлов по толщине пленки оксида титана с примесью циркония методом РФЭС представлены на рис. 3.

Эти результаты свидетельствуют о том, что метод реактивного магнетронного осаждения смешанного оксида металлов путем одновременного распыления двух катодов дает возможность получить более равномерное распределение элементов по толщине пленки активного слоя по сравнению с методом атомно-слоевого осаждения [1], что требуется для повышения стабильности электрических характеристик мемристора.

Обсуждение результатов экспериментов

На рис. 4 красным цветом показана вольт-амперная характеристика мемристорного устройства на основе слоя из диоксида титана. Отношение сопротивлений в высокоомном (R_h) и низкоомном (R_l) состояниях при напряжении считывания 0,2 В имеет величину $R = R_h/R_l \approx 1,3$. Для сравнения: в [9] это отношение

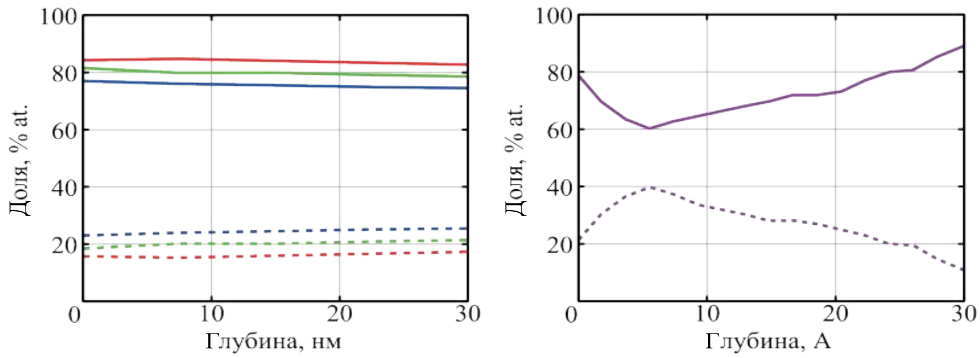

Рис. 3. Распределение мольных долей по толщине пленки

Примечания: слева — Ti и Zr (красный цвет — образец 1, зеленый — образец 2, синий — образец 3; сплошной кривой показано содержание титана, а штриховой кривой — примеси); справа — Ti и Al в работе [1] (сплошная кривая — Al).

Fig. 3. The distribution of the molar fractions across the film thickness

Notes: left — Ti and Zr (red is sample 1, green is sample 2, blue is sample 3; the solid curve shows the titanium fraction, and the dashed curve shows impurity fraction); right — Ti and Al in the paper [1] (the solid curve shows the Al fraction).

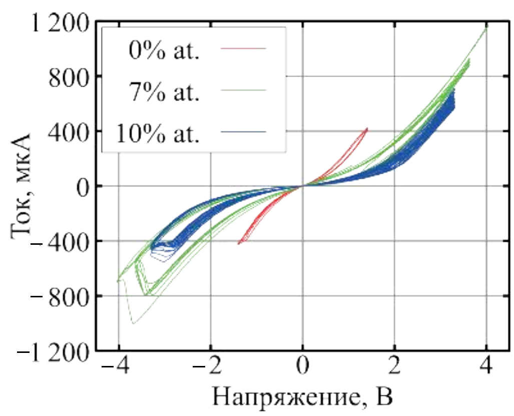

Рис. 4. Вольт-амперные зависимости мемристорного устройства на основе слоя из оксида титана

Примечания: красный цвет — в чистом оксиде титана; зеленый — при 7 ат. % примеси Al; синий — при 10 ат. % примеси Al.

Fig. 4. The current-voltage dependence of the memristor device based on a layer of titanium oxide

Notes: red — in pure titanium oxide; green — at 7 at. % admixture Al; blue — at 10 at. % admixture Al.

в мемристоре со слоем диоксида титана толщиной 30 нм и платиновыми электродами равняется 2. Это напряжение выбрано в линейной области вольт-амперной характеристики, которое используется при работе мемристоров в аналоговом режиме.

Зеленым цветом на рис. 4 показана вольт-амперная зависимость в мемристоре с активным слоем $Ti_{0,93}Al_{0,07}O_x$. Внесение примеси Al в TiO_2 на уровне 7 ат. % увеличивает R с 1,3 до 7,2. Дальнейшее увеличение доли примеси Al не приводит к росту отношения R. Максимальное отношение сопротивлений R в мемристоре с активным слоем $Ti_{0,9}Al_{0,1}O_x$ при напряжении считывания 0,2 В равно 3,78, с активным слоем $Ti_{0,85}Al_{0,15}O_x$ — 2,41 соответственно. Синим цветом на рис. 4 показана вольт-амперная характеристика при 10 ат. % содержания примеси Al.

Результаты экспериментов (рис. 5) свидетельствуют о наличии оптимальной доли примеси алюминия в оксиде титана на уровне 7 ат. %, при которой наблюдается максимальное отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях.

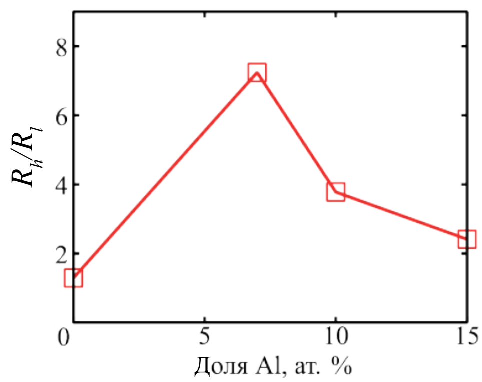

Рис. 5. Зависимость отношения сопротивлений в низкопроводящем (R_h) и высокопроводящем (R_l) состояниях при напряжении считывания 0,2 В от доли примеси Al

Fig. 5. The dependence of resistances ratio in low conductive (R_h) and highly conductive (R_l) states if the voltage reading from 0.2 V on the admixture proportion Al

Заключение

Получены тонкие пленки смешанных оксидов, содержащие разное отношение мольных долей титана и алюминия путем одновременного магнетронного распыления двух катодов в реактивной среде кислорода. Контроль содержания металлов осуществлялся регулированием скоростей распыления катодов с помощью акустических пьезодатчиков. Результаты измерений вольт-амперных характеристик свидетельствуют, что внесение примеси Al в оксид титана улучшает электрофизические характеристики мемристора, причем существует оптимальная мольная доля примеси Al, при которой достигается максимальное отношение сопротивлений мемристора в высокоомном и низкоомном состояниях. Полученный методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии элементный состав пленки смешанного оксида металлов показывает, что метод реактивного магнетронного осаждения обеспечивает равномерное распределение элементов по толщине пленки активного слоя в отличие от метода атомно-слоевого осаждения, что приводит к увеличению повторяемости вольт-амперных характеристик при множественных последовательных измерениях.

В активном слое мемристоров — смешанном оксиде металлов одним из элементов может быть титан, цирконий или гафний, а элементом примеси — трехвалентный металл с ионным радиусом, равным 0,7-1,2 ионного радиуса титана, циркония или гафния соответственно [2]. Можно ожидать, что в мемристорах на смешанных оксидах $Ti_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xY_{1-x}O_y$, $Hf_xLu_{1-x}O_y$, $Zr_xSc_{1-x}O_y$, $Zr_xY_{1-x}O_y$, $Zr_xLu_{1-x}O_y$ также будет наблюдаться оптимальная доля примеси, соответствующая максимально повышенному отношению сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях. Причем в мемристорах на чистых оксидах циркония и гафния диапазон резистивного переключения значительно выше, чем в мемристоре на основе чистого оксида титана [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкова С. А. Исследование структуры и свойств двух и трехкомпонентных оксидов $Ti_xAl_{1-x}O_y$, сформированных методом атомарно-слоевого осаждения: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук / С. А. Гудкова. Долгопрудный: Московский физико-технический институт, 2011. 20 с.
2. Мемристор на основе смешанного оксида металлов: пат. 2472254 Рос. Федерация / А. П. Алехин, А. С. Батурин, И. П. Григал, С. А. Гудкова, А. М. Маркеев, А. А. Чуприк; патентообладатель Московский физико-технический институт. № 2011146089/07; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.01.2013.
3. Писарев А. Д. Комбинированный мемристорно-диодный кроссбар как основа запоминающего устройства / А. Д. Писарев, А. Н. Бусыгин, А. Н. Бобылев, С. Ю. Удовиченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 142-149. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149
4. Писарев А. Д. SPICE-моделирование процессов ассоциативного самообучения и безусловного разобучения в логическом блоке нейропроцессора / А. Д. Писарев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 3. С. 132-145. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-132-145
5. Alekhin A. P. Structural and electrical properties of $Ti_xAl_{1-x}O_y$ thin films grown by atomic layer deposition / A. P. Alekhin, A. A. Chouprik, S. A. Gudkova, A. M. Markeev // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2011. Vol. 29. 01A302. DOI: 10.1116/1.3533763
6. Bobylev A. N. Neuromorphic coprocessor prototype based on mixed metal oxide memristors / A. N. Bobylev, A. N. Busygin, A. D. Pisarev, S. Yu. Udovichenko, V. A. Filippov // International Journal of Nanotechnology. 2017. Vol. 14. № 7/8. Pp. 698-704. DOI: 10.1504/IJNT.2017.083444

7. Bobylev A. N. The electrical properties of memristor devices $TiN/Ti_xAl_{1-x}O_y/TiN$ produced by magnetron sputtering / A. N. Bobylev, S. Yu. Udovichenko // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. № 6. Pp. 396-401. DOI: 10.1134/S1063739716060020
8. Fujiwara K. Resistance switching and formation of a conductive bridge in metal/binary oxide/metal structure for memory devices / K. Fujiwara, T. Nemoto, M. J. Rozenberg, Y. Nakamura, H. Takagi // Japanese Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 47. Pp. 6266-6271. DOI: 10.1143/JJAP.47.6266
9. Gao L. Correlation between diode polarization and resistive switching polarity in $Pt/TiO_2/Pt$ memristive device / L. Gao, B. Hoskins, D. Strukov // Physica Status Solidi (RRL) — Rapid Research Letters. 2016. Vol. 10. № 5. Pp. 426-430. DOI: 10.1002/pssr.201600044
10. Govoreanu B. Vacancy-modulated conductive oxide resistive RAM (VMCO-RRAM): an area-scalable switching current, self-compliant, highly nonlinear and wide on/off-window resistive switching cell / B. Govoreanu, A. Redolfi, L. Zhang, C. Adelmann, M. Popovici, S. Clima, H. Hody, V. Paraschiv, I. P. Radu, A. Franquet, J.-C. Liu, J. Swerts, O. Richard, H. Bender, L. Altimime, M. Jurczak // 2013 IEEE International Electron Devices Meeting. 2013. Pp. 10.2.1-10.2.4. DOI: 10.1109/IEDM.2013.6724599
11. Hadiyawarman. Recent progress on fabrication of memristor and transistor-based neuromorphic devices for high signal processing speed with low power consumption / Hadiyawarman, F. Budiman, D. G. O. Hernowo, R. R. Pandey, H. Tanaka // Japanese Journal of Applied Physics. 2018. Vol. 52. № 3S2. 03EA06. DOI: 10.7567/JJAP.57.03EA06
12. Merolla P. A. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface / P. A. Merolla, J. V. Arthur, R. Alvarez-Icaza, A. S. Cassidy, J. Sawada, F. Akopyan, B. L. Jackson, N. Imam, C. Guo, Y. Nakamura, B. Brezzo, I. Vo, S. K. Esser, R. Appuswamy, B. Taba, A. Amir, M. D. Flickner, W. P. Risk, R. Manohar, D. S. Modha // Science. 2014. Vol. 345. № 6197. Pp. 668-672. DOI: 10.1126/science.1254642
13. Peng C.-S. Improvement of resistive switching stability of HfO_2 films with Al doping by atomic layer deposition / C.-S. Peng, W.-Y. Chang, Y.-H. Lee, M.-H. Lin, F. Chen, M.-J. Tsai // Electrochemical and Solid-State Letters. 2012. Vol. 15. № 4. H88-H90. DOI: 10.1149/2.011204esl
14. Pickett M. D. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices / M. D. Pickett, D. B. Strukov, J. L. Borghetti, J. J. Yang, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 106. 074508. DOI: 10.1063/1.3236506
15. Waser R. Nanoionics-based resistive switching memories / R. Waser, M. Aono // Nature Mater. 2007. Vol. 6. № 11. Pp. 833-840. DOI: 10.1038/nmat2023

Andrey N. BOBYLEV[1]
Sergey Yu. UDOVICHENKO[2]
Alexander N. BUSYGIN[3]
Abdulla H. EBRAHIM[4]

UDC 537.312.7; 621.382; 004.335

INCREASE OF SWITCHING RANGE OF RESISTIVE MEMRISTOR FOR REALIZATION OF A GREATER NUMBER OF SYNAPTIC STATES IN A NEUROPROCESSOR*

[1] Postgraduate Student,
Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
andreaubobylev@gmail.com

[2] Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Professor of Department of Applied and Technical Physics;
Head of REC "Nanotechnology",
University of Tyumen
udotgu@mail.ru

[3] Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
a.n.busygin@utmn.ru

[4] Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
abdulla.ybragim@mail.ru

* The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the project No 19-07-00272.

Citation: Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu., Busygin A. N., Ebrahim A. H. 2019. "Increase of switching range of resistive memristor for realization of a greater number of synaptic states in a neuroprocessor". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 124-136.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-124-136

Abstract

In a promising nanoelectronic device — a memristor based on metal oxides, there are many intermediate states with different conductivity between the high- and low-conducting states. These states can be used in the processes of associative learning of a neural network based on memristor synapses and simultaneous input pulses processing, which consists of pulses weighing and summation in a neuroprocessor.

Using the method of simultaneous magnetron sputtering of two cathodes in a reactive oxygen environment, the authors obtained thin films of mixed oxides with a different mole fraction of titanium and aluminum. In addition, this article describes the method of obtaining a mixed oxide with a specified metals fraction by controlling the sputtering rates of cathodes using acoustic piezoelectric sensors.

The results show that the addition of Al into titanium oxide improves the electrophysical characteristics of the memristor. The authors proved the existence of an optimal mole fraction of Al impurity, at which the maximum ratio of the resistances of the memristor in the high-resistance and low-resistance states. The results indicate that the method of reactive magnetron deposition of mixed metal oxide by simultaneous sputtering of two cathodes provides a more uniform distribution of elements across the thickness of the active layer compared with the atomic layer deposition method. That increase of uniformity is necessary to improve the stability of the memristor.

It can be expected that in the memristors on the mixed oxides $Ti_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xSc_{1-x}O_y$, $Hf_xY_{1-x}O_y$, $Hf_xLu_{1-x}O_y$, $Zr_xSc_{1-x}O_y$, $Zr_xY_{1-x}O_y$, $Zr_xLu_{1-x}O_y$, an optimal impurity fraction corresponding to the high and low resistances ratio maximum will be observed. Moreover, memristors on pure films of pure hafnium and zirconium oxides have a much larger range of resistive switching than titanium oxide.

Keywords

Neuroprocessor, non-volatile resistive memory, resistance switching, synaptic states, nanotechnology, memristor, mixed metal oxides.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-124-136

REFERENCES

1. Gudkova S. A. 2011. “Investigation of the structure and properties of two and three-component oxides $Ti_xAl_{1-x}O_y$ formed by the method of atomic layer deposition”. Cand. Sci. (Phys.-Math.) diss. abstract. Dolgoprudniy: Moscow Institute of Physics and Technology. [In Russian]
2. Alekhin A. P., Baturin A. S., Grigal I. P., Gudkova S. A., Markeev A. M., Chouprik A. A. 2013. “A memristor based on mixed metals oxide”. RF patent No 2472254. Patent holder: MIPT, publ. 10 January. [In Russian]
3. Pisarev A. D., Busygin A. N., Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. 2017. “Composite memristor-diode crossbar as a memory storage base”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 4, pp. 142-149. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149 [In Russian]

4. Pisarev A. D. 2018. “SPICE-modeling of the processes of associative self learning and unconditional discrimination in the logic unit of a neuroprocessor”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 3, pp. 132-145. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-132-145 [In Russian]
5. Alekhin A. P., Chouprik A. A., Gudkova S. A., Markeev A. M. 2011. “Structural and electrical properties of $Ti_xAl_{1-x}O_y$ thin films grown by atomic layer deposition”. Journal of Vacuum Science and Technology B, vol. 29, 01A302. DOI: 10.1116/1.3533763
6. Bobylev A. N., Busygin A. N., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu., Filippov V. A. 2017. “Neuromorphic coprocessor prototype based on mixed metal oxide memristors”. International Journal of Nanotechnology, vol. 14, no 7/8, pp. 698-704. DOI: 10.1504/IJNT.2017.083444
7. Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. 2016. “The electrical properties of memristor devices $TiN/Ti_xAl_{1-x}O_y/TiN$ produced by magnetron sputtering”. Russian Microelectronics, vol. 45, no 6, pp. 396-401. DOI: 10.1134/S1063739716060020
8. Fujiwara K., Nemoto T., Rozenberg M. J., Nakamura Y., Takagi H. 2008. “Resistance switching and formation of a conductive bridge in metal/binary oxide/metal structure for memory devices”. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, pp. 6266-6271. DOI: 10.1143/JJAP.47.6266
9. Gao L., Hoskins B., Strukov D. 2016. “Correlation between diode polarization and resistive switching polarity in $Pt/TiO_2/Pt$ memristive device”. Physica Status Solidi (RRL) — Rapid Research Letters, vol. 10, no 5, pp. 426-430. DOI: 10.1002/pssr.201600044
10. Govoreanu B., Redolfi A., Zhang L., Adelmann C., Popovici M., Clima S., Hody H., Paraschiv V., Radu I. P., Franquet A., Liu J.-C., Swerts J., Richard O., Bender H., Altimime L., Jurczak M. 2013. “Vacancy-modulated conductive oxide resistive ram (vmco-rram): an area-scalable switching current, self-compliant, highly nonlinear and wide on/off-window resistive switching cell”. 2013 IEEE International Electron Devices Meeting, pp. 10.2.1-10.2.4. DOI: 10.1109/IEDM.2013.6724599
11. Hadiyawarman, Budiman F., Hernowo D. G. O., Pandey R. R., Tanaka H. 2018. “Recent progress on fabrication of memristor and transistor-based neuromorphic devices for high signal processing speed with low power consumption”. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52, no 3S2, pp. 03EA06. DOI: 10.7567/JJAP.57.03EA06
12. Merolla P. A., Arthur J. V., Alvarez-Icaza R., Cassidy A. S., Sawada J., Akopyan F., Jackson B. L., Imam N., Guo C., Nakamura Y., Brezzo B., Vo I., Esser S. K., Appuswamy R., Taba B., Amir A., Flickner M. D., Risk W. P., Manohar R., Modha D. S. 2014. “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface”. Science, vol. 345, no 6197, pp. 668-672. DOI: 10.1126/science.1254642
13. Peng C.-S., Chang W.-Y., Lee Y.-H., Lin M.-H., Chen F., Tsai M.-J. 2012. “Improvement of resistive switching stability of HfO_2 films with al doping by atomic layer deposition”. Electrochemical and Solid-State Letters, vol. 15, no 4, pp. H88-H90. DOI: 10.1149/2.011204esl
14. Pickett M. D., Strukov D. B., Borghetti J. L., Yang J. J., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. 2009. “Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices”. Journal of Applied Physics, vol. 106, 074508. DOI: 10.1063/1.3236506
15. Waser R., Aono M. 2007. “Nanoionics-based resistive switching memories”. Nature Mater, vol. 6, no 11, pp. 833-840. DOI: 10.1038/nmat2023