

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С ТРУБЧАТОЙ СТРУКТУРОЙ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, Т.И. Ореховская, О.В. Купреева,
А.В. Короткевич, В.В. Дудич, Л.П. Томашевич

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

Проведено исследование процесса локального электрохимического анодирования алюминия в различных электролитах. Показано, что при локальном анодировании алюминия могут быть достигнуты максимальные значения электрических режимов анодного процесса (анодное напряжение и плотность анодного тока) без риска термического пробоя в формируемых оксидных пленках. Установлены режимы анодного процесса, обеспечивающие формирование пористого оксида с трубчатой структурой. Для ряда электролитов на основе водных растворов малоновой, яблочной и лимонной кислот трубчатая структура получена впервые. Показано, что в пористом оксиде алюминия с трубчатой структурой достигается рекордное значение степени упорядочивания гексагональных ячеек. В частности, в электролите на основе водного раствора серной кислоты были сформированы пленки оксида с рекордной степенью упорядочивания гексагональных ячеек 98 %. Также получены прямоугольные фрагменты (участки) продольного сечения пористой структуры, состоящие только из гексагональных ячеек, количество которых достигает 360 ед., что также является максимальным значением в сравнении с известными опубликованными результатами.

Ключевые слова: оксид алюминия, высоковольтное анодирование, трубчатый оксид, наноструктуры, упорядоченные гексагональные структуры

FORMATION OF POROUS ALUMINUM OXIDE WITH A TUBULAR STRUCTURE IN VARIOUS ELECTROLYTES

S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, T.I. Orekhovskaya, O.V. Kupreeva,
A.V. Korotkevich, V.V. Dudich, L.P. Tomashevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

The process of local electrochemical anodizing of aluminum in various electrolytes was studied. The maximum values of the electrical anodizing modes (anode voltage and anode current density) can be reached with local anodizing of aluminum without the risk of thermal breakdown effects in the formed oxide films. The anodic process modes, which ensure the

formation of a porous oxide with a tubular structure, are established. For a number of electrolytes based on aqueous solutions of malonic, malic and citric acids, the tubular structure was obtained for the first time. It is shown that in porous alumina with a tubular structure, a record value of the degree of ordering of hexagonal cells is achieved. In particular, in an electrolyte based on an aqueous solution of sulfuric acid oxide films were formed with a record regularity ratio exceeding 98 %. Rectangular fragments (sections) of the longitudinal section of the porous structure were also obtained, consisting only of hexagonal cells. The number of these cells reaches 360, which is also the maximum value in comparison with known analogues.

Keywords: aluminum oxide, high-voltage anodization, tubular oxide, nanostructure, ordered hexagonal structures

E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

Введение

Процесс пористого анодирования алюминия привлекает внимание исследователей из-за уникальных структурных и электрофизических свойств формируемого материала – пористого оксида алюминия [1–3]. Формируемые пленки анодного оксида алюминия состоят из гексагональных призм с порами в центрах и барьерного слоя, расположенного между порами и алюминием. Барьерный слой ограничен двумя сферическими поверхностями, одна из которых, это дно поры, а вторая – граница раздела алюминий-оксид алюминия. Самоупорядоченная гексагональная структура пористого оксида алюминия используется при темплатном синтезе различных наноматериалов [4]. Диэлектрические свойства этого материала используются при изготовлении изолирующих слоев различных полупроводниковых приборов [5–7] и интегральных микросхем [8, 9]. Высокая прозрачность оксида алюминия в видимом и инфракрасном диапазонах позволяет использовать его в волноводах различных оптоэлектронных устройств [10–12].

Особо следует отметить процесс высоковольтного (*high field*) пористого анодирования алюминия, обеспечивающий формирование пористого оксида алюминия с трубчатой структурой, которая обнаруживается при поперечных сколах формируемых пленок. Если в традиционной структуре пористого оксида алюминия типа «пчелиных сот» поперечный скол проходит через центры пор, то в трубчатых структурах скол проходит вдоль границ гексагональных ячеек, а отделившиеся от оксидной пленки гексагональные призмы приобретают форму трубок [13]. Высоковольтное анодирование обеспечивает уникальные структурные и электрофизические параметры, среди которых следует выделить высокую степень упорядоченности гексагональных ячеек [14].

К сожалению, до сих пор отсутствует системный анализ режимов формирования пористого оксида алюминия с трубчатой структурой для различных электролитов. Большая часть публикаций, посвященных этому материалу, отмечает фрагментарность формирования трубчатых структур, это означает, что такие структуры обнаруживаются не по всей обрабатываемой поверхности алюминия, а лишь в некоторых местах, например, локального термического пробоя, либо в местах выгорания алюминиевой поверхности, что свидетельствует о невозможности такого технологического процесса. Ранее нами было показано, что высоковольтное пористое анодирование может быть реализовано при локализации анодного процесса, которая достигается за счет проведения анодирования через маску с размерами открытых окон 1 мм и менее [15]. В этом случае увеличивается конвективная составляющая теплоотвода, что позволяет предотвратить нежелательные эффекты термического пробоя в формируемых пленках. В данной работе проведен анализ режимов локального пористого электрохимического анодирования

алюминия для различных электролитов с целью определения режимов, обеспечивающих формирование оксида с трубчатой структурой ячеек.

Материалы и методы исследований

В качестве исходного материала для экспериментальных образцов использовались алюминиевая фольга толщиной 50 мкм и алюминиевые пленки толщиной до 2 мкм, осажденные магнетронным распылением алюминиевой мишени на кремниевые подложки. Для формирования маски на алюминиевую поверхность при помощи магнетронного распыления ниобиевой мишени осаждали пленку ниобия толщиной до 0,4 мкм. Далее при помощи стандартных операций фотолитографии формировали фоторезистивную маску с заданным рисунком, после при помощи плазмохимического травления в атмосфере SF₆-газа вытравливали незащищенный маской ниобий, формируя тем самым маскирующее покрытие из ниобия. Затем фоторезистивную маску удаляли. Следует отметить, что описанный процесс формирования маскирующего покрытия на алюминии используется в технологии формирования встроенной алюминиевой металлизации микросхем, и более подробное его описание приведено в работах [8, 9].

Пористое электрохимическое анодирование алюминия проводили в электролитах на основе водных растворов различных кислот (серной, ортофосфорной, щавелевой, малоновой, яблочной, винной и лимонной кислот) в комбинированном режиме. Первая стадия в потенцио-динамическом режиме с разверткой анодного напряжения со скоростью 1 В/сек до заданного значения, после чего процесс проводили в потенциостатическом режиме.

Особо следует отметить процессы электрохимического анодирования, когда локализация анодного процесса достигается автоматически без использования маски. В частности, при анодировании алюминиевых изделий с размерами хотя бы в одном направлении менее 1 мм достигается желаемый эффект увеличения доли конвективной составляющей теплоотвода. Поэтому электрохимическое анодирование алюминиевой проволоки диаметром менее 1 мм обеспечивает преимущества локального процесса. Также реализуется локализация анодного процесса при менисковом анодировании за счет ограниченных размеров менисковой области. В этом случае задается только анодное напряжение формовки и скорость погружения алюминиевой поверхности в электролит. Более подробно процесс менискового анодирования был описан нами в работе [16].

Структурные параметры формируемых оксидов исследовали при помощи оптической и электронной микроскопий.

Результаты разработки, исследований и их обсуждение

Известно, что анодная обработка алюминия с рабочей площадью более 1 мм² в очищенной воде при анодных напряжениях до 1600 В приводит к образованию оксида плотного (беспористого) типа толщиной до 16 нм. При увеличении анодного напряжения свыше 1600 В (1800–2000 В) происходит пробой анодного оксида и его разрушение [17]. Совсем по другому механизму происходит анодная обработка алюминия с рабочей площадью менее 1 мм². На рис. 1 представлены полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) микрофотографии анодного оксида алюминия, сформированного в деионизованной воде на алюминиевой проволоке диаметром 1 мм и 50 мкм.

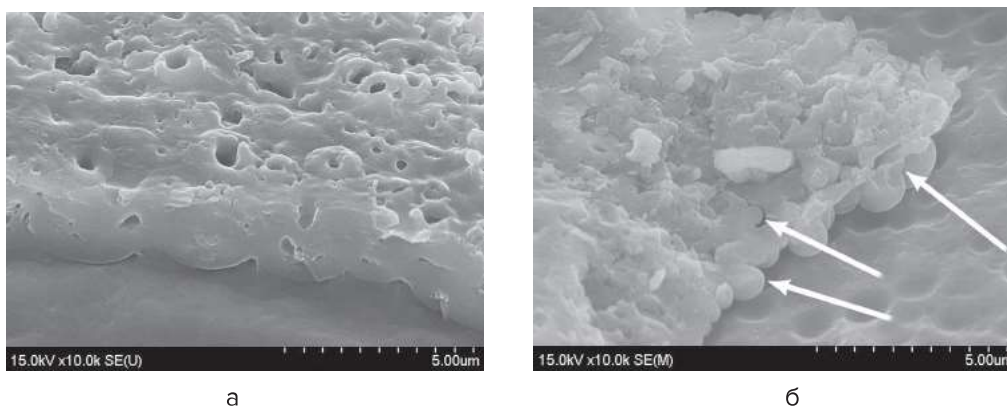


Рис. 1. РЭМ-фотографии пористого оксида алюминия, сформированного на алюминиевой проволоке в деионизованной воде:

- а – диаметр проволоки 1 мм, анодное напряжение 1200 В, время анодного процесса 30 мин;
- б – диаметр проволоки 50 мкм, анодное напряжение 1100 В, время анодного процесса 30 мин

Оксид алюминия, сформированный на алюминиевой проволоке диаметром 1 мм при анодном напряжении 1200 В, имеет ячеистую пористую структуру типа «пчелиных сот» (рис. 1 а). Более подробно условия формирования таких структур описаны в работах [18]. Оксид алюминия, сформированный на алюминиевой проволоке диаметром 50 мкм при анодном напряжении 1100 В, имеет гибридную пористую структуру. Большая часть сформированного оксида – это ячеистая структура типа «пчелиных сот», но среди традиционных ячеек появляются фрагменты, имеющие трубчатую структуру (показаны стрелками) (рис. 1 б).

Еще более значительные изменения структуры анодного оксида алюминия происходят при анодировании алюминиевой поверхности с микронными размерами обрабатываемых областей. На рис. 2 представлена микрофотография поперечного сечения анодного оксида алюминия, сформированного в деионизованной воде локальным анодированием алюминиевой пленки с ниобиевой маской. Сформированный таким образом оксид алюминия имеет трубчатую структуру. Отметим, что для трубчатых структур характерны следующие особенности. Во-первых, поперечное сечение при раскалывании оксида проходит через границы гексагональных ячеек. Во-вторых, для трубчатых структур характерны низкая пористость менее 5 %, коэффициент объемного роста более 2, пиковый центральный угол барьерного слоя более 60° и коэффициент формовки гексагональной ячейки менее 2 нм/В [19].

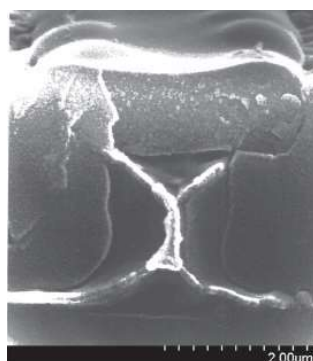


Рис. 2. РЭМ-фотография поперечного сечения пористого оксида алюминия, сформированного в деионизованной воде локальным анодированием алюминиевой пленки через ниобиевую маску при анодном напряжении 1000 В

Таким образом, вышеприведенные результаты показали, что локализация электрохимического анодного процесса при высоких анодных напряжениях на алюминиевой поверхности способствует формированию пористого оксида алюминия с трубчатой структурой. При этом следует отметить, что преимущества локального анодирования проявляются при анодной обработке алюминиевых поверхностей с характерным размером 1 мм и менее [14, 19]. При этом, чем меньше характерный размер, тем больше конвективная часть теплоотвода по отношению к кондуктивной части отвода выделяющегося в процессе тепла. Локализация анодного процесса позволяет избежать катастрофических процессов, связанных с термическим пробоем в формируемых пленках.

Нами установлены режимы анодного процесса, при которых формируется пористый оксид с трубчатой структурой в различных электролитах. В табл. 1 приведены состав электролита, значения анодного напряжения и плотности анодного тока, при которых появляются фрагменты структур трубчатого типа. По нашим сведениям, режимы формирования оксидов с трубчатой структурой в электролитах на основе малоновой, яблочной и лимонной кислот приводятся впервые (рис. 3). Также следует отметить, что режимы формирования трубчатого оксида алюминия в деионизованной воде ранее не публиковались. Нами были выбраны для исследований наиболее распространенные известные электролиты. При необходимости такие исследования могут быть проведены и для других электролитов, в которых формируется пористый оксид алюминия с традиционной структурой типа «пчелиных сот».

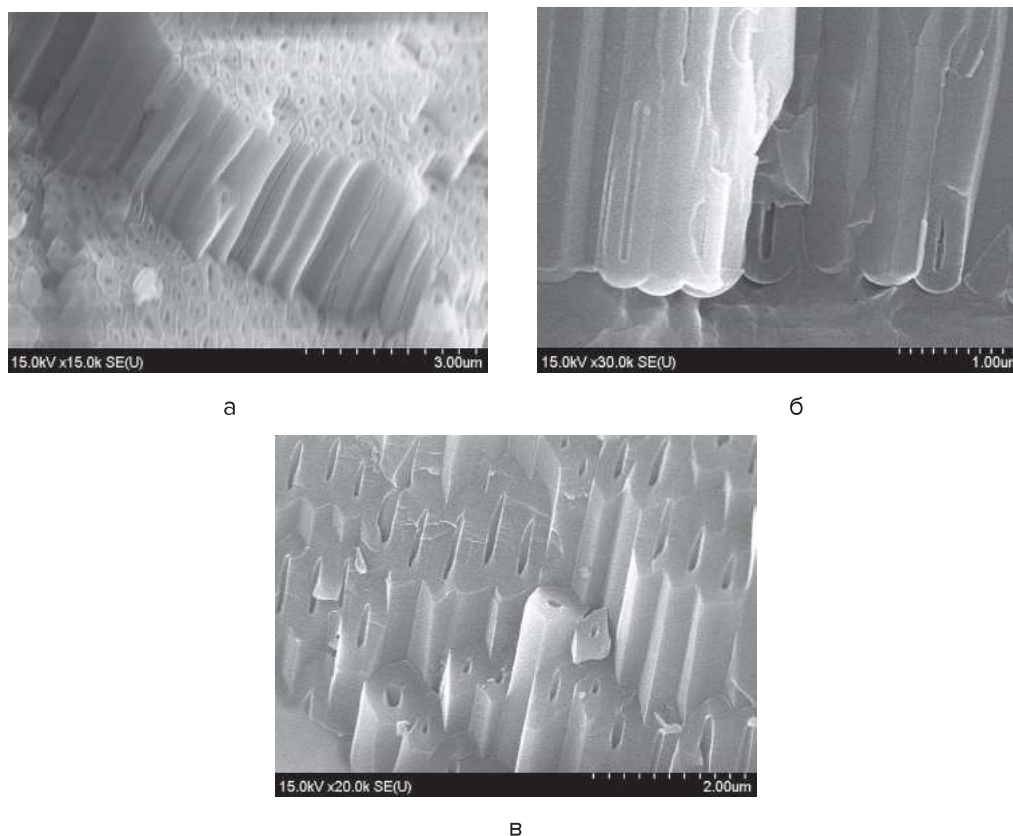


Рис. 3. Микрофотографии пористого оксида алюминия с трубчатой структурой, сформированного локальным анодированием в водных растворах различных органических кислот:
а – 0,5 М водный раствор малоновой кислоты, анодное напряжение 220 В;
б – 0,5 М водный раствор яблочной кислоты, анодное напряжение 270 В;
в – 0,5 М водный раствор лимонной кислоты, анодное напряжение 340 В

Табл. 1

Режимы локального электрохимического анодирования алюминия, при которых формируется пористый оксид с трубчатой структурой

Электролит	Концентрация	Анодное напряжение, В	Анодная плотность тока, мА/см ²	Характерный размер, мм	Литература
Деионизованная вода	100 %	1100	>100	<0,15	–
Водный раствор серной кислоты	6,3 М 1,0 М 0,1 М	>15 >30 >35	>70 >100 >150	<1 <1 <1	[14, 19]
Водный раствор ортофосфорной кислоты	1,5 М 0,4 М	>100 >200	>100 >100	<1 <1	[15]
Водный раствор щавелевой кислоты	0,5 М	>200	>100	<1	[20]
Водный раствор малоновой кислоты	0,5 М	>200	>200	<1	–
Водный раствор яблочной кислоты	0,5 М	>250	>150	<1	–
Водный раствор винной кислоты	1,0 М	>300	>200	<1	[21]
Водный раствор лимонной кислоты	1,0 М	>400	>200	<1	–

Кроме вышеотмеченных оригинальных структурных параметров трубчатые структуры обладают важным структурным свойством – высоким уровнем самоупорядочивания гексагональных ячеек. На рис. 4 представлены микрофотографии поперечного и продольного сечений трубчатого оксида алюминия толщиной 100 мкм, сформированного в электролите на основе водного раствора серной кислоты. Как видно из рисунка, значительная часть ячеек имеет гексагональную структуру, т. е. они граничат с шестью соседними ячейками. Те ячейки, которые не соответствуют данному структурному свойству, то есть имеют пять соседних ячеек, считаются дефектными. Такие ячейки на рис. 4 обозначены пятиугольником. В работах [22, 23] было предложено оценивать степень упорядочивания (R_r – *regularity ratio*) гексагональной структуры пористого оксида алюминия как отношение количества гексагональных ячеек к общему количеству ячеек. Количественная оценка степени упорядочивания гексагональных структур пористого оксида алюминия, сформированного в электролите на основе 2 % водного раствора серной кислоты, достигает 95–98 %. Полученный диапазон значений превышает аналогичный параметр, достигнутый другими авторами [22–24]. При этом важно отметить размер выборки ячеек (общее количество ячеек), обрабатываемой в процессе оценки степени упорядочивания. В нашем случае размер выборки превышает 1000 (около 1400 ячеек). Чем больше размер выборки, тем больше достоверность получаемых результатов.

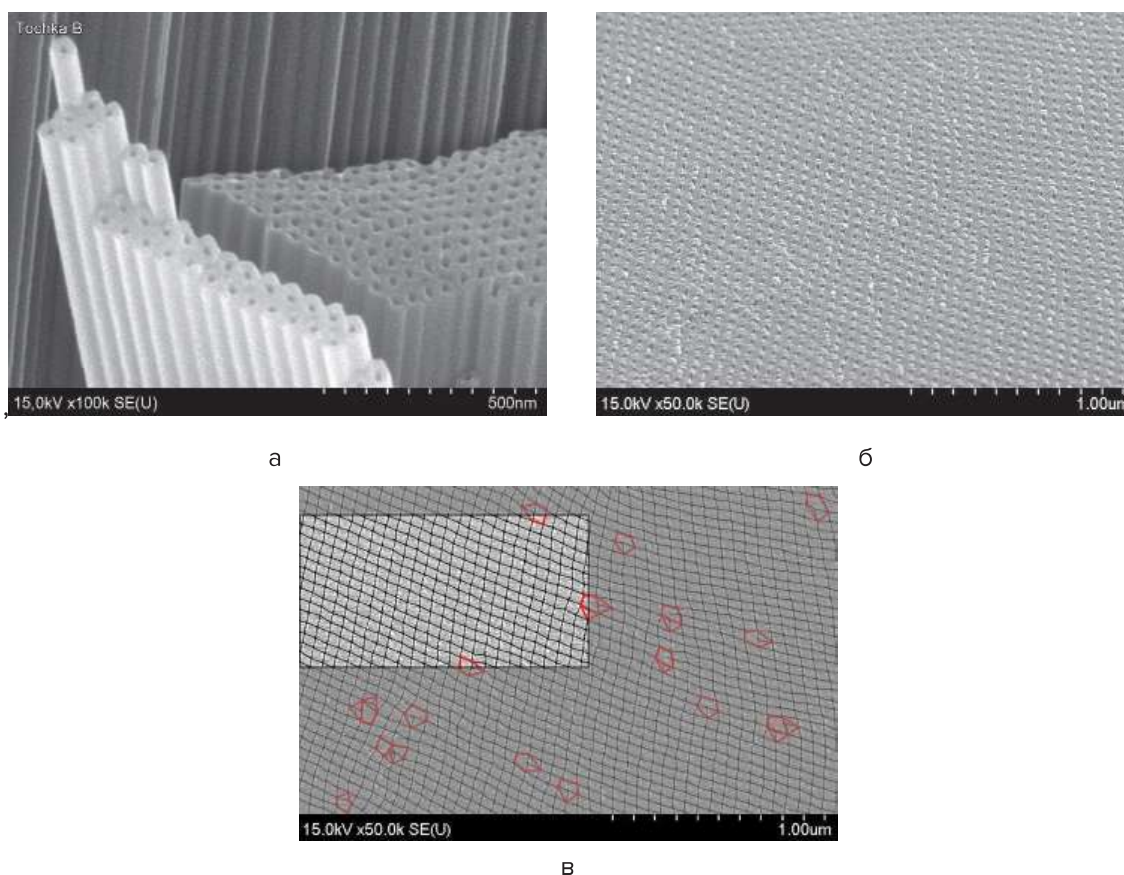


Рис. 4. РЭМ-фотографии пористого оксида алюминия с трубчатой структурой, сформированного в водном 0,2 М растворе серной кислоты при анодном напряжении 40 В: а – фрагмент сформированной структуры с поперечным и продольным сечениями; б – фрагмент сформированной структуры с продольным сечением параллельным исходной поверхности; в – фрагмент сформированной структуры с продольным сечением после идентификации дефектных ячеек

На рис. 4, в светлым фоном выделен прямоугольный фрагмент структуры, имеющий 100%-ную гексагональную структуру. То есть он состоит только из гексагональных ячеек. Количество таких ячеек внутри данного фрагмента составляет около 360. Параметр, соответствующий максимальному количеству гексагональных ячеек внутри прямоугольного фрагмента поперечного сечения структуры пористого оксида алюминия ($K_{\text{rec}}^{\text{max}}$), может также характеризовать уровень упорядочивания формируемой структуры. Анализ литературы по способам получения упорядоченных гексагональных структур пористого оксида алюминия показывает, что достигнутые нами значения параметра $K_{\text{rec}}^{\text{max}}$ на уровне 300–360 ячеек являются рекордными в сравнении с ранее опубликованными результатами.

Таким образом, локальное анодирование алюминия позволяет получать структуры пористого оксида алюминия, обладающие уникальными структурными параметрами, к которым можно отнести высокую степень упорядочивания гексагональной структуры (до 98 %), максимальное количество гексагональных ячеек внутри прямоугольного фрагмента поперечного сечения $K_{\text{rec}}^{\text{max}}$ (до 360 ячеек), пиковый центральный угол барьерного слоя до 90°, коэффициент объемного роста пористого оксида более 2.

Кроме вышеотмеченных уникальных структурных параметров следует отметить и другие уникальные эффекты и явления, наблюдаемые в процессе локального пористо-

го анодирования алюминия, которые имели место в отдельных электролитах [14, 19], а в процессе проведения данных исследований также наблюдались и в других электролитах, в которых формировались слои пористого оксида алюминия с трубчатой структурой.

К таким эффектам и явлениям следует отнести анизотропию процесса анодирования (различные скорости анодирования в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно поверхности алюминия). За счет анизотропного роста пористого оксида алюминия можно формировать алюминиевые межсоединения интегральных микросхем с субмикронными размерами элементов [8, 25]. Формирование пористого оксида с трубчатой структурой сопровождается интенсивным газовыделением из пор [19], что может быть использовано для изготовления нанодвигателей, обеспечивающих передвижение в жидких средах, а также при изготовлении генераторов нанопузырьков, обладающих уникальными свойствами. К таким свойствам следует отнести увеличение времени жизни нанопузырьков в жидкой среде до нескольких суток [26], способность очищать среду от органических загрязнений и дезинфицировать жидкую среду от патогенных бактерий [27, 28]. При этом важно отметить, что в наших исследованиях была достигнута рекордная скорость инъекции исследуемых пузырьков в электролит, достигающая 10 см/сек [19]. Кроме этого, упорядоченные металлические наноструктуры, состоящие из алюминиевых пиков, встроенных в анодный оксид алюминия, могут быть использованы при изготовлении наноплазмонных устройств [29] и трибоэлектрических наногенераторов [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что локализация процесса пористого анодирования алюминия позволяет достичь максимальных значений параметров процесса таких как анодное напряжение и плотность анодного тока. Проведение анодного процесса при максимальных значениях анодного напряжения позволяет получать уникальные структурные параметры формируемого пористого оксида алюминия. В первую очередь следует отметить формирование пористого оксида алюминия с трубчатой структурой. При формировании оксида алюминия с трубчатой структурой наблюдаются рекордные значения структурных параметров, таких как коэффициент объемного роста, пиковый центральный угол барьерного слоя, степень упорядочивания гексагональной структуры.

Кроме этого, при формировании пористого оксида алюминия наблюдаются уникальные эффекты и явления, к которым следует отнести анизотропию роста оксида в вертикальном и горизонтальном направлениях, интенсивную инъекцию газовых пузырьков в электролите, обеспечивающих реактивную тягу в обрабатываемых объектах относительно электролита, а также генерацию нанопузырьков в электролит. Обнаруженные эффекты и явления способны найти практическое применение при создании оригинальных технических устройств, а также при разработке инновационных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проекты N° T22B-002-011 и Ф22КИ-050).

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Lee, W. Porous anodic aluminum oxide: anodization and template synthesis of functional nanostructures / W. Lee, S. Park // *Cemical Reviews*. – 2014. – Vol. 114, No. 5. – 7487–7556 p.
2. Nanoporous alumina as templates for multifunctional applications / C. T. Sousa [et al.] // *Applied Physics Reviews*. – 2014. – Vol. 1. – P.031102. DOI : 10.1063/1.4893546.

3. Masuda H., Yanagishita T., Kondo T. Encyclopedia of Interfacial Chemistry. – 2018. – 226–235 p.
4. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / T. N. Anh Nguyen [et al.] // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – 649–655 p.
5. Visible electroluminescence from Al-porous silicon reverse bias diodes formed on the base of degenerate n-type silicon / S. Lazarouk [et al.] // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – 659–664 p.
6. Electroluminescence from aluminum-porous silicon reverse bias Schottky diodes formed on the base of highly doped n-type polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. – 1996. – Vol. 276. – 296–298 p.
7. Electroluminescence from Nanostructured Silicon Embedded in Anodic Alumina / S. K. Lazarouk [et al.] // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41, no 9. – 1109–1112 p.
8. Porous alumina as low- ϵ insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50, no. 4. – 321–327 p.
9. Reliability of built in aluminum interconnection with low- ϵ dielectric based on porous anodic alumina / S. Lazarouk [et al.] // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 44, no. 5. – 815–818 p.
10. Lazarouk, S. Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon / S. Lazarouk, P. Jaguiro, V. Borisenko // Physica of Status Solidi (a). – 1998. – Vol. 165. – 87–90 p.
11. Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon / S. K. Lazarouk [et al.] // Semiconductors. – 2005. – Vol. 39, no. 1. – 136–138 p.
12. Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro [et al.] // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41. – 1094–1096 p.
13. Fabrication of Ideally Ordered Nanoporous Alumina Films and Integrated Alumina Nanotubule Arrays by High-Field Anodization / S. Chu [et al.] // Advanced Materials. – 2005. – Vol. 17. – 2115–2119 p.
14. Effect of anodic voltage on parameters of porous alumina formed in sulfuric acid electrolytes / X. Huang [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – Vol. 41. – 62–68 p.
15. Lazarouk, S. K. High field porous anodization of aluminium films with a photolithographic mask / S. K. Lazarouk / in «Physics, Chemistry and Application of Nanostructures»: ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam. – Singapore: World Scientific Press, 2013. – 355–358 p.
16. Tubular alumina formed by anodization in the meniscal region / S. K. Lazarouk [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – 033527 p.
17. Aluminum Anodization in Deionized Water as Electrolyte / A. D. Lisenkov [et al.] // Journal Electrochemical Society. – 2016. – Vol. 163. – 364–368 p.
18. Ovechenko, D. S. Electroluminescence Spectra and Structure of Anodic Aluminum Oxide Upon Its Formation in Chemically Pure Water and Alcohols / D. S. Ovechenko, A. P. Boychenko // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129. – 375–384 p.
19. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S. K. Lazarouk [et al.] // Advanced Engineering Materials. – 2022. – Vol. 24, N° 1. – 2100691 p.
20. Formation and microstructures of unique nanoporous AAO films fabricated by high voltage anodization / Li Yi [et al.] // Journal of Materials Chemistry. – 2011. – Vol. 21. – 9661 p.
21. Fabrication of Graphene-Alumina Heterostructured Films with Nanotube Morphology / Arunas Jagminas [et al.] // Journal of Physical Chemistry C. – 2016. – Vol. 120, no. 17. – 9490 p.
22. Yazdizadeh, M. Characterizing and optimizing the electropolishing and pore arrangement in porous anodic aluminum oxide (AAO) / M. Yazdizadeh, A. Yelon, D. Menard // Journal of Porous Materials. – 2020. – Vol. 27. – 995–1002 p.
23. Roslyakov, I. V. Role of Electrode Reaction Kinetics in Self-Ordering of Porous Anodic

- Alumina / I. V. Roslyakov, E. O. Gordeeva, K. S. Napolskii // *Electrochimica Acta* Volume. – 2017. – Vol. 241. – 362–369 p.
24. Quantitative Analysis of the Grain Morphology in Self-Assembled Hexagonal Lattices / Reinald Hillebrand [et al.] // *ACS Nano*. – 2008. – Vol. 2, no. 5. – 913–920 p.
25. Anisotropy of aluminium porous anodization process / S. Lazarouk [et al.] // *Journal of Electrochemical Society*. – 1994. – Vol. 141. – 2556–2559 p.
26. Nirmalkar, N. On the Existence and Stability of Bulk Nanobubbles / N. Nirmalkar, A. W. Pacek, M. Barigou // *Langmuir*. – 2018. – Vol. 34, no. 37. – 10964–10973 p.
27. Cleaning with Bulk Nanobubbles / Jie Zhu [et al.] // *Langmuir*. – 2016. – Vol. 32, no. 43. – 11203–11211 p.
28. Bactericidal Activity of Bulk Nanobubbles through Active Oxygen Species Generation / Masato Yamaguchi [et al.] // *Langmuir*. – 2021. – Vol. 37, no. 32. – 9883–9891 p.
29. Aluminum plasmonic photocatalysis / Qi Hao [et al.] // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – 15288 p.
30. A self-powered and high sensitivity acceleration sensor with V-Q-a model based on triboelectric nanogenerators (TENGs) / Liu C. [et al.] // *Nano Energy*. – 2020. – Vol. 67. – 104228 p.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022 г.