

## РОЛЬ КИСЛОРОДНЫХ ВАКАНСИЙ В ПРОЦЕССАХ ПОТЕНЦИАЦИИ И ДЕПРЕССИИ В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НАНОТРУБОК ДИОКСИДА ТИТАНА

Федоров Д.Д.<sup>1</sup>, Петренёв И.А.<sup>1</sup>, Вохминцев А.С.<sup>1</sup>, Вайнштейн И.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>) Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия  
E-mail: d.d.fedorov@urfu.ru

## ROLE OF OXYGEN VACANCIES IN PROCESSES OF POTENTIATION AND DEPRESSION FOR MEMRISTORS BASED ON TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES

Fedorov D.D.<sup>1</sup>, Petrenyov I.A.<sup>1</sup>, Vokhmintsev A.S.<sup>1</sup>, Weinstein I.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>) Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

The processes of potentiation and depression in terms of synaptic plasticity were shown for the titania-based memristive structure in the pulse mode. The conduction mechanisms in different resistive states and electrical parameters of the titania layer were determined.

Активный интерес со стороны научного сообщества к мемристивным структурам на основе оксидов переходных металлов связан с потенциальными применениями устройств на их основе в качестве ячеек энергонезависимой памяти, логических элементов или синапсов в искусственных нейронных сетях [1, 2]. Использование мемристивных структур в качестве твердотельной модели синапса требует аналогового характера изменения сопротивления. В рамках краткосрочной (STP; несколько минут и менее) и долгосрочной (LTP; несколько часов и более) синаптической пластичности такое поведение структуры рассматривается на примере процессов потенциации и депрессии, которые соответствуют постепенному уменьшению и увеличению сопротивления соответственно. Оба типа пластичности важны: считается, что в человеческом мозге STP отвечает за вычисления, а LTP – за память и обучение. Для реализации того или иного типа пластичности необходимо понимать физику процессов изменения сопротивления (проводимости), протекающих в оксидном слое. В данной работе исследованы процессы потенциации и депрессии при импульсном электрическом воздействии на нанотубулярный слой  $\text{TiO}_2$ , а также параметры анионных дефектов (вакансий кислорода) и их влияние на мемристивное поведение.

Исследуемая мемристивная структура состояла из титановой подложки толщиной 0.5 мм, на которой методом анодирования был синтезирован

упорядоченный массив нанотрубок  $\text{TiO}_2$  длиной 1 мкм, а также нанесённого на него методом магнетронного напыления слоя золота толщиной 50 нм.

При импульсном электрическом воздействии длительностью 0.5 мс наблюдались эффекты потенциации и депрессии в рамках синаптической пластичности при амплитудах управляющих импульсов +3 и -2 В соответственно. Изменение сопротивления наблюдалось в диапазоне 140–170 кОм (рис. 1), что соответствует примерно 20% увеличения/уменьшения проводимости и является достаточным критерием для оценки перспективности использования исследуемой структуры для применения в качестве основы твердотельной модели синапса в искусственных нейронных сетях.

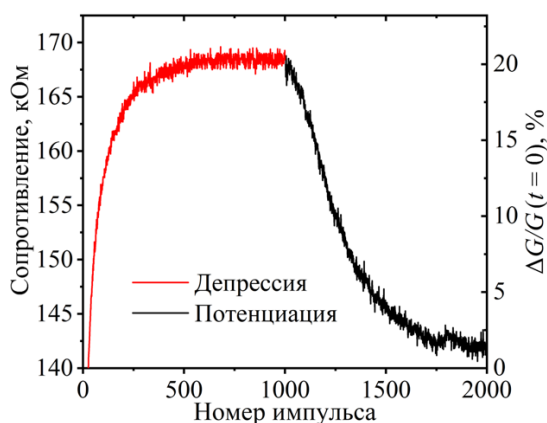


Рис. 1. Кривые депрессии и потенциации мемристора на основе нанотубулярного диоксида титана

Для изучения параметров дефектов, ответственных за мемристивное поведение структуры, измерена серия вольт-амперных характеристик для нескольких образцов при подаче гармонического сигнала с частотой 0.01 Гц и амплитудой  $\pm 0.8$  В. Установлено, что во всех резистивных состояниях наблюдается доминирование механизма проводимости, ограниченной пространственным зарядом. В рамках соответствующей математической модели определены значения концентрации свободных носителей, концентрации ловушек, доли свободных носителей заряда относительно их общего числа, поперечное сечение захвата ловушек, время переноса заряда через нанотрубки и др. Полученные значения свидетельствуют о вакансионной природе дефектов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".*

1. A.S. Vokhmintsev, I.A. Petrenyov, R.V. Kamalov, I.A. Weinstein, Nanotechnology, 33, 075208 (2022).

2. А.С. Вохминцев, И.А. Петренёв, Р.В. Камалов, М.С. Карабаналов, И.А. Вайнштейн, А.А. Ремпель, Доклады Российской Академии наук. Химия, науки о материалах, 513, 119–124 (2023).