

С. А. ВОДОЛАЖЧЕНКО, Л. В. ЛЯШОК, С. Г. ДЕРИБО, В. П. ГОМОЗОВ

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПОРИСТОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОКСИДА ТАНТАЛА

Самоорганизация наноразмерных структур при электрохимической обработке наиболее ярко проявляется в ходе формирования пористых анодных оксидов металлов (алюминия, титана, вольфрама, ниобия, тантала). Эти оксиды содержат массивы ориентированных перпендикулярно подложке пор. Отличительной особенностью этих пленок является высокая степень упорядоченности в расположении пор и возможность управляемого варьирования диаметра пор в широком диапазоне (от 10 до 150 нм). В работе исследованы особенности электрохимического формирования нанопористых оксидных покрытий на тантале в кислотных фторидных и органических электролитах. В качестве рабочего электрода использовали танталовую фольгу толщиной 0,1 мм, чистотой 99,99 %. Для формирования оксидов тантала использовали растворы 1 М H₂SO₄ с добавлением HF (0,1 М; 0,25 М; 0,5 М; 1 М) и органический электролит: EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NH₄F, EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NaF. Поляризационные исследования осуществляли на потенциостате Р – 45Х. В потенциодинамическом режиме. Электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный. Величины потенциалов приведены относительно нормального водородного электрода. Морфологию полученных покрытий изучали с помощью метода сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа JSM–7001F. Показано, что использование активатора фтор иона и электролитов различной природы позволяет на начальной стадии анодирования обеспечивать условия для формирования кристаллической анодной оксидной пленки с различной морфологией поверхности. Варьируя режимом анодирования на тантале можно синтезировать пористые пленки аморфного или кристаллического типов. Для получения кристаллического пористого оксида тантала с развитой поверхностью, целесообразно использовать органический апротонный электролит состава: EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NH₄F.

Ключевые слова: электрохимическое растворение; анодное поведение; тантал; пористый оксид тантала; электролит; окислитель; синтез.

С. О. ВОДОЛАЖЧЕНКО, Л. В. ЛЯШОК, С. Г. ДЕРИБО, В. П. ГОМОЗОВ

ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ СИНТЕЗ ПОРИСТОГО КРИСТАЛІЧНОГО ОКСИДУ ТАНТАЛУ

Самоорганізація нанорозмірних структур при електрохімічній обробці найбільш яскраво проявляється в ході формування поруватих анодних оксидів металів (алюмінію, титану, вольфраму, ніобію, танталу). Ці оксиди містять масиви орієнтованих перпендикулярно підкладці пор. Відмінною особливістю цих плівок є висока ступінь впорядкованості в розташуванні пор і можливість керованого варіювання діаметра пор в широкому діапазоні (від 10 до 150 нм). В роботі досліджені особливості електрохімічного формування нанопоруватих оксидних покриттів на танталі в кислотно-фторидних і органічних електролітах. В якості робочого електрода використовували танталову фольгу товщиною 0,1 мм, чистотою 99,99 %. Для формування оксидів танталу використовували розчини 1 М H₂SO₄ з додаванням HF (0,1 М; 0,25 М; 0,5 М; 1 М) і органічний електроліт: EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NH₄F, EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NaF. Поляризаційні дослідження здійснювали на потенціостаті Р – 45Х. в потенціодинамічному режимі. Електрод порівняння – насичений аргентумхлоридний. Величини потенціалів наведені щодо нормального водневого електрода. Морфологію отриманих покриттів вивчали за допомогою методу скануючої електронної мікроскопії з використанням мікроскопу JSM-7001F. Показано, що використання активатора фтор іона і електролітів різної природи дозволяє на початковій стадії анодування забезпечувати умови для формування оксиду з різною морфологією поверхні. Варіюючи режимом анодування на танталі можна синтезувати поруваті плівки аморфного або кристалічного типів. Для отримання кристалічного поруватого оксиду танталу з розвинутою поверхнею, доцільно використовувати органічний апротонний електроліт складу: EG + 5,5 М H₂O + 0,05 М H₃PO₄ + 0,8 М NH₄F.

Ключові слова: електрохімічне розчинення; анодна поведінка; тантал, поруватий оксид танталу; електроліт; окиснювач; синтез.

S. A. VODOLAZCHENKO, L. V. LYASHOK, S. G. DERIBO, V. P. GOMOZOV

ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF POROUS CRYSTALLINE TANTAL OXIDE

Self-organization of nanoscale structures during electrochemical processing is most pronounced during the formation of porous anodic metal oxides (aluminum, titanium, tungsten, niobium, tantalum). These oxides contain arrays oriented perpendicular to the pore substrate. A distinctive feature of these films is a high degree of orderliness in the arrangement of pores and the possibility of controlled variation of the pore diameter in a wide range (from 10 to 150 nm). In this work, the features of the electrochemical formation of nanoporous oxide coatings on tantalum in acid-fluoride and organic electrolytes are investigated. Tantalum foil with a thickness of 0.1 mm and a purity of 99.99 % was used as a working electrode. For the formation of tantalum oxides, 1 M H₂SO₄ solutions with the addition of HF (0.1 M; 0.25 M; 0.5 M; 1 M) and an organic electrolyte were used: EG + 5.5 M H₂O + 0.05 M H₃PO₄ + 0.8 M NH₄F, EG + 5.5 M H₂O + 0.05 M H₃PO₄ + 0.8 M NaF. Polarization studies were carried out on a P-45X potentiostat. In potentiodynamic mode. The reference electrode is saturated silver chloride. The magnitudes of the potentials are given relative to the normal hydrogen electrode. The morphology of the obtained coatings was studied using scanning electron microscopy using a JSM-7001F microscope. It is shown that the use of fluoride ion activator and electrolytes of different nature allows at the initial stage of anodizing to provide conditions for the formation of a crystalline anodic oxide film with different surface morphology. By varying the anodizing regime on tantalum, it is possible to synthesize porous films of amorphous or crystalline types. To obtain a crystalline porous oxide of tantalum with a developed surface, it is advisable to use an organic aprotic electrolyte composition: EG + 5.5 M H₂O + 0.05 M H₃PO₄ + 0.8 M NH₄F.

Keywords: electrochemical dissolution; anodic behavior; tantalum; porous tantalum oxide; electrolyte; oxidizer; synthesis.

Введение. Электрохимический метод формирования пористых анодных оксидных пленок (АОП) на вентилях металлах (Al, Ti, Nb, Ta и др.) привлекает внимание многих исследователей, т.к. позволяет создавать оксидные материалы с управляемой нано-

структурированной морфологией поверхности [1, 2].

Нанопористый оксид тантала обладает уникальными свойствами (поры нанометрового размера, высокая химическая и термическая стойкость, каталитическая активность и др.), что делает его

перспективным с практической точки зрения. Данный материал характеризуется возможностью эффективного применения для создания широкого спектра устройств, таких как газовые сенсоры [3], солнечные батареи [4], катализаторы [5], тонкопленочные литиевые аккумуляторы [6] и др. Следовательно, разработка технологии электрохимического формирования пористых АОП на тантале и исследование их свойств имеет существенную научно-техническую значимость.

Опубликованные исследования по синтезу и управлению морфологией пористого оксида тантала (ПОТ) немногочисленны, поскольку он является сравнительно новым материалом. Формированию ПОТ посвящены работы [7–9] из которых известно, что в зависимости от условий электролиза на тантале может быть сформирован аморфный или кристаллический оксид с различной морфологией поверхности. Однако в литературе практически отсутствует корреляция морфологии ПОТ с условиями его формирования. Потому настоящая работа посвящена изучению роли природы электролита, наличия активатора и режима анодирования в формировании нанопористого оксида тантала кристаллического типа.

Существующие методы решения проблемы.

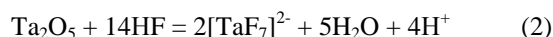
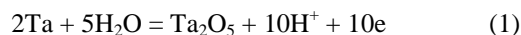
Среди известных способов формирования оксидных наноматериалов, одним из наиболее перспективных как с технологической, так и с экономической точек зрения, является метод анодного окисления вентильных металлов в слабо растворяющих оксид электролитах [4]. В работе [5] показано, что АОП сформированные на тантале во фторидсодержащих электролитах, имеют самоорганизованную нанопористую структуру. Несмотря на имеющуюся в литературе информацию по формированию пористых оксидных пленок на тантале [5, 7, 9] в большинстве работ недостаточно отражены сведения о зависимости характеристик анодного оксида тантала от условий его формирования. Актуальность решения указанной задачи определила направление исследований, проведенных в данной работе.

Анализ основных достижений и литературы

Анализ литературы [4, 6, 7] свидетельствует, что ПОТ образуется во фторидсодержащих электролитах, слабо растворяющих оксидную пленку. Анионный состав электролита существенно влияет на динамику процессов в энергетически неоднородном пассивирующем слое. По сорбционной способности фторид-ион проявляет активирующее действие. Депассивация образца начинается на участках с наибольшей активностью, а затем в этот процесс вовлекаются и менее активные участки. Взаимодействие фторида с поверхностью АОП приводит к образованию водорастворимого комплекса $[\text{TaF}_7]^{2-}$ [10], что вызывает локальное растворение оксида, способствующее зарождению пор и формированию пористой структуры АОП.

На аноде одновременно протекает несколько реакций: поверхность анода покрывается оксидной пленкой, обладающей униполярной проводимостью (1), ионы фтора растворяют поверхностный оксид и

реагируют с металлом (2), происходит растворение металла (3) [3]:



Вследствие взаимодействия тантала с водой образуется новый слой Ta_2O_5 . Образовавшаяся пленка взаимодействует с электролитом и частично растворяется. При этом считается, что на металле сначала образуется безпористый барьерный слой оксида. Который под действием электролита и сильного поля трансформируется в кристаллический оксид. С течением времени микроконусы срастаются в процессе окисления металла в сплошной слой кристаллического оксида. Анодный оксид представляет собой плотно упакованные ячейки, которые направлены перпендикулярно к поверхности металла и параллельно друг к другу. Полусферическая форма дна растущей ячейки при этом сохраняется [12]. Несмотря на то, что скорость химического растворения оксида, примерно на два порядка ниже скорости электрохимического растворения, а продолжительность анодирования большая, за счет химического растворения до конца процесса стенки пор могут потерять механическую прочность и осыпаться. Следовательно, чем ниже агрессивность электролита, тем выше предельная толщина пористого слоя [9].

Цель работы. Целью данной работы является определение влияния природы электролита при анодном окислении тантала на морфологию кристаллических пористых оксидных покрытий.

Методы исследования. Изучение анодного поведения тантала проводили в растворах 1 М H_2SO_4 с добавлением HF (0,1 М; 0,25 М; 0,5 М; 1 М) и органическом электролите $\text{EG} + 5.5 \text{ M H}_2\text{O} + 0.05 \text{ M H}_3\text{PO}_4 + 0.8 \text{ M NH}_4\text{F}$, $\text{EG} + 5.5 \text{ M H}_2\text{O} + 0.05 \text{ M H}_3\text{PO}_4 + 0.8 \text{ M NaF}$. Все электролиты были приготовлены из реактивов марки «х.ч.» и «ч.д.а.» на дистиллированной воде. Поляризационные исследования осуществляли на потенциостате Р–45Х. В качестве рабочего электрода использовали танталовую фольгу толщиной 0,1 мм, чистотой 99,99 %. Образцы химически полировали в течение 5–10 с при комнатной температуре (20–25°C) в растворе следующего состава: $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{HF} = 5 : 2 : 2$. Материалом противоэлектрода служил свинец.

Электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный. Величины потенциалов приведены относительно нормального водородного электрода.

Морфологию полученных покрытий изучали с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа JSM–7001F.

Результаты исследования. В качестве исходной рассматривали реальную структуру поверхности тантала как дефектную, содержащую естественную пленку оксида, наследующую дефекты после подго-

товительных операций. В этой связи предположили, что вдоль поверхности тантала при наложении потенциала распределение электрического поля неоднородное, а скорости процессов электрохимического роста и растворения оксида на различных участках поверхности неодинаковы и зависят от степени ее дефектности и состава жидкостной обкладки двойного электрического слоя. В дефектных участках процесс растворения должен протекать ускоренно с образованием зародышей пор при небольшой напряженности поля и зародышей кристаллической фазы при действии сильного поля.

Для выявления факторов, влияющих на зарождение кристаллической фазы при формировании Ta_2O_5 , рассмотрим полученные анодные поляризационные зависимости (рис. 1). Величина стационарного потенциала танталового электрода в электролите с фторид-ионами имеет более отрицательное значение с увеличением концентрации фторида. Следовательно, в присутствии фторида активация поверхности происходит также и без наложения электрического тока.

На кривых наблюдается один максимум тока, что свидетельствует о необратимости протекания процесса формирования оксида тантала. Значение пика тока увеличивается с ростом концентрации фторид-ионов в электролите. Резкий подъем анодного тока и переход системы в пассивное состояние связаны с формированием монослоя оксида высшей степени окисления на границе с электролитом.

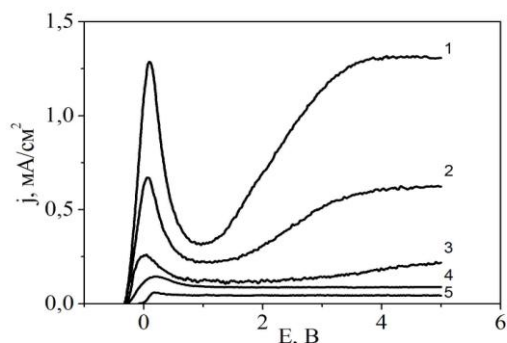


Рисунок 1 – Потенциодинамические анодные зависимости тантала, которые получены в растворах (моль·дм⁻³):
1) 1 H₂SO₄ + 1 HF; 2) 1 H₂SO₄ + 0,5 HF;
3) 1 H₂SO₄ + 0,25 HF; 4) 1 H₂SO₄ + 0,1 HF; 5) 1 H₂SO₄

Приведенные кривые показывают увеличение тока в диапазоне потенциалов от - 0,08 до + 0,45 В, что соответствует образованию барьерной пленки на тантале. В электролитах 1 и 2 следующий рост тока, соответствующий росту пористого оксида, намного выше, чем в растворах 3 и 4. Такое поведение системы можно объяснить тем, что скорость растворения центров активной поверхности в этих электролитах преобладает над скоростью образования АОП.

Как отмечалось ранее, варьируя состав раствора и режим анодирования, во время электрохимического образования АОП на тантале можно получить кристаллическую структуру оксида. При использовании электролита на основе органических соединений

формирование кристаллического оксида отличается от описанного выше (рис. 2). На кривых отсутствует спад тока, соответствующий пассивации поверхности, так как барьерный слой превращается в кристаллический оксид. Образование нанопористого кристаллического оксида тантала происходит в вольтстатическом режиме. Приведенные поляризационные зависимости (рис. 2) показывают влияние состава электролита на основе органических соединений на процесс образования кристаллического оксида тантала.

Время от начала анодирования до увеличения тока, протекающего через систему Ta – Ta₂O₅ – электролит, соответствует разрушению АОП барьерного типа и развитию кристаллов (рис. 3).

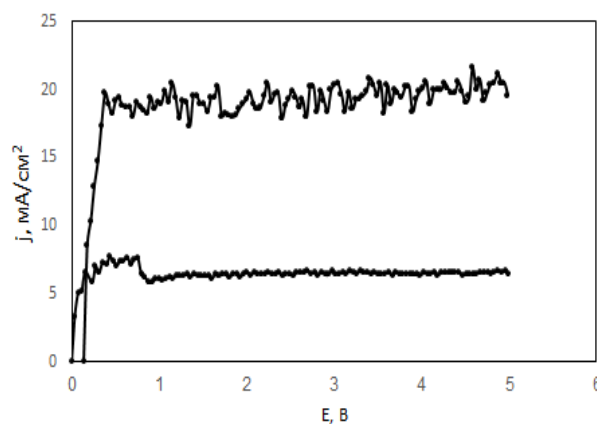


Рис. 2 – Потенциодинамические зависимости тантала, которые получены в растворах (моль·дм⁻³):
(верхняя кривая) EG + 5.5 H₂O + 0.05 H₃PO₄ + 0.8 NH₄F;
(нижняя кривая) EG + 5.5 H₂O + 0.05 H₃PO₄ + 0.8 NaF

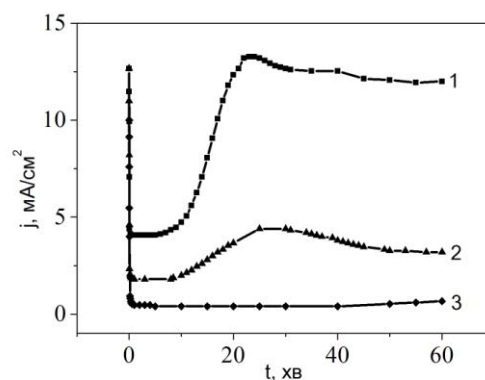


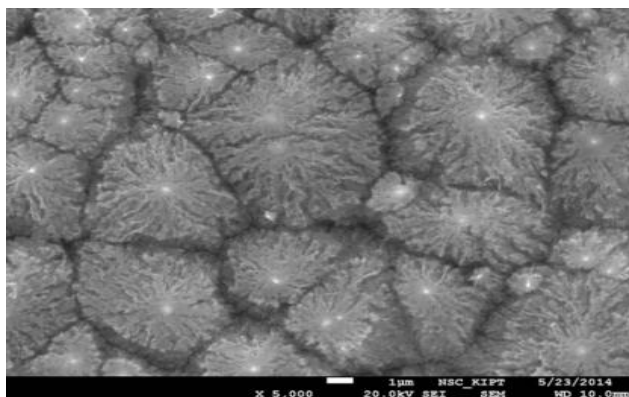
Рис. 3 – Хроноамперограммы танталовых электродов, синтезированных в различных условиях: при 80 В, в растворах (моль·дм⁻³): 1 – 1 H₂SO₄ + 2 HF; 2 – 1 H₂SO₄ + 1 HF; 3 – 1 H₂SO₄ + 0,5 HF

Такой период роста кристаллов называется инкубационным. По мере увеличения напряжения анодирования инкубационный период уменьшается, что указывает на высокую скорость развития кристаллической фазы.

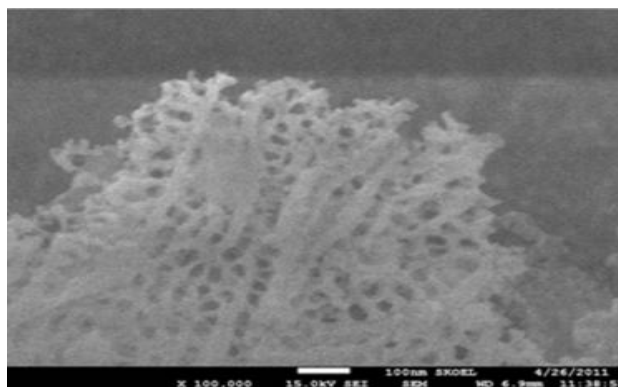
Процесс формирования оксидного покрытия кристаллической структуры при анодном окислении

тантала описывается следующим образом: первая стадия представлена образованием АОП, барьерного типа. Под действием сильного электрического поля зародыши кристаллической фазы разрушают аморфный барьерный слой, и постепенно вся поверхность образца покрывается оксидом кристаллической структуры.

СЭМ – анализ показал, что морфология таких покрытий представляет собой набор неправильных конических многогранников, состоящих из игольчатых кристаллов (рис. 4, а). Такие кристаллы радиально расходятся от центра многогранника и образуют развитую поверхность оксидного слоя. Неправильная форма является результатом различной скорости роста секторов. Морфология оксида тантала, полученного в органическом электролите $EG + 5.5 H_2O + 0.05 H_3PO_4 + 0.8 NH_4F$, имеет иную кристаллическую структуру, что соответствует отличиям на поляризационных кривых (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4 – СЭМ поверхности оксидного покрытия, полученного на тантале при $U = 80$ В, $T = 2$ ч, которые получены в растворах (моль \cdot dm^{-3}): а – $H_2SO_4 + 0,5 HF$; б – $EG + 5.5 H_2O + 0.05 H_3PO_4 + 0.8 NH_4F$

Выводы. Таким образом, проведенные исследования показали влияние природы электролита на формирование пористого кристаллического оксида тантала. Использование активатора фтор ионов и электролитов различной природы позволяет на начальной стадии анодирования обеспечивать условия для формирования оксида с различной морфологией поверхности. Варьируя режимом анодирования можно син-

тезировать пористые АОП на тантале аморфного или кристаллического типов. Для получения кристаллического пористого оксида тантала с развитой поверхностью, целесообразно использовать органический апротонный электролит состава – $EG + 5.5 H_2O + 0.05 H_3PO_4 + 0.8 NH_4F$.

Список литературы

1. Lee, S (2004). Texture, structure and phase transformation in sputter beta tantalum coating. Surface and Coatings Technology. pp. 177-178.
2. Holleman, A. F., Wiberg, E., Wiberg, N. (2007). Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102nd ed.
3. Одынец Л. Л., Орлов В. М. Анодные оксидные пленки. / Л.Л. Одынец, В.М. Орлов – Ленинград: Наука, 1990. – 200 с.4.
4. Nageh K. Allam Self-Assembled Fabrication of Vertically Oriented Ta₂O₅ Nanotube Arrays, and Membranes Thereof, by One-Step Tantalum Anodization/ Xinjian J. Feng, and Craig A. Grimes // Electrochemical and Solid-State letters. – 2007. – V. 10, № 4. – pp. 31 – 33.
5. Электрохимический синтез нанопористого оксида ниобия и тантала / Л. В. Ляшок, С. А. Водолажченко [и др.] // Современные электрохимические технологии и оборудование, 24-25 ноября 2016 г. - Минск : БГТУ, 2016. - С. 289-292.
6. Байрачный Б. И., Андриющенко Ф.К. Электрохимия вентильных металлов / Б.И. Байрачный, Ф.К. Андриющенко. – Х: «Вища школа». Издательство при Харьковском университете, 1985. – 144 с.
7. Skaja, K. et al. Avalanche-discharge-induced electrical forming in tantalum oxide-based metal-insulator-metal structures. Advanced Functional Materials 25, 7154–7162 (2015).
8. Кундозерева Т. В. Униполярное резистивное переключение в структурах на основе оксидов ниобия, тантала и циркония: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. физико-матем. наук: спец. 01.04.04 «Физическая электроника» / Т.В. Кундозерева. – Петрозаводск, 2013. – 25 с.
9. Foell H., Leisner M., Cojocary A., Carstensen J. Macroporous semiconductors / H. Foell, M. Leisner, A. Cojocary, J. Carstensen // Materials. – 2010. – V. 3, № 5. – pp. 3006 – 3076.
10. Schmuki P. Self-Organized oxide nanotube layers on titanium and other transition metals / P. Schmuki // Nanostructure Science and Technology. – 2009. – V. 7. – pp. 435 – 466.
11. Буянова В.С. Импедансная спектроскопия электрохимических материалов / Е. С. Буянова, Ю. В. Емельянова. – Екатеринбург: «Уральский государственный университет им. А. М. Горького», 2008. – 70 с.
12. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. Ed. E. Barsoukov, J. Ross Macdonald. N. Y., Wiley. 2005.

Reference (transliterated)

1. Lee, S (2004). Texture, structure and phase transformation in sputter beta tantalum coating. Surface and Coatings Technology. pp. 177-178.
2. Holleman, A. F., Wiberg, E., Wiberg, N. (2007). Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102nd ed.
3. Odyinets L. L., Orlov V. M. Anodnyie oksidnyie plenki. / L.L. Odyinets, V.M. Orlov – Leningrad: Nauka, 1990. – 200 s.4.
4. Nageh K. Allam Self-Assembled Fabrication of Vertically Oriented Ta₂O₅ Nanotube Arrays, and Membranes Thereof, by One-Step Tantalum Anodization/ Xinjian J. Feng,§ and Craig A. Grimes*, // Electrochemical and Solid-State letters. – 2007. – V. 10, № 4. – pp. 31 – 33.
5. Elektrohimicheskiy sintez nanoporistogo oksida niobiya i tantala / L. V. Lyashok, S. A. Vodolazhchenko [i dr.] // Sovremennyye elektrohimicheskie tehnologii i oborudovanie, 24-25 noyabrya 2016 g. - Minsk : BGTU, 2016. - S. 289-292.
6. Bayrachnyiy B. I., Andryuschenko F.K. Elektrohimiya ventilynih metallov / B.I. Bayrachnyiy, F.K. Andryuschenko. – H: «Vischa shkola». Izdatelstvo pri Harkovskom universitete, 1985. – 144 s.
7. Skaja, K. et al. Avalanche-discharge-induced electrical forming in tantalum oxide-based metal-insulator-metal structures. Advanced Functional Materials 25, 7154–7162 (2015).
8. Kundozereva T. V. Unipolyarnoe rezistivnoe pereklyuchenie v strukturah na osnove oksidov niobiya, tantala i tsirkoniya: avtoref.

- dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. fiziko-matem. nauk: spets. 01.04.04 «Fizicheskaya elektronika» / T.V. Kundozereva. – Petrozavodsk, 2013. – 25 s.
9. Foell H., Leisner M., Cojocary A., Carstensen J. Macroporous semiconductors / H. Foell, M. Leisner, A. Cojocary, J. Carstensen // Materials. – 2010. – V. 3, № 5. – pp. 3006 – 3076.
10. Schmuki P. Self-Organized oxide nanotube layers on titanium and other transition metals / P. Schmuki // Nanostructure Science and Technology. – 2009. – V. 7. – pp. 435 – 466.
11. Buyanova V.S. Impedansnaya spektroskopiya elektrohimicheskikh materialov / E. S. Buyanova, Yu. V. Emelyanova. – Ekaterinburg: “Uralskiy gosudarstvennyiy universitet im. A. M. Gorkogo”, 2008. – 70 s.
12. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. Ed. E. Barsoukov, J. Ross Macdonald. N.Y., Wiley. 2005.

Надійшла (received) 19.03.19.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Водолажченко Сергій Олександрович (Водолажченко Сергей Александрович, Vodolazhchenko Serghii Alexandrovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5923-0228>; e-mail: sergiko113@gmail.com.

Ляшок Лариса Василівна (Ляшок Лариса Васильевна, Lyashok Lirisa Vasil'evna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри Технічна електрохімія; м. Харків, Україна; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7943-647X>; e-mail: ljaschok-lv@rambler.ru.

Дерибо Светлана Германовна (Дерибо Світлана Германівна, Deribo Svitlana Germanivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Технічна електрохімія; м. Харків, Україна ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>; e-mail: sgd2408@gmail.com.

Гомозов Валерій Павлович (Гомозов Валерий Павлович, Gomozov Valerij Pavlovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Технічна електрохімія; м. Харків, Україна; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-2014-0919>; e-mail: vp.gomozov@gmail.com.