

## Формирование металлооксидных пленочных наноструктур на основе анодного $Al_2O_3$ с равномерно распределенными наноразмерными включениями Ta и их электрические свойства

К. В. Черникова<sup>1</sup>, И. А. Врублевский<sup>1</sup>,  
Е. Н. Муратова<sup>2</sup>, М. А. Канаев<sup>2</sup>, В. А. Мошников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований формирования пленочных металлооксидных наноструктур с островковыми танталовыми включениями на основе процессов анодирования двухслойных пленок Ta–Al. Изучены удельное поверхностное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления таких наноструктур. Полученные результаты показывают, что предложенная методика позволяет полностью копировать ячеисто-пористую структуру анодного оксида алюминия и формировать наноструктурированную танталовую пленку островкового характера с диэлектрической фазой в местах пор.

### 1. Введение

В настоящее время матрица из анодного оксида алюминия (АОА) с регулярно упорядоченной нанопористой структурой широко используется как относительно недорогой и хорошо воспроизводимый шаблон для получения различных наноструктур [1–3]. Одним из примеров использования такого нанопористого шаблона является электрохимический способ встраивания нанонитей вентильных металлов (Ta, Ti, Nb и др. [3, 4]) в основании оксидной ячейке, для формирования наноразмерных столбиковых автоэммиттеров. Технология формирования автоэмиссионных структур, основанная на процессах самоорганизации на наноуровне, является одной из наиболее перспективной с точки зрения повышения надежности приборов и снижения себестоимости.

В данной работе показана новая возможность применения матрицы из нанопористого АОА для задач нанотехнологии с целью формирования металлооксидных пленочных наноструктур. Представлены результаты исследований процессов формирования пленочных металлооксидных танталовых наноструктур с использованием анодирования двухслойных пленок Ta–Al, и таких их характеристик, как удельное поверхностное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

### 2. Эксперимент

Пленки тантала толщиной 30 нм и алюминия толщиной 1500 нм осаждали методом электронно-лучевого испарения в вакууме в установке электронно-лучевого испарения «Оратории-9» с планетарным механизмом вращения подложек. В качестве подложек для осаждения пленок использовался ситалл марки СТ-50-1. Пленки пористого АОА формировали методом электрохимического окисления алюминия в электролите на основе щавелевой кислоты. Электрохимиче-

В процессе окисления слоя тантала осуществляли через сквозные поры анодного оксида алюминия в анодном процессе с анодным окислением алюминия.

Образование островковых танталовых пленочных наноструктур обеспечивалось за счет локального электрохимического окисления слоя Ta через маску из нанопористого оксида алюминия со сквозными порами (рис. 1). Использование такого шаблона с наноразмерным рисунком решало задачу по формированию в резистивном слое упорядоченного регулярно-распределенного массива наноразмерных диэлектрических островков из оксида тантала, препятствующих к нарушению сплошности слоя тантала

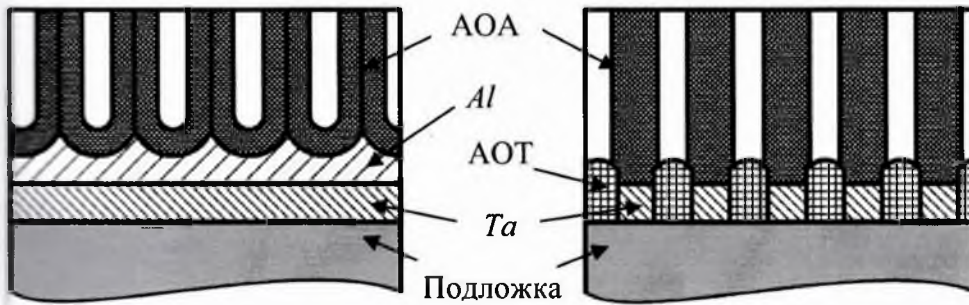


Рис. 1. Схематичное изображение образования островковых танталовых пленочных наноструктур

Предложенный процесс позволяет полностью копировать ячеисто-пористую структуру АОА и формировать наноструктурированную танталовую пленку островкового характера с диэлектрическими включениями в местах пор.

### 3. Результаты и обсуждения

В результате электрохимического окисления алюминия были получены структурированные нанопористые пленки оксида алюминия (рис. 2).

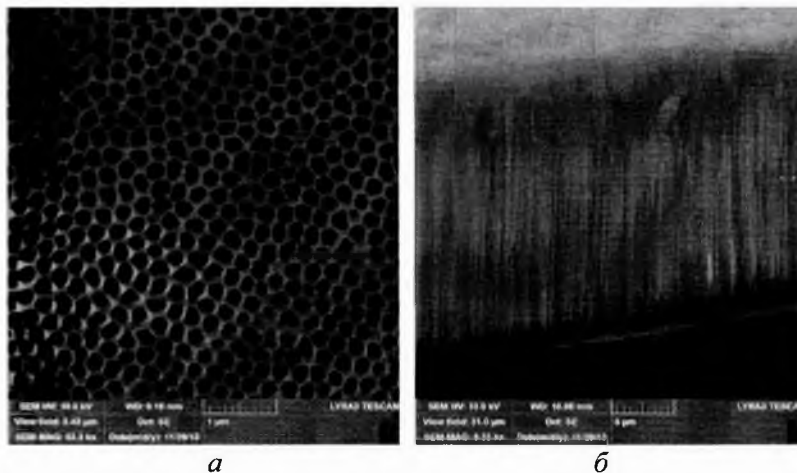
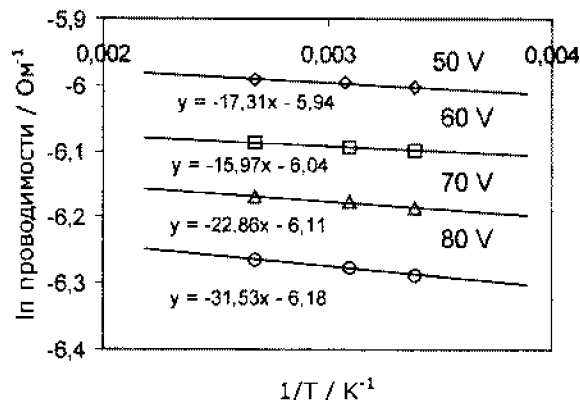


Рис. 2. РЭМ изображение морфологии пленки пористого АОА: поверхность (а) и профиль (б)

Диаметр пор полученных пленок АОА, и, следовательно, формируемых затем областей диэлектрической фазы анодного оксида тантала (АОТ) в пленке тантала, варьируется от 12 нм до 30 нм с расстояниями между такими областями от 33 нм до 70 нм, в зависимости от выбранного напряжения анодирования в щавелевой кислоте (10–40 В).

В работе было исследовано влияние различных типов поробразующих электролитов на характер электрического сопротивления и ТКС формируемых пленочных островковых танталовых наноструктур. На рисунке 3 показаны температурные зависимости изменения проводимости

сти для танталовых структур, сформированных в электролите на основе щавелевой кислоты при различных напряжениях анодирования.



**Рис. 3.** Температурные зависимости изменения проводимости танталовых островковых наноразмерных пленок, сформированных двухслойным анодированием пленок Al-Ta в 4% щавелевой кислоте при напряжении 50, 60, 70 и 80 В

Следует отметить, что островковые пленки, несмотря на металлическую природу проводящей основы, обладали отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Это указывает на механизм переноса тока между изолированными металлическими островками. В случае формирования пленочных металлооксидных наноразмерных структур влияние границ зерен становится существенным фактором и с увеличением размеров диэлектрических фракций в пленке это приводит к увеличению сопротивления и к дальнейшему переходу к диэлектрическим свойствам.

### Заключение

По результатам исследований сделан вывод, что формирование участков диэлектрической фазы из анодного оксида тантала в пленке тантала и влияние границ зерен для танталовых включений в металло-оксидной структуре является основным фактором, обеспечивающим увеличение сопротивления и отрицательный ТКС танталовых наноразмерных островковых пленок, сформированных двухслойным пористым анодированием пленок Al-Ta.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60110 мол\_а\_дк.

### Литература

- [1] Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. Лучинина В. В., Таирова Ю. М. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 55 с.
- [2] Muratova E. N., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A., Chernyakova K. V., Vrublevsky I. A. Thermal radiation shielding by nanoporous membranes based on anodic alumina / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 872 (2017) 012020.
- [3] Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: ФИЗМАТ, 2006. 192 с.
- [4] A. Mozalev, M. Sakairi, and H. Takahashi, Structure, morphology, and dielectric properties of nanocomposite oxide films formed by anodizing of sputter-deposited Ta-Al bilayers / J. Electrochem. Soc. 2004 vol. 151, issue 11, F257–F268.