

В. В. ДУДИЧ, Л. П. ТОМАШЕВИЧ, А. В. ШЕВЕРДЕНКО, Г. Д. АРТЮШКЕВИЧ

## САМООРГАНИЗАЦИЯ ЯЧЕЕК ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА АНОДИРОВАНИЯ

Процесс пористого анодирования алюминия используется для темплатного синтеза различных наноструктурированных материалов, а также при изготовлении различных электронных изделий. Проведено исследование процесса локального электрохимического анодирования алюминия в водном растворе серной кислоты. Анализ полученной структуры с помощью растрового электронного микроскопа показал, что она имеет пористую структуру, в которой достигается рекордное значение степени упорядочивания гексагональных ячеек. Степень упорядочивания данных структур составляет 95–98 %. Показано, что степень упорядочивания гексагональных ячеек увеличивается при увеличении анодного напряжения электрохимического процесса и толщины формируемых анодных пленок. Данный показатель открывает новые возможности для развития нанотехнологий, в частности, для темплатного синтеза наноструктурированных материалов.

Локальное пористое анодирование алюминия отличается от обычного пористого анодирования тем, что электрохимический процесс проводится не по всей поверхности алюминия, а по части поверхности, незакрытой маскирующим покрытием [1–4]. Данный процесс используется для формирования встроенной алюминиевой металлизации интегральных схем и различных полупроводниковых приборов [5–12].

При локализации процесса анодирования, за счет эффективного теплоотвода, выделяющегося джоулевого тепла, можно использовать более высокие значения анодного напряжения и анодной плотности тока, что в конечном итоге обеспечивает высокую степень самоупорядочивания гексагональных ячеек пористого оксида.

В данной работе пористый оксид алюминия формировали в водном растворе серной кислоты (0,1 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) при напряжениях формовки 20–50 В. В качестве анодируемого материала использовалась алюминиевая фольга с маскирующим покрытием из ниобиевой пленки, осажденной на алюминий через теньевую маску. Структуру сформированного оксида исследовали при помощи растрового электронного микроскопа. Оценку уровня самоупорядочивания ячеек ( $K_{\text{рег}}$ ) пористого оксида алюминия осуществляли методом вычисления количества ячеек с пентагональной, гексагональной и гентагональной организацией по формуле:

$$K_{\text{рег}} = \frac{n_6}{n} \cdot 100 \% = \frac{(n - n_5 - n_7)}{n} \cdot 100 \%,$$

где  $n_5$  – количество ячеек с пентагональной организацией;

$n_6$  – количество ячеек с гексагональной организацией;

$n_7$  – количество ячеек с гентагональной организацией;

$n$  – количество всех ячеек.

На рисунке 1 представлены фотографии продольного и поперечного сечений трубчатого оксида алюминия толщиной 100 мкм, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. Данный оксид был получен методом локального электрохимического анодирования в электролите на основе водного раствора серной кислоты. Из данного рисунка видно, что большинство ячеек граничит с шестью соседними ячейками, т. е. имеют гексагональную структуру. Ячейки, не имеющие шести соседей, считаются дефектными. Данные ячейки на рисунке 1 отмечены пятиугольником. Из рисунка видно, что степень упорядочивания гексагональных структур

пористого оксида алюминия, который получен в электролите на основе водного раствора серной кислоты, составляет 95–98 %.

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента регулярности формируемых пленок пористого оксида алюминия от их толщины при различных напряжениях формовки. Как видно из рисунка, при увеличении толщины формируемых пленок коэффициент регулярности увеличивается до значений 90–98 %. Увеличение напряжения формовки также способствует увеличению коэффициента регулярности.

В заключении следует отметить, что самоупорядоченные пленки оксидов вентильных металлов используются при темплатном синтезе различных наноматериалов [13; 14]. Полученные в данной работе пленки пористого оксида алюминия показали высокое значение коэффициента регулярности, что открывает новые возможности для развития нанотехнологий с использованием темплатного синтеза.

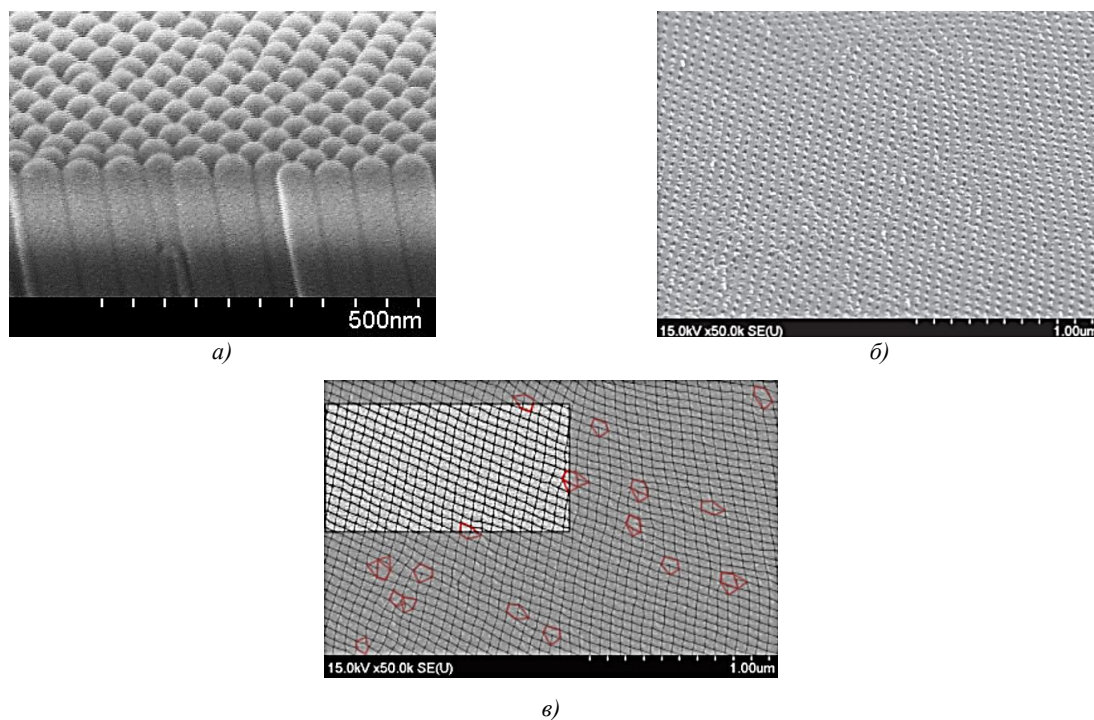


Рисунок 1 – Фотографии, полученные с помощью РЭМ, пористого оксида алюминия, сформированного в водном растворе серной кислоты: а – продольное сечение; б – поперечное сечение; в – поперечное сечение после идентификации дефектных ячеек (прямоугольный домен показывает участок гексагональных (бездефектных) ячеек)

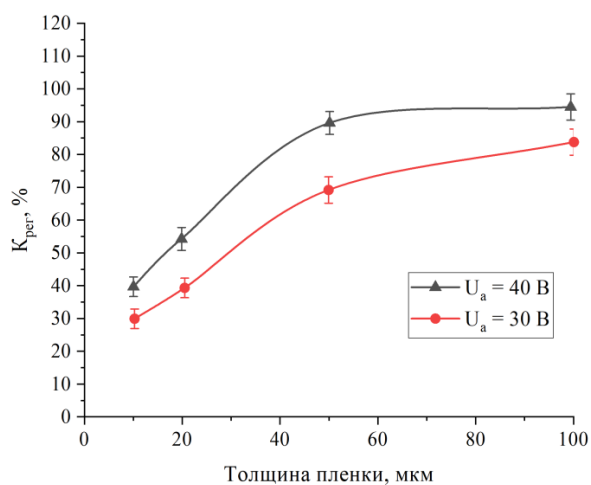


Рисунок 2 – Зависимость  $K_{\text{рег}}$  ячеек пористого оксида алюминия от толщины формируемой плёнки для различных напряжений формовки

*Список литературы*

1. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. World Scientific Press. – 2013. – P. 355–358.
2. Lazarouk, S. K. Effect of the local electric field on the formation of an ordered structure in porous anodic alumina / S. K. Lazarouk, P. S. Katsuba, A. A. Leshok, V. B. Vysotskii // *Technical Physics*. – 2015. – № 60. – P. 1343–1347.
3. Lazarouk, S. K. Formation of Tubular Aluminum Oxides by. Local Electrochemical Anodization in Organic Electrolytes and Their Anti – Reflection Properties / S. K. Lazarouk [et al.] // *Doklady BGUIR*. – 2024. – Vol. 21, № 6. – P. 21–28.
4. Lazarouk, S. K. Structure and element composition of anodic alumina films formed in high concentrated sulfuric electrolyte / O. V. Kupreeva, V. B. Vysotski, A. I. Chavychelau, A. S. Letoho // *Doklady BGUIR*. – 2014. – Vol. 81, № 3. – P. 5–11.
5. Lazarouk, S. K. Efficiency of Avalanche Light – Emitting Diodes Based on Porous Silicon / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, V. A. Labunov, V. E. Borisenko // *Semiconductors*. – 2005. – Vol. 39, № 1. – P. 136–138.
6. Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al – Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n – Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maiello // *MRS Online Proceedings Library Archive*. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.
7. Lazarouk, S. Electroluminescence from Aluminum – Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped n – Type Polysilicon / S. K. Lazarouk, V. Bondarenko, S. La Monica, G. Maello, G. Masini, P. Pershukevich, A. Ferrari // *Thin Solid Films*. – 1996. – Vol. 276. – P. 296–298.
8. Katsuba P. Stable Electroluminescence of Nanostructured Silicon Embedded into Anodic Alumina / P. Katsuba, P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Smirnov // *Physica E: Low – dimensional Systems and Nanostructures*. – 2009. – Vol. 41. – P. 931–934.
9. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk [et al.] // *Materials Science and Engineering: B*. – 2000. – № 69. – P. 114–117.
10. 3D silicon photonic structures based on avalanche LED with interconnections through optical interposer / S. K. Lazarouk [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. – 2019. – Vol. 18, № 3–4. – P. 1940091.
11. Lazarouk, S. K. Room – temperature formation of erbium – related luminescent centers in anodic alumina / S. K. Lazarouk, A. V. Mudryi, V. E. Borisenko // *Applied physics letters*. – 1998. – Vol. 73, № 16. – P. 2272–2274.
12. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk [et al.] // *Semiconductors*. – 2007. – Vol. 41. – P. 1109–1112.
13. Lazarouk, S. Porous and pillar structures formed by. anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk, A. Muravski, D. Sasinovich, V. Chigrinov, H. S. Kwok // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46, № 10R. – P. 6889.
14. Lazarouk, S. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / S. Lazarouk [et al.]. – 2018. – Vol. 427. – P. 649–655.

The process of porous anodization of aluminum is used for template synthesis of various nanostructured materials, as well as in the production of various electronic devices. A study was conducted on the process of localized electrochemical anodization of aluminum in an aqueous solution of sulfuric acid. Analysis of the resulting structure using a scanning electron microscope showed that it possesses a porous structure, achieving a record level of ordering in hexagonal cells. The degree of ordering of these structures is 95–98 %. It was shown that the degree of ordering hexagonal cells increases with an increase of the anode voltage at the electrochemical process and the thickness of the formed anode films. This indicator opens new opportunities for the development of nanotechnology, particularly for the template synthesis of nanostructured materials.

*Дудич Владислав Валерьевич*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, dudich@bsuir.by.

*Томашевич Леонид Павлович*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, lenya.tomashevich.forps@mail.ru.

*Шеверденко Алексей Викторович*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, 375257699525@inbox.ru.

*Артюшкевич Глеб Дмитриевич*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, glebarf61@gmail.com.

Научный руководитель – *Лазарук Сергей Константинович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, serg@nano.bsuir.edu.by.