

# ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ НАНОПРОВОДОВ ПЕРЕМЕННОЙ МОРФОЛОГИИ

*Касаткин М. В., Федосенко В. С.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Горох Г. Г. – канд. техн. наук*

В ходе проведения исследования проверена возможность перехода между разными диаметрами пор анодного оксида алюминия (АОА) в процессе роста пленки АОА. Отработана методика создания перехода между разными диаметрами. Созданы и исследованы пленки АОА с переменным диаметром пор. Выявлен недостаток перехода с меньшего диаметра пор на больший и предположен механизм его работы.

Поскольку АОА имеют хорошо упорядоченную наноразмерную структуру и относительно просты в изготовлении, сфера их применения касается большого количества научных областей, таких как: шаблоны для изготовления нанотрубок или нанопроводов, мембранная фильтрация с последующей функционализацией, изготовление магнитных наноматериалов и оптических устройств и так далее.

Ввиду того, что на наноуровне действуют квантовые законы, любое изменение в составе или геометрии нанобъекта может привести к кардинальному изменению физических и химических свойств всей структуры. Это создает потребность в разработке более сложных структур (нанотрубки и нанопровода с разными диаметрами на разной высоте), для чего необходимо управлять геометрией нанопор АОА в процессе создания пленки оксида алюминия.

Пленки АОА с ветвящимися порами могут использоваться в качестве шаблонов для формирования углеродных нанотрубок [1] и металлических нанонитей с ветвлением.

В ходе проведения лабораторных опытов созданы образцы с большой и малой разницей между диаметрами пор. Так как СЭМ-изображения второго образца нерепрезентативные (на них почти

невозможно отличить слои с разным диаметром), рассмотрим образец с большой разницей между диаметрами пор, СЭМ-изображения которого представлены на рисунке 1.

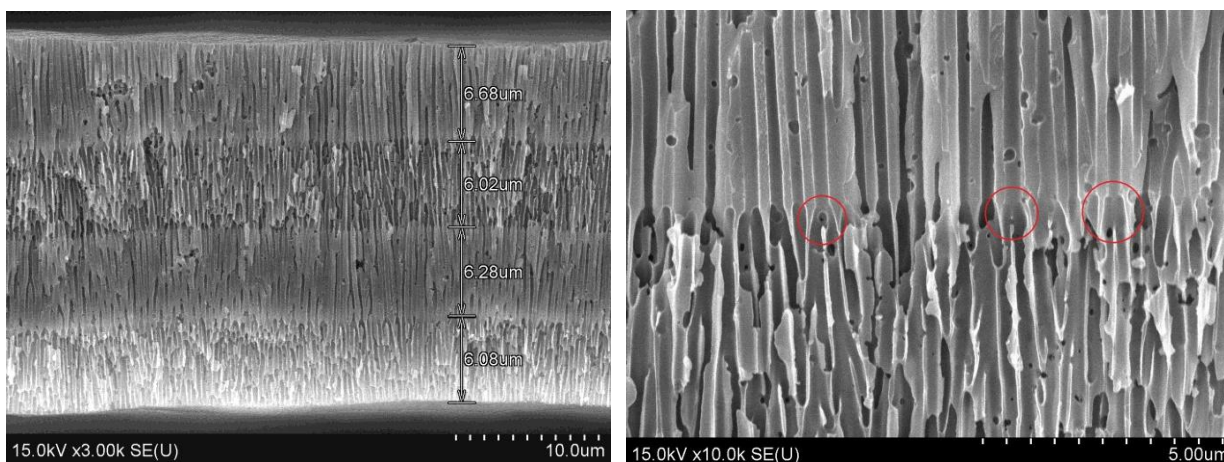


Рисунок 1 – СЭМ-изображения сечения АОА с переменным диаметром пор (слева) и перехода с большего диаметра на меньший (справа)

Анодировался образец алюминия невысокой чистоты (99,9 %). Создавались четыре слоя глубиной по 5 мкм без учета толщины переходов. Диаметр пор, как и другие геометрические параметры пор, определяется напряжением анодирования, которое и регулировалось в процессе выращивания слоя АОА. Так как один электролит подходит для анодирования в узком диапазоне напряжений, то для разных слоев изготавливались отдельные электролиты, которые заменялись на переходах между слоями. В результате реализованы переходы между 212 В (винная кислота 0,6 М) и 150 В (ортофосфорная кислота 1 %).

Кинетика анодирования образца представлена на рисунках 2 и 3. Первый и третий слой (212 В) формировались при постоянном токе ( $6 \text{ mA/cm}^2$ ), а второй и четвертый (150 В) при постоянном напряжении. Переходы с большего диаметра на меньший формировались следующим образом. Ток ограничивался до  $1 \text{ mA/cm}^2$ , вследствие чего напряжение плавно уменьшалось до стационарного значения для соответствующей плотности тока (винная кислота 0,6 М), примерно до 193 В (см. рисунок 3, первая половина первого и третьего переходов). После этого процесс останавливался, электролиты заменялись, ограничение по току снова выставлялось  $6 \text{ mA/cm}^2$ , процесс возобновлялся, но напряжение сначала поднималось до предыдущего уровня (193 В), а затем уменьшалось и устанавливалось на уровне стационарного напряжения второго электролита (ортофосфорная кислота 1 %), до 150 В. Переход с меньшего диаметра на больший формировался просто заменой второго электролита на первый в самом начале перехода. При этом стоял предел по току  $6 \text{ mA/cm}^2$ , но так как стационарное напряжение для первого электролита выше, то при постоянном токе напряжение постепенно само поднималось до своей нормы.

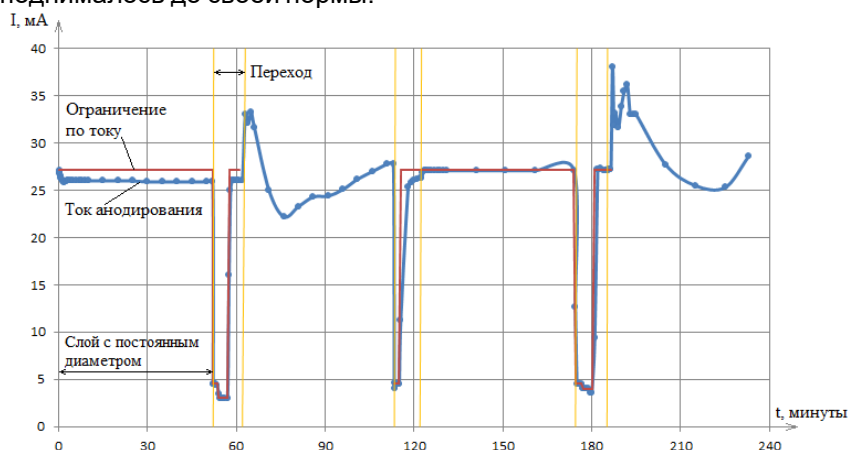


Рисунок 2 – Кинетика тока в процессе формирования АОА с разным диаметром пор

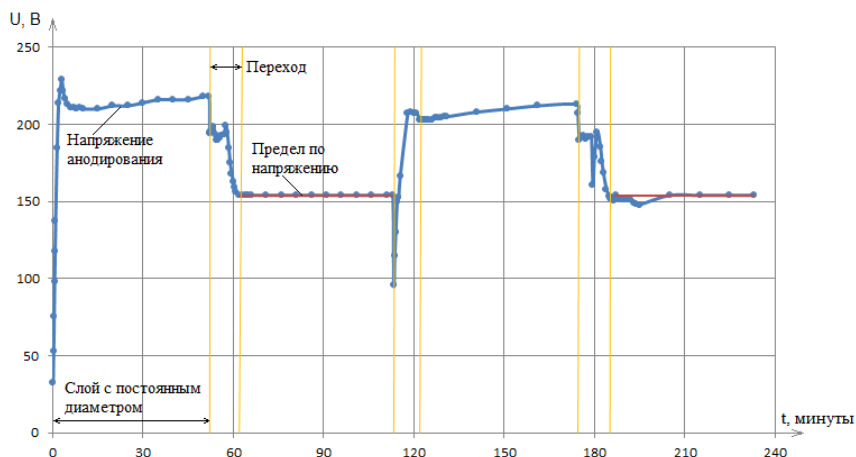


Рисунок 3 – Кинетика напряжения в процессе формирования АОА с разным диаметром пор

СЭМ-изображения образца показали, что при переходе с большего диаметра на меньший часть пор продолжает расти как и раньше, но сужаясь, а часть разветвляется (см. рисунок 1 (справа)). А при переходе с меньшего диаметра на больший часть пор продолжает расти, расширившись, а часть перестает расти (закупоривается) на произвольной глубине. Последний момент сильно вредит осаждению металлов в поры с разным диаметром [2], так как при осаждении поры должны быть открыты, чтобы с одной из сторон можно было сформировать контакт, к которому будут двигаться ионы осаждаемого материала, что обеспечивает высокое заполнение пор. Такое поведение пор можно объяснить тем, что между порами существует горизонтальная разность потенциалов, отталкивающая их друг от друга (которая и стремится распределить поры в равноудаленные шестигранники). При переходе на большее напряжение поры, которые раньше начали расширяться, своим горизонтальным полем препятствуют росту своих соседей, вследствие чего те со временем перестают расти. Возможно это и препятствует объединению пор, но эта гипотеза еще будет проверяться, когда эксперимент дойдет до стадии формирования массивов нанопроводов.

Данная работа выполнена в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь на 2021 год, утвержденного Министром образования 17 февраля 2021 года (ГБЦ № 21-3172М).

Авторы также выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение растровой электронной микроскопии образцов.

**Список использованных источников:**

1. *Synthesis of multi branched carbon nanotubes in porous anodic aluminum oxide template* / Y.C.Sui [et al.] // *Carbon*, 2001. – P. 1709–1715.
2. *Understanding Pore Rearrangement during Mild to Hard Transition in Bilayered Porous Anodic Alumina Membranes* / A. Santos // *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2011. – P. 1925–1932.