

УДК 004.335; 004.8; 621.382

А.Н. Бобылев, С.Ю. Удовиченко

## Создание электронного запоминающего устройства, подобного по свойствам синапсу мозга

Статья посвящена исследованию в области твердотельной нейроморфной электроники. Затронуты требования к стабильности и воспроизводимости характеристик твердотельных аналогов синапсов – мемристоров и способы получения устройств, соответствующих этим требованиям. Описываются результаты эксперимента по получению тонкопленочного электронного устройства на основе смешанного оксида металлов  $\text{Al}:\text{TiO}_2$ . Представлены вольт-амперные характеристики твердотельного элемента и отмечена существенная нелинейность этих характеристик. Описаны зависящие от времени эффекты в процессах переключения мемристора. Указаны свойства живых синапсов, воспроизведенные в твердотельном элементе, и возможность использования полученного мемристора, как суммирующего элемента искусственного нейрона.

**Ключевые слова:** реактивное магнетронное распыление, мемристор, синапс.

В области информационных технологий одним из приоритетных направлений является создание компьютеров нового поколения, нейросетей и искусственного интеллекта. Использование аналоговых элементов нейронных сетей позволяет оптимизировать процесс обработки команд в сравнении со стандартной КМОП логикой. Основу предлагаемых нейроморфных систем составляют мемристоры (memory resistor) – двухполюсные устройства, электрическое сопротивление которых обратимо изменяется от состояния с высоким сопротивлением (HRS) до состояния с низким сопротивлением (LRS) в зависимости от проходящего через него тока. Посредством снижения сопротивления мемристора в узлах нейросети формируется связь, устойчивость и вес которой зависят от свойств мемристора. При повышении сопротивления мемристора происходит забывание или торможение. В таких устройствах информационный и управляющий сигналы могут быть объединены – возможно самообучение системы.

Впервые в [1] экспериментально было показано, что мемристивный эффект возникает в наноразмерных структурах металл-диэлектрик-металл за счет перемещения отрицательных ионов кислорода в тонком диэлектрическом слое толщиной ~5 нм диоксида титана  $\text{TiO}_2$  при приложении электрического поля. В настоящее время для мемристоров обоснованы две области применения: энергонезависимая универсальная память, призванная заменить существующие ОЗУ и ПЗУ, и нейроморфные структуры – устройства, в которых прохождение и изменение информационного сигнала подчиняются той же логике, что и процессы в нервной системе живых существ. Высшим развитием последнего направления могут считаться кортикоморфные структуры, эмулирующие работу кортикальных колонок головного мозга.

**Электрические свойства мемристора.** Архитектура кортикальных колонок включает в себя десятки тысяч синаптических элементов, параметры которых должны быть предсказуемы. Поэтому к искусственным аналогам таких элементов предъявляются требования высокой стабильности и воспроизводимости характеристик. Для создания вычислительных систем на основе мемристоров в [2] предложен материал с относительно высокими стабильностью и повторяемостью характеристик на основе смешанного оксида металлов  $\text{Ti}_{0.85}\text{Al}_{0.15}\text{O}_y$  толщиной 20 нм, нанесенный на кремниевую подложку методом атомарно-слоевого осаждения. В [3] приведены данные, показывающие, что при легировании оксида четырехвалентного переходного металла алюминием уменьшается энергия связи атомов основного металла и кислорода, а также увеличивается концентрация кислородных вакансий вокруг атомов примеси. Это приводит к снижению напряжения переключения устройства и увеличению отношения HRS/LRS, т.е. увеличению рабочего диапазона мемристора.

**Создание электронного устройства.** В настоящей работе методом одновременного реактивного магнетронного распыления катодов из алюминия и титана в среде кислорода в магнетронном модуле комплекса «НаноФаб-100» получен тонкопленочный материал из смешанного нестехиометрического оксида  $\text{Ti}_{0.92}\text{Al}_{0.08}\text{O}_{1.96}$ . Материал обладает более высокой по сравнению с приведенными в

[2] стабильностью и воспроизводимостью характеристик из-за отсутствия примесей и равномерного распределения элементов по толщине пленки.

С помощью литографического комплекса «Nanomaker» совместно с электронным микроскопом JSM-6510LV, магнетронного модуля НТК «НаноФаб-100» создано электронное устройство  $\text{TiN}/\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x}\text{O}_y/\text{TiN}$ : активный мемристорный слой в виде пленки смешанного оксида металлов с тремя проводящими дорожками сверху и четырьмя снизу.

Для поддержания обратимости ионного переноса между металлическими электродами и рабочей пленкой методом магнетронного напыления помещен тонкий слой нитрида титана. Толщина рабочей пленки  $\text{Ti}_{0,92}\text{Al}_{0,08}\text{O}_{1,96}$  составляет 20 нм, пленки  $\text{TiN}$  – 30 нм. В производстве микроэлектронных устройств подслой  $\text{TiN}$  между металлизацией и активным полупроводниковым слоем традиционно применялся для затруднения диффузии металла в полупроводник [4]. В статье [5] роль нитрида титана сводится к образованию пленки  $\text{TiO}_x\text{N}_{1-x}$ , затрудняющей дрейф кислорода.

**Исследование свойств мемристора.** С помощью зондового микроскопа NTegra Auga были исследованы вольт-амперные характеристики полученной гетероструктуры. Обнаружено, что исследуемая структура обладает выраженным эффектом мемристивности – при достижении граничного напряжения в пленке  $\text{Ti}_{0,92}\text{Al}_{0,08}\text{O}_{1,96}$  приблизительно на три порядка снижается электрическое сопротивление. Достигнутое состояние сохраняется при приложении напряжения, существенно меньшего, чем требуется для переключения состояния. Такое состояние сохраняется в течение продолжительного времени и является обратимым.

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика структуры, иллюстрирующая процесс переключения мемристора. На ВАХ виден гистерезис токов между прямой и обратной ветками нагружения. На рис. 2 показана ВАХ открытого мемристора в диапазоне напряжений меньших, чем напряжение переключения.

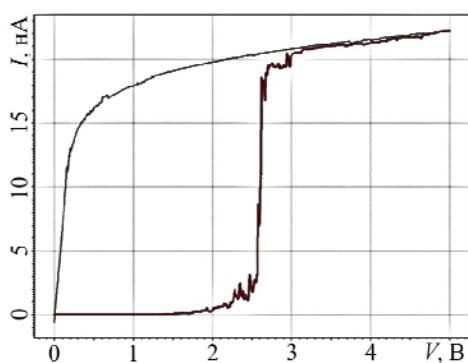


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика переключения мемристора

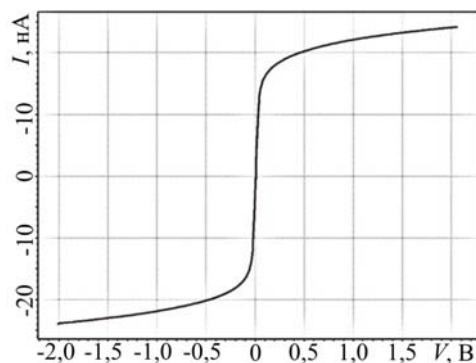


Рис. 2. ВАХ открытого мемристора

Важно отметить нелинейность ВАХ, обусловленную вкладом слоев нитрида титана, создающих барьеры Шоттки на границах с металлическими проводящими дорожками.

**Выводы. Подобие свойств синапса и мемристора.** Электрические характеристики мемристора определяются предысторией его функционирования, что подобно свойствам синапса.

При исследовании ВАХ мемристора были обнаружены следующие эффекты:

1. Эффект сохранения состояния при подаче импульсов напряжения с амплитудой меньше напряжения переключения, что соответствует импульсации в нервных клетках. Такие импульсы позволяют производить считывание состояния отдельного мемристора и сохранять в нем требуемое состояние неограниченное время.

2. Релаксация состояния: при снятии напряжения с мемристора под действием кулоновских сил ионы кислорода вытесняются из депо  $\text{TiN}$  и их концентрация стремится к равновесной по толщине активной пленки. Время релаксации составляет от 0,8 с до десятков минут в зависимости от толщины пленки и может быть дополнительно увеличено на несколько порядков введением между пленками  $\text{Ti}_{0,92}\text{Al}_{0,08}\text{O}_{1,96}$  и  $\text{TiN}$  мембранного слоя  $\text{TiO}$ , затрудняющего диффузию вакансий [5].

Описанный эффект позволяет говорить о существовании кратковременной и долгосрочной памяти в полученных мемристорах. О возможности существования эффекта кратковременной памяти в мемристорах сообщалось в работах [6] и [7], где также дано и обосновано сравнение принципов работы синапса и типового мемристора.

Если подать повторный зондирующий импульс с некоторой задержкой после первоначального включения мемристора (см. рис. 1), то можно обратить процесс релаксации его состояния. ВАХ мемристора при подаче импульсов с разными задержками представлены на рис. 3. В случае *a* задержка больше, чем в *б*.

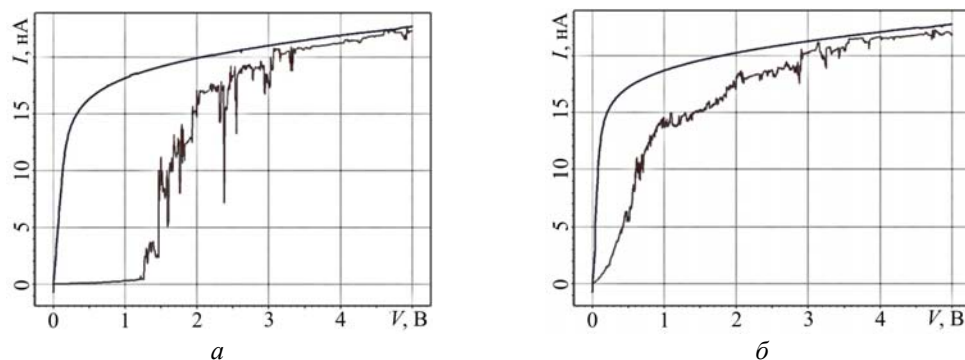


Рис. 3. ВАХ мемристора при подаче повторного зондирующего импульса с разной задержкой

При подаче импульса с минимальной задержкой состояние мемристора не релаксирует и ВАХ соответствует состоянию включенного мемристора.

3. В области рабочих напряжений ВАХ исследуемого мемристора нелинейна, что позволяет гибко регулировать выходной ток мемристора при незначительном изменении уровня входного сигнала. Такое изменение позволит более гибко подходить к формированию цепочек из нескольких связанных мемристоров, по которым передается восходящий сигнал в многослойной нейроморфной структуре. Кроме того, график нелинейной ВАХ открытого мемристора может быть аппроксимирован с высокой точностью функцией гиперболического тангенса. Известно [8], что гиперболический тангенс используется в качестве суммирующей функции в математической модели искусственного нейрона с выходным сигналом, препятствующим насыщению.

Таким образом, можно заключить, что созданная гетероструктура обладает следующими свойствами синапса: возможностью формирования кратковременного и долговременного возбуждения и обучаемостью при последующем повторном иннервировании. Кроме того, ВАХ синтезированной структуры совпадает с используемой в моделировании нейроморфных систем суммирующей функцией нейрона. Это позволит использовать мемристор не только в качестве синапсов, но и в качестве суммирующего элемента искусственных нейронов.

#### Литература

1. The missing memristor found / D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams // Nature. – 2008. – Vol. 453. – P. 80–83.
2. Пат. 2 472 254 РФ, МПК Н 01 L 45/00, В 82 В 1/00. Мемристор на основе смешанного оксида металлов / А.П. Алехин (РФ), А.С. Батулин (РФ), И.П. Григал (РФ) и др. – № 2 011 146 089/07, заявл. 14.11.2011; опубли. 10.01.2013. Бюл. № 1. – 12 с.
3. Improvement of resistive switching stability of  $\text{HfO}_2$  films with Al doping by atomic layer deposition / C.-S. Peng, W.-Y. Chang, Y.-H. Lee et al. // Electrochemical and Solid-State Letters. – 2012. – Vol. 15, № 4. – P. H88–H90.
4. Kouno T. Effect of  $\text{TiN}$  microstructure on diffusion barrier properties in Cu metallization / T. Kouno, H. Niwa, M. Yamada // Journal of The Electrochemical Society. – 1998. – Vol. 145, № 6. – P. 2164–2167.
5. Roles of interfacial  $\text{TiO}_x\text{N}_{1-x}$  layer and  $\text{TiN}$  electrode on bipolar resistive switching in  $\text{TiN}/\text{TiO}_2/\text{TiN}$  frameworks / S.K. June, H.D. Young, Ch.B. Yoon et al. // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96, № 22. – P. 223502.
6. Chang T. Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor / T. Chang, S.-H. Jo, W. Lu // ACS Nano. – 2011. – Vol. 5, №9. – P. 7669–7676.
7. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems / S.-H Jo, T. Chang, I. Ebgong et al. // Nano Lett. – 2010. – Vol. 10, №4. – P. 1297–1301.
8. Миркес Е.Н. Нейрокомпьютер. Проект стандарта. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998. – 337 с.

**Бобылев Андрей Николаевич**

Аспирант каф. МНТ, ТюмГУ

Тел.: +7-922-046-19-97

Эл. почта: andreaubobylev@gmail.com

**Удовиченко Сергей Юрьевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. МНТ, рук. НОЦ «Нанотехнологии», ТюмГУ

Тел.: +7-922-004-46-74

Эл. почта: udotgu@mail.ru

Bobylev A.N., Udovichenko S.Y.

**The creation of an electronic memory device with properties similar to organic synapse**

The paper is devoted to research in the field of solid-state neuromorphic electronics. The requirements for stability and reproducibility of the characteristics of solid-state analogues of synapses – memristors and meeting these requirements devices fabrication methods are discussed. The experiment of obtaining multilayer thin-film electronic device based on mixed metal oxide Al:TiO<sub>2</sub> and its results are described. The current-voltage curves of the obtained solid element are presented and significant non-linearity of these CVCs is noted. Time-dependent effects in memristor switching process are described. The organic synapse properties reproduced in solid element and possibility of the fabricated device usage as a summing element of an artificial neuron are described.

**Keywords:** reactive magnetron sputtering, memristor, synapse.