

Наноразмерные электронные синапсы на основе HfO_2 в геометрии кросс-баров

А. И. Фетисова, Р. В. Киртаев, Ю. А. Матвеев, Д. В. Негров, А. В. Зенкевич
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Даже самые современные компьютеры, основанные на классической архитектуре фон Неймана, по-прежнему не могут конкурировать с биологическими нервными системами в решении задач распознавания образов, речи, классификации, и др. Отличие заключается в принципиально иной архитектуре мозга, ключевой особенностью которой является исключительно высокая связанность нейронов, плотно упакованных в 3D-сети, что приводит к высокому параллелизму обработки информации, а также интеграции вычислительных и запоминающих функций в одних и тех же структурах [1]. Перспективной стратегией является создание нейроморфных вычислительных систем которые уже на уровне архитектуры будут повторять строение и принципы работы биологических систем. До недавнего времени, возможности подобных устройств были ограничены из-за не адаптивности существующей элементной базы. Однако, в 2008 году были открыты так называемые мемристоры [2] – простейшие устройства, которые могут воспроизводить характеристики синапсов. Таким образом, появилась возможность создавать устройства, в которых нейроны будут изготовлены по стандартной КМОП-технологии, а роль синапсов будут играть мемристоры в геометрии “cross-bar”. Для формирования такого рода матриц разработана комбинированная технология, включающая в себя комбинацию оптической и электронной литографии, которая позволяет формировать функциональные мемристоры с минимальными латеральными размерами вплоть до 40x40 нм. В данной работе представлены результаты электрофизических исследований мемристоров на основе структур Pt/ HfO_2 /TiN с толщиной слоя HfO_2 в диапазоне 3-5 нм.

На Рис.1 изображена типичная ВАХ мемристора размером 40x40 нм² с слоем HfO_2 толщиной 3 нм.

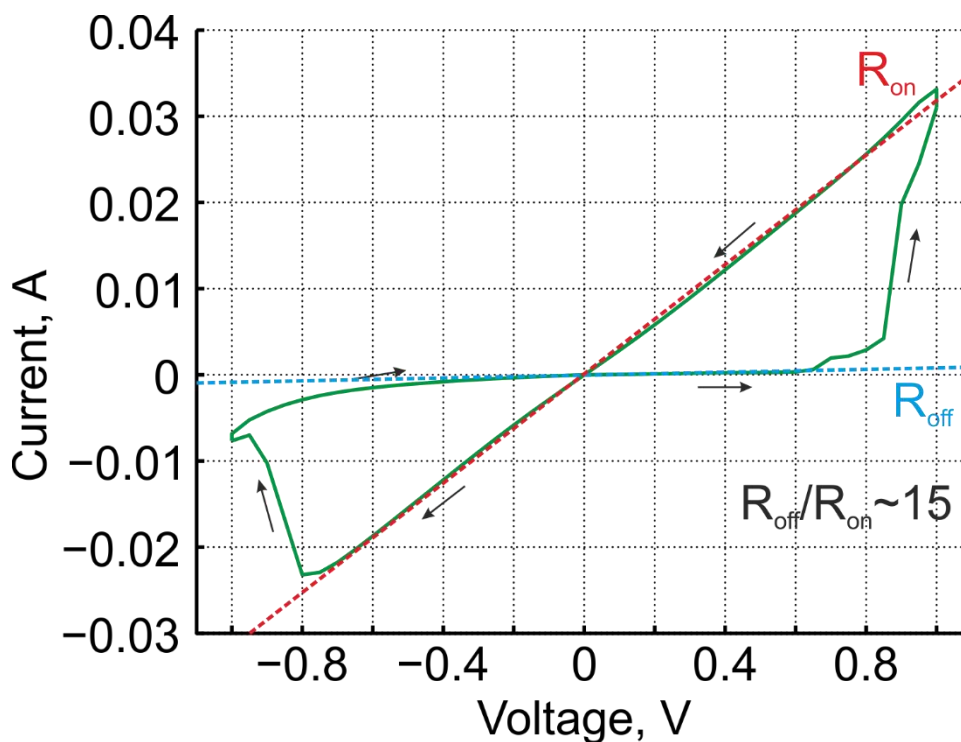


Рис. 1 Типичная вольт-амперная характеристика мемристора на основе TiN/HfO₂/Pt размерами 40x40 нм² с слоем диэлектрика толщиной 3 нм

Исходные мемристоры требуют так называемой электрической «формовки», то есть электрического пробоя при включенном ограничении тока на уровне $I = 1$ мА. Напряжение, при котором происходит пробой зависит от толщины диэлектрика (см таблица 1). Важно отметить, что устройства с толщиной функционального слоя 3 нм напряжение формовки равно напряжению последующих переключений, то есть фактически эти структуры не требуют отдельной формовки.

Таблица 1 Типичные напряжения формовки и переключений для мемристоров с различной толщиной диэлектрика

	Формовка, В	U_{Set} , В	U_{Reset} , В	R_{HRS}	R_{LRS}	R_{Off}/R_{On}
3 нм HfO ₂	1÷2.3	0.7÷1.5	-1 ÷ -1,5	200÷10000	30÷200	4÷50
4 нм HfO ₂	1.3÷2.8	0.7÷1	-1	200÷5000	35÷200	3÷100
5 нм HfO ₂	2.4÷3.8	0,75÷1	-0,95 ÷ -1,3	400÷2500	50÷400	3÷20

Для данных устройств продемонстрирован эффект обратимого резистивного переключения с напряжением перехода из низко- (“LRS”) в высоко- (“HRS”) проводящее состояние $U_{RESET} = -1 \div -1.5$ В и $U_{SET} = 0.7 \div 1.5$ В, соответственно. Сопротивления в высокоомном R_{HRS} и в низкоомном R_{LRS} также приведены в Таблице 1 (здесь и далее сопротивление мемристора измеряется при напряжении 0.1 В).

В режиме переключения одиночным импульсом тока (трапецидальные импульсы длительностью 2 мкс с фронтами нарастания/спада 1 мкс) напряжения переключения

составили $U_{SET} = 0.8 \div 1.3$ В и $U_{RESET} = -0.9 \div -1.5$ В. Количество переключений в данном режиме составляет не менее $2 \cdot 10^5$ циклов для всех толщин HfO_2 (на Рис. 2 приведены результаты для 3 нм функционального слоя HfO_2) после чего отношение R_{Off}/R_{On} падает до значений меньше $R_{Off}/R_{On} < 2$.

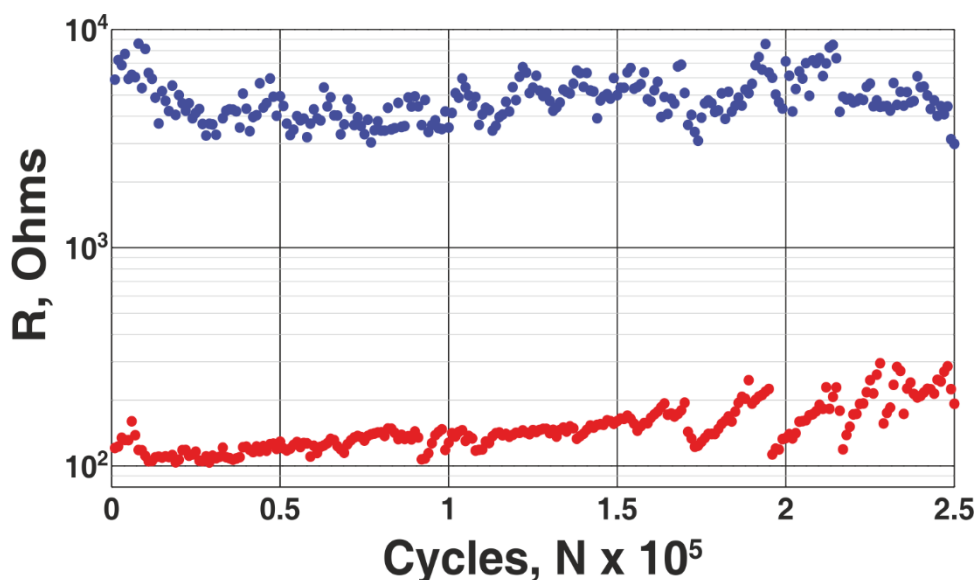


Рис. 2 Результаты теста на максимальное число переключений импульсным режимом для мемристора $TiN/HfO_2/Pt$ размерами 100×100 нм² с слоем диэлектрика толщиной 3 нм

Для демонстрации мемристорных свойств, а именно- интеграции протекшего через них заряда, на структуры подавались последовательности идентичных импульсов различных амплитуд. Сопротивление структуры при напряжении $U = 0.1$ В измерялось после каждого импульса. Полученные зависимости для мемристора на основе HfO_2 (3 нм) от количества поданных импульсов приведены на Рис. 3. Как видно из графиков, в целом сопротивление имеет монотонную зависимость от числа импульсов в обоих направлениях, хотя наблюдаются отклонения от импульса к импульсу, последнее объясняется стохастической природой механизма переключения сопротивления. Полученные зависимости функционально похожи на долговременное возбуждение и торможение биологических синапсов. Таким образом можно заключить, что изготовленные мемристоры в геометрии кросс-баров эмулируют функции синапсов и могут быть использованы для создания матриц электронных синапсов в разрабатываемых нейроморфных чипах.

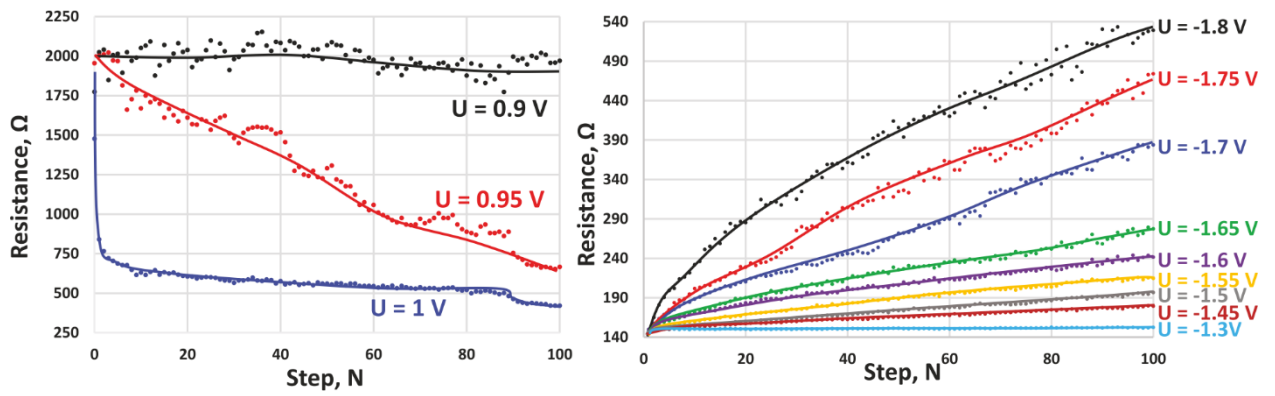


Рис. 3 Зависимости сопротивления от количества поданных импульсов различной амплитуды для мемристора TiN/HfO₂/Pt размерами 40x40 нм² с слоем диэлектрика толщиной 3 нм

Литература:

- [1] D. Kuzum, S. Yu and H.-S. P. Wong, Synaptic electronics: materials, devices and applications, *Nanotechnology* 24 (2013) 382001
- [2] R. Waser and M. Aono, Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials* 6 (2007) 833 – 840