

Изменение вольтамперных характеристик электрохимического оксидирования титана при локализации анодного процесса

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

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013
Минск, Беларусь

E-mail: lenya.tomashevich.forps@mail.ru

Введение. Электрохимическое анодирование металлических пленок является важным инструментом при формировании структур полупроводниковых приборов и интегральных схем [1–7]. Для получения требуемого топологического рисунка элементов процедура анодирования проводится в режиме локальной обработки: маскирующее покрытие защищает часть поверхности, тогда как анодный процесс осуществляется только в открытых участках. В данной работе рассматривается влияние локализации электрохимического окисления титана на параметры анодного процесса.

1 Эксперимент. В экспериментах использовались титановые пленки толщиной 0.3–0.4 мкм, нанесенные методом магнетронного распыления титановой мишени на кремниевые подложки. Анодирование осуществляли в 1 % водном растворе NaCl при помощи электрохимических ячеек с круглой рабочей зоной на металлической поверхности. Диаметр этой зоны составлял 3, 7 и 11 мм в зависимости от конфигурации ячейки. Процесс проводился в потенциалостатическом режиме со скоростью развертки напряжения 0.2 В/с при повышении напряжения до 10 В. Плотность тока фиксировалась как при увеличении, так и при последующем снижении анодного напряжения.

2 Результаты. На Рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики локального электрохимического анодирования титана в 1 % водном растворе хлористого натрия для ячеек с различными диаметрами рабочей поверхности. Анализ зависимости показывает, что размер локальной зоны обработки оказывает выраженное влияние на форму и уровень тока. При уменьшении площади с 1 см² до 7 мм² плотность анодного тока при напряжении 10 В возрастает более чем в 4 раза. Подобное поведение связано с краевыми эффектами, связанными с перераспределением линий тока при ограничении области анодирования, что схематически отражено на Рис. 2.

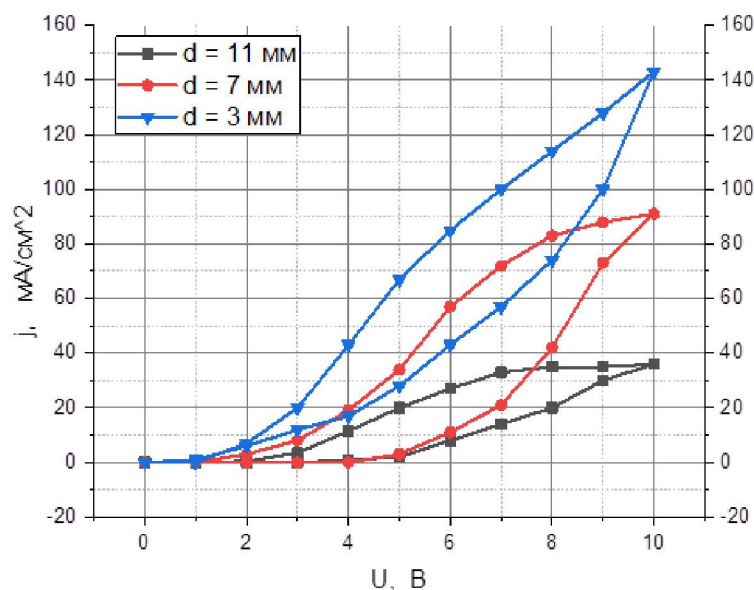


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики процесса локального электрохимического анодирования титана в 1% водном растворе хлорида натрия в ячейках различным значением диаметра.

На Рис. 2а показана ситуация, когда анодирование охватывает большую площадь и линии тока распределены приблизительно параллельно. При локализации анодного процесса, представленной на Рис. 2б, линии тока концентрируются по краям обрабатываемого участка. Дальнейшее уменьшение площади анодируемой зоны, как это показано на Рис. 2в, усиливает эффект сгущения токо-проводящих путей. Особенно заметным описанный эффект становится в электролитах с высоким удельным сопротивлением, к которым относится исследуемый раствор (более 0.5 Ом·м).

Различие вольт-амперных характеристик при нарастании и спаде напряжения формовки связано с ростом общего сопротивления системы. Характеристики, полученные при уменьшении напряжения, демонстрируют более низкие значения плотности тока, что обусловлено влиянием уже сформированного анодного оксида на поверхности титана. Аналогичный эффект наблюдается во всех экспериментах независимо от диаметра обрабатываемой металлической поверхности.

Полученные результаты представляют интерес для процессов анодирования вентильных металлов при высоких плотностях тока. Как показано ранее, при значениях плотности тока свыше 100 мА/см² газообразные продукты реакции, выделяющиеся из пор анодного оксида, создают реактивную тягу, которую можно использовать при разработке нано- и микродвигателей, способных перемещать нано- и микросистемы в жидких средах.

Следует отметить, что удельная энергия, выделяемая при электрохимическом окислении вентильных материалов, существенно превышает энергию, выделяемую при окислении (сгорании) углеводородов [9–11].

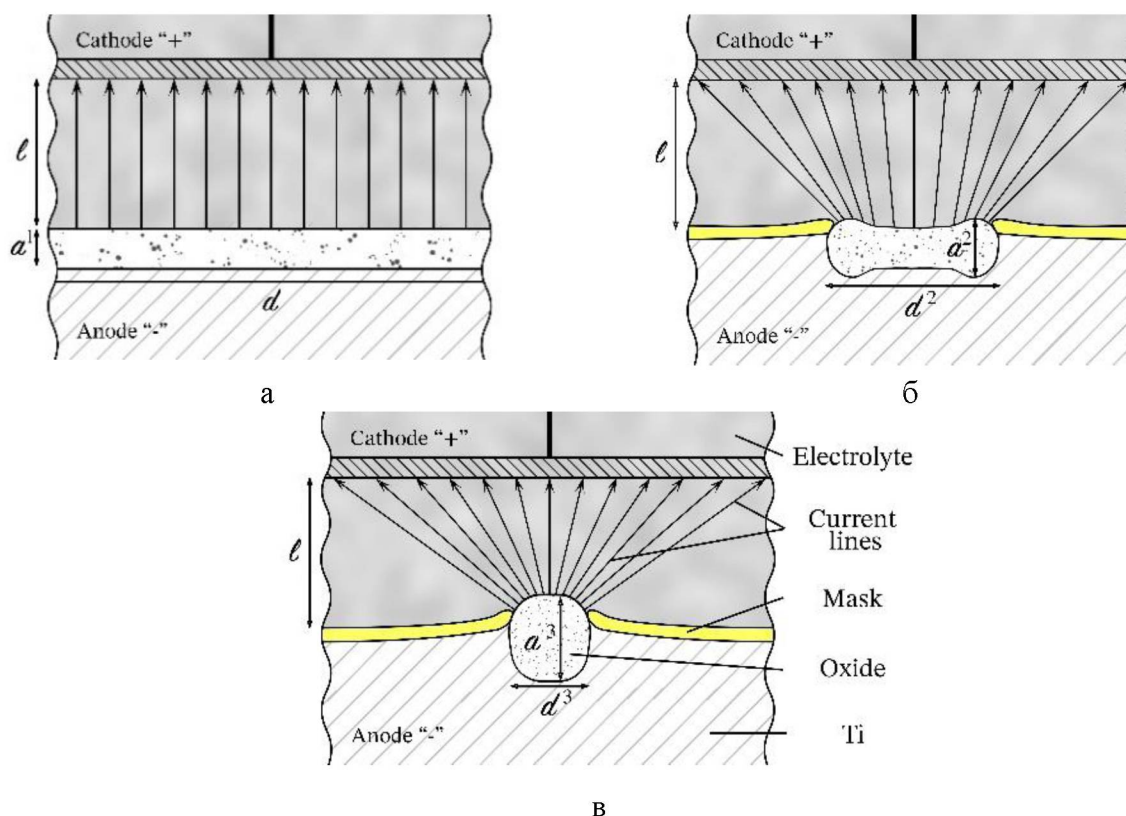


Рис. 2. Схематическое изображение краевых эффектов сгущения линий тока при анодной обработке: а – параллельные линии на больших площадях; б – сгущение на краях локализованных участков; в – усиленное сгущение на малых площадях.

Заключение. Управление степенью локализации электрохимического анодирования титана открывает новые возможности для создания нано- и микросистем, работающих за счет преобразования энергии окисления в механическую, обеспечивающую направленное движение нано- и микрообъектов в жидких средах.

Литература.

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. Pershukevich, 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 / AR Chelyadinsky, AM Dorofeev, NM Kazuchits, S La Monica [etc.] // Journal of the Electrochemical Society.– 1997. – Vol. 144 (4). – P. 1463-1468.
11. Формирование трубчатого пористого оксида титана электрохимическим анодированием в хлорсодержащих электролитах / Л. П. Томашевич, А. В. Шеверденко, Г. Д. Артюшкевич, В. В. Дудич / Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апреля 2025 г. / Гродненский государственный университет им. Я. Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко [и др.]. – Гродно, 2025. – С. 105–108.