

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

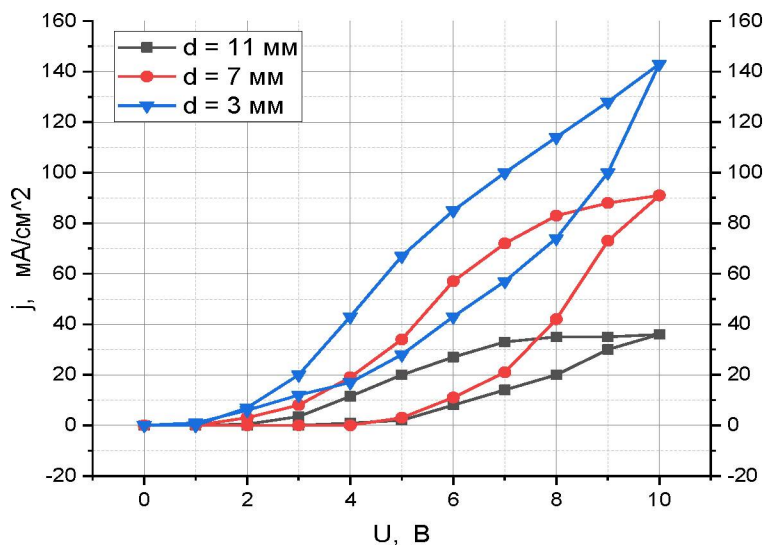
**ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ ПЛЁНОК ТИТАНА НА ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОГО ПРОЦЕССА**

Исследуется влияние локализации электрохимического анодирования титановых пленок (толщиной 0,3–0,4 мкм на кремниевых подложках) на характеристики анодного процесса. Анодирование проводилось в 1 %-м водном растворе NaCl в потенциодинамическом режиме (скорость развертки 0,2 В/с до 10 В) с использованием ячеек диаметром 3, 7 и 11 мм. Вольтамперные характеристики (ВАХ) демонстрируют значительное увеличение плотности анодного тока (более чем в 4 раза при 10 В при уменьшении площади с 1 см<sup>2</sup> до 7 мм<sup>2</sup>), объясняемое краевыми эффектами сгущения линий тока в электролите высокого сопротивления (>0,5 Ом/м). Обнаруженный эффект актуален для анодирования вентильных металлов при высоких плотностях тока (>100 мА/см<sup>2</sup>), где газообразные продукты вызывают реактивную тягу. Удельная энергия окисления титана превосходит энергию сгорания углеводородов, открывая перспективы создания нано- и микродвигателей для перемещения микрообъектов в жидких средах.

Электрохимическое анодирование металлических пленок используется при формировании элементов полупроводниковых приборов и интегральных схем [1-7]. Для формирования заданного рисунка элементов процесс анодирования металлических пленок проводится с использованием маски, то есть электрохимическое анодирование проводится локально в местах, незащищенных маскирующим покрытием. В данной работе приведено исследование влияния локализации электрохимического анодирования титана на характеристики анодного процесса.

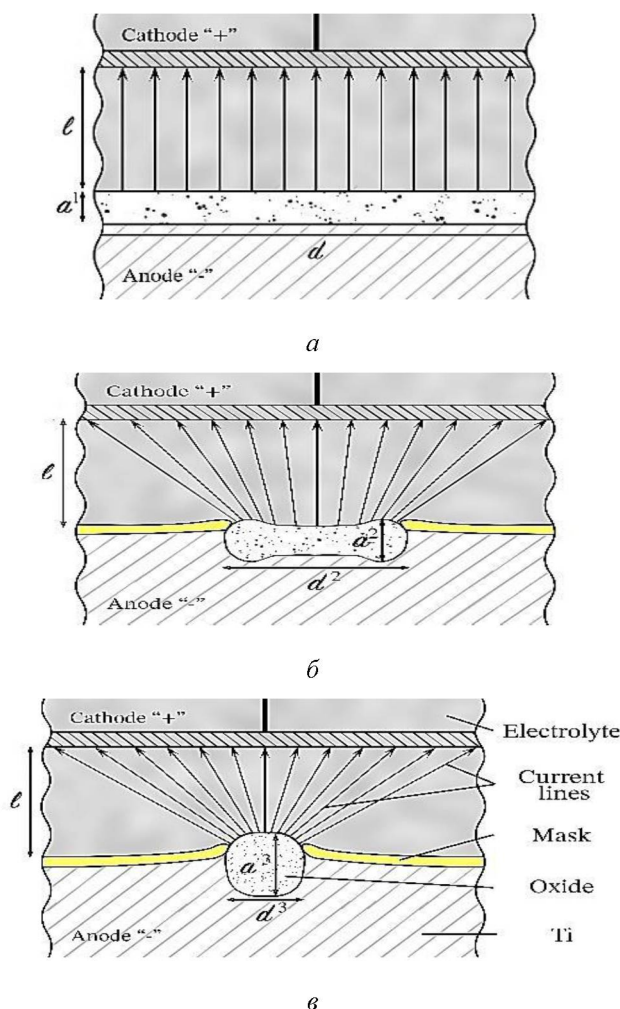
В качестве исходных образцов использовались пленки титана толщиной 0,3–0,4 мкм, осажденные на кремниевые подложки магнетронным распылением титановой мишени. Электрохимическое анодирование титановых пленок проводилось в 1% водном растворе NaCl в электрохимических ячейках с круглой формой обрабатываемой металлической поверхности. При этом диаметр обрабатываемой поверхности составлял 3, 7 и 11 мм в зависимости от ячейки. Процесс анодирования проводился в потенциостатическом режиме со скоростью развертки напряжения формовки 0,2 В/сек с ростом напряжения до 10 В. Плотность тока анодного процесса регистрировалась как при росте напряжения, так и при его спаде.

На рисунке 1 представлены вольтамперные характеристики процесса локального электрохимического анодирования титана в 1% водном растворе хлористого натрия в ячейках с различным значением диаметра круглой площади обрабатываемой титановой поверхности. Как видно из рисунка, локальная площадь обрабатываемой поверхности сильно влияет на вольтамперные характеристики исследуемого анодного процесса. Уменьшение обрабатываемой площади с 1 см<sup>2</sup> до 7 мм<sup>2</sup> приводит к увеличению плотности анодного тока более чем в 4 раза для анодного напряжения 10 В. Данное явление объясняется краевыми эффектами сгущения линий тока при локализации электрохимического процесса, как это схематично представлено на рисунке 2.



**Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики процесса локального электрохимического анодирования титана в 1 %-м водном растворе хлорида натрия в ячейках с различным значением диаметра**

Если при анодной обработке больших площадей линии тока параллельны друг другу (рисунок 2а), то при локализации анодного процесса сгущение линий наблюдается на краях обрабатываемых участков (рисунок 2б). Дальнейшее уменьшение площади анодируемых участков приводит к более заметному эффекту сгущения линий тока как это показано на рисунке 2в. Особенно заметно действие описанного явления наблюдается в электролитах высокого удельного сопротивления, к которым относится исследуемый электролит (более 0,5 Ом/м).



**Рисунок 2 – Схематическое изображение краевых эффектов сгущения линий тока при анодной обработке:**  
**а – параллельные линии на больших площадях; б – сгущение на краях локализованных участков;**  
**в – усиленное сгущение на малых площадях**

Увеличением сопротивления всей исследуемой системы объясняется различие вольт-амперных характеристик при росте напряжения формовки от аналогичных характеристик при спаде напряжения формовки. Последние характеристики имеют более низкие значения плотности тока, что объясняется влиянием анодного оксида, который появился на поверхности титана во время развертки анодного напряжения до 10 В. Отмеченный эффект наблюдается для всех проведенных экспериментов с различным диаметром обрабатываемой металлической поверхности.

Обнаруженный эффект имеет значение для электрохимических процессов анодирования вентиляльных металлов при высоких плотностях анодного тока. В частности, как было обнаружено [8] при плотностях анодного тока более 100 мА/см<sup>2</sup> газообразные продукты реакции, выходящие из внутриворонного пространства вызывают реактивную тягу, что может быть использовано для разработки нано- и микродвигателей, обеспечивающих перемещение нано- и микросистем в жидких средах.

Важно отметить, что удельная энергия, выделяемая в процессе окисления вентиляльных материалов, превосходит аналогичную энергию, выделяемую при окислении (сгорании) углеводородов [9-11].

Таким образом локализация процесса электрохимического анодирования титана открывает новые возможности для разработки нано- и микро систем, способных преобразовывать энергию окисления в механическую энергию, обеспечивающую передвижение нано- и микро объектов в жидких средах.

## Список литературы

1. 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.
2. 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.
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. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukovich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
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. Spherical plasmoids formed upon the combustion and explosion of nanostructured hydrated silicon / S. K. Lazarouk, A.V. Dolbik, V. A. Labunov, V. E. Borisenko // JETP letters. – 2007. – Vol. 84 (11). – P. 581–584.
10. Chelyadinsky, A. R. Deformation of porous silicon lattice caused by absorption/desorption processes / A. R. Chelyadinsky, A. M. Dorofeev, N. M. Kazuchits, S. La Monica [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. – 1997. – Vol. 144 (4). – P. 1463–1468.
11. Томашевич, Формирование трубчатого пористого оксида титана электрохимическим анодированием в хлорсодержащих электролитах / Л. П. Томашевич, А. В. Шверденко, Г. Д. Артюшкевич, В. В. Дудич / Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апр. 2025 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 105–108.

The paper investigates the influence of localization of electrochemical anodization of titanium films (0.3–0.4  $\mu\text{m}$  thick on silicon substrates) on the characteristics of the anodic process. Anodization was carried out in a 1% aqueous NaCl solution in potentiodynamic mode (scan rate of 0.2 V/s up to 10 V) using cells with diameters of 3, 7, and 11 mm. The current-voltage characteristics (I-V characteristics) demonstrate a significant increase in the anode current density (more than 4 times at 10 V with a decrease in area from 1  $\text{cm}^2$  to 7  $\text{mm}^2$ ), explained by the edge effects of current line thickening in a high-resistance electrolyte ( $>0.5 \text{ Ohm/m}$ ). The discovered effect is relevant for anodizing valve metals at high current densities ( $>100 \text{ mA/cm}^2$ ), where gaseous products cause reactive thrust. The specific energy of titanium oxidation exceeds the combustion energy of hydrocarbons, opening up prospects for the creation of nano- and micro-engines for moving micro-objects in liquid media.

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

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

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

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

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