

## **Зависимость удельной поверхности пористых оксидов вентильных металлов от их геометрических параметров**

Л. П. Томашевич, В. В. Дудич, С. М. Иванюта, А. В. Шеверденко, Г. Д. Артюшкевич

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220013 Минск, Беларусь*

*E-mail: saratnik101@gmail.com*

Пористые оксиды вентильных металлов (алюминия, титана, ниобия и др.) применяются в качестве функциональных компонентов интегральной электроники [1,2]. На их основе

создают диэлектрические слои [3,4], светопроводящие структуры [5,6] и формозадающие матрицы для темплатного синтеза [7]. Указанные пористые пленки обладают структурой типа пчелиных сот, которая состоит из гексагональных ячеек с цилиндрической порой в центре каждой ячейки [8-9].

Основными структурными параметрами таких оксидов являются расстояние между центрами пор ( $D_{int}$ ) и диаметр пор ( $d_{por}$ ). Варьируя эти параметры, можно получать различные типы структур: низкопористые (пористость 1–50%), высокопористые (51–90%), а также столбчатые (91–99%) (Рис. 1).

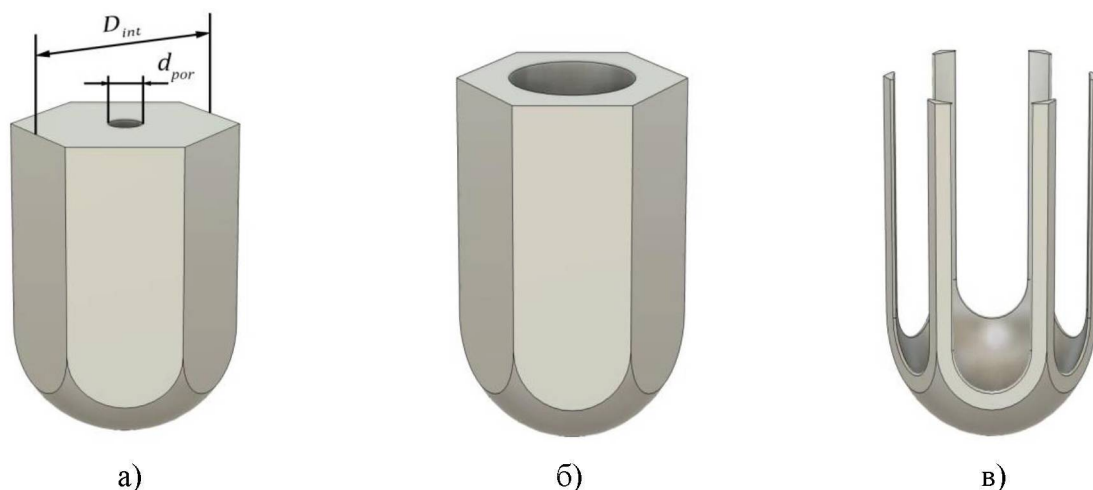


Рис. 1. Схематичное изображение гексагональных ячеек пористых оксидов вентильных металлов: а) ячейка с низкой пористостью (пористость 1–50%); б) ячейка с высокой пористостью (пористость 51–90%); в) ячейка со столбчатой структурой (пористость более 90%).

Важной характеристикой пористых пленок выступает их удельная (внутрипоровая) поверхность. На основе параметров, указанных на Рис. 1, выведены формулы для расчета объемной доли пор (пористости  $P$ ) и удельной поверхности ( $S_{sp}$ ).

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{d_{por}^2}{D_{int}^2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$S_{sp} = \frac{1}{D_{int}} \cdot \sqrt{\frac{8\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{P}{100\%}}. \quad (2)$$

В случае  $d_{por} = D_{int}$  происходит переход от структуры «пчелиных сот» к столбчатой структуре, как показано на Рис. 1. При этом  $S_{sp}$  достигает максимального значения. Пористость в момент перехода составляет 90,7% и обозначается как  $P_{tr}$ . При дальнейшем росте пористости расчет  $S_{sp}$  выполняется по следующей формуле:

$$S_{sp} = S_{sp \max} \cdot \left(1 - \frac{P - P_{tr}}{100\% - P_{tr}}\right). \quad (3)$$

На Рис. 2 представлена зависимость удельной поверхности исследуемых пленок от их пористости для структур с разным межпоровым расстоянием. Из рисунка видно, что удельная поверхность возрастает с уменьшением межпорового расстояния и достигает максимума при увеличении диаметра пор и сокращении расстояния между ними. При этом максимальное значение  $S_{sp}$  наблюдается при пористости около 90%. Дальнейшее повышение пористости за счет растворения стенок гексагональных ячеек приводит к снижению удельной поверхности, что обусловлено переходом от структуры гексагональных ячеек (пчелиных сот) к столбчатой структуре с центрами столбиков в точках соединения трех ячеек, как схематично изображено

на Рис. 1.

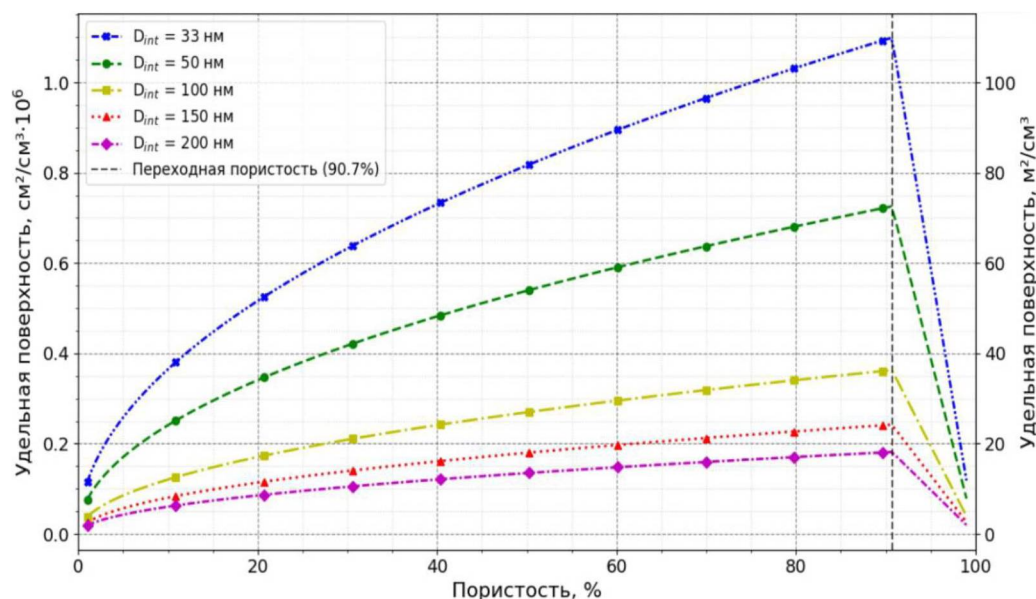


Рис.2. График зависимости удельной поверхности пористых пленок с гексагональной структурой от структурных параметров составляющих их ячеек.

Достигнутое значение удельной поверхности пористого оксида с гексагональной структурой (около  $100 \text{ м}^2/\text{см}^3$ ) представляет интерес для материалов, используемых в качестве фотокатализаторов химических реакций. Например, пористый оксид титана применяется для очистки воды от органических загрязнений [10]. Пористый оксид алюминия с минимальной пористостью может служить теплоотводящим слоем для алюминиевых электродов, работающих при высоких плотностях тока, что повышает надежность электронных устройств [11]. Возможность формирования столбчатых структур с пористостью 91–99% позволяет создавать анизотропные слои с уникальными оптическими и термическими свойствами. Такие структуры могут выступать в качестве эффективных барьерных слоев или матриц для направленного роста наноразмерных материалов [12,13]. Дальнейшее развитие метода анодирования предполагает переход от однослойных структур к многослойным композитам с градиентом пористости, что обеспечит плавное согласование теплофизических и оптических характеристик на границах раздела сред. Реализация подобных архитектур открывает новые горизонты в проектировании интегральных схем с улучшенным теплоотводом и многофункциональных оптоэлектронных устройств.

### Литература.

1. Lazarouk, S.K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S.K. Lazarouk, A.A. Leshok, T.A. Kozlova, A.V. Dolbik, L.D. Vi, V.K. Ilkov, V.A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3-4. – P. 1940091.
2. Лазарук, С.К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С.К. Лазарук, А.А. Лешок, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, №. 1. – С. 149-152.
3. Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H.S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390–4394.
4. Lazarouk, S. Porous alumina as low- $\epsilon$  insulator for multilevel metallization / S Lazarouk, S Katsouba, A Leshok, A Demianovich, V Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, V. Ponomar // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50 (1-4). – P. 321-327.
5. 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.
6. 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.
  7. Nguyen, J. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / J. Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lazarouk, D.H. Manh, D.L. Vu, S. Chung, J. Akerman, V. Altynov, A. Maximenko // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 427. – P. 649-655.
  8. Lazarouk, S.K. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, V.V. Dudich, A.S. Lazarouk, V.E. Borisenko // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 2100691.
  9. 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.
  10. Liang, K. Fabrication of double-walled titania nanotubes and their photocatalytic activity / K. Liang, B. K. Tay, O. V. Kupreeva, T. I. Orekhovskaya, S. K. Lazarouk, V. E. Borisenko // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2014. – Vol. 2 (4). – P. 991-995.
  11. Lazarouk, S.K. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, P. S. Katsuba, V. A. Labunov, A. A. Leshok, V. E. Borisenko // *Semiconductors*. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109-1112.
  12. Jaguiro, P. Porous silicon avalanche LEDs and their applications in optoelectronics and information displays / P Jaguiro, P Katsuba, S Lazarouk, A Smirnov // *Acta Physica Polonica A*. – 2007. – Vol. 112 (5). – P. 1031-1036.
  13. Jaguiro, P. Si-based emissive microdisplays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, M. Farmer, A. Smirnov // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 927-930.