



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.74-022.532:669.056.91

ФОРМИРОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ АНОДИРОВАНИЕМ В ОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ И ИХ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА

С. К. ЛАЗАРУК¹, В. В. ДУДИЧ¹, Т. И. ОРЕХОВСКАЯ¹, Д. А. САСИНОВИЧ¹,
Л. П. ТОМАШЕВИЧ¹, А. А. УСТИМЕНКО², А. А. ПОВЖИК², Н. А. КАЛАНДА³,
Д. А. СИМОНЕНКО¹, С. М. ИВАНЮТА¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (г. Минск, Республика Беларусь)

³Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20.09.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Выполнены исследования по формированию трубчатых оксидов алюминия локальным электрохимическим анодированием в водных растворах органических кислот, таких как муравьиная, лимонная, винная, яблочная и др. Формируемые подобным образом самоупорядоченные наноструктуры могут быть использованы при изготовлении различных оптических устройств. Трубчатые оксиды алюминия, сформированные локальным электрохимическим анодированием в органических кислотах, имеют высокую концентрацию анионных комплексов, содержащих более 10 ат.% атомов углерода. Исследования спектров отражения показали эффективные антиотражающие свойства пленок с коэффициентом зеркального отражения 0,7–1,4 %.

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, оксид алюминия, органические кислоты, антиотражающие свойства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований от 3 ноября 2021 года № Ф22КИ-050 и от 1 февраля 2022 года № Т22В-002.

Для цитирования. Формирование трубчатых оксидов алюминия локальным электрохимическим анодированием в органических электролитах и их антиотражающие свойства / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-21-28>.

FORMATION OF TUBULAR ALUMINUM OXIDES BY LOCAL ELECTROCHEMICAL ANODIZATION IN ORGANIC ELECTROLYTES AND THEIR ANTI-REFLECTION PROPERTIES

SERGUEI K. LAZAROUK¹, VLADISLAV V. DUDICH¹, TAISIA I. OREKHOVSKAYA¹,
DMITRY A. SASINOVYCH¹, LEONID P. TOMASHEVICH¹, ALESYA A. USTIMENKO²,
ALEXANDER A. POVZHNIK², NIKOLAY A. KALANDA³,
DARIA A. SYMONENKO¹, SERGEY M. IVANYUTA¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials” (Minsk, Republic of Belarus)

³Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.09.2023

Abstract. Research has been carried out on the formation of tubular aluminum oxides by local electrochemical anodization in aqueous solutions of organic acids such as formic, citric, tartaric, malic and others. Self-ordered nanostructures formed this way can be used in the manufacture of various optical devices. Tubular aluminum oxides formed by local electrochemical anodization in organic acids have a high concentration of anionic complexes containing carbon atoms over 10 at.%. Studies of reflection spectra showed effective anti-reflection properties of films with a specular reflection coefficient of 0.7–1.4 %.

Keywords: electrochemical anodizing, aluminum oxide, organic acids, anti-reflective properties.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research dated November 3, 2021 No F22KI-050 and dated February 1, 2022 No T22V-002.

For citation. Lazarouk S. K., Dudich V. V., Orekhovskaya T. I., Sasinovych D. A., Tomashevich L. P., Ustimenko A. A., Povzhnik A. A., Kalanda N. A., Symonenko D. A., Ivanyuta S. M. (2023) Formation of Tubular Aluminum Oxides by Local Electrochemical Anodization in Organic Electrolytes and Their Anti-Reflection Properties. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-21-28> (in Russian).

Введение

Наноструктурированный пористый оксид алюминия активно исследуется благодаря его самоупорядоченной гексагональной структуре [1], что делает возможным использование этого оксида при темплатном синтезе [2, 3]. Кроме того, он находит применение в качестве диэлектрического слоя при изготовлении различных полупроводниковых приборов [4–7].

Формируемая электрохимическим анодированием наноструктура может состоять как из гексагональных ячеек типа пчелиных сот, так и из гексагональных трубок. Последние представляют интерес благодаря высокому уровню самоупорядочивания [8] и другим уникальным параметрам, к которым можно отнести низкую пористость и высокий уровень легирования анионными комплексами из электролита [9, 10]. В частности, трубчатые оксиды алюминия, сформированные в органических электролитах, имеют высокую степень легирования атомами углерода, что может быть использовано при формировании антиотражающих покрытий на алюминиевой поверхности [11, 12].

В статье проведено исследование антиотражающих свойств трубчатых оксидов алюминия, сформированных в различных органических электролитах. Выполнено сравнение этих свойств в исследуемых структурах и структурах на основе традиционного пористого оксида алюминия с заполнением пор металлами, обеспечивающими антиотражающий эффект.

Проведение эксперимента

В качестве исходных материалов для экспериментальных образцов использовали алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм и алюминиевую проволоку диаметром 2,5 мм и менее. Локальное пористое анодирование алюминиевой фольги проводили в специальных электрохимических ячейках, позволяющих обрабатывать алюминиевую поверхность площадью 0,2 см², что соответ-

ствовало областям круглой формы диаметром 0,5 см. Именно при анодировании алюминиевой поверхности размерами хотя бы в одном направлении менее 0,5 см достигается требуемый эффект увеличения доли конвективной составляющей теплоотвода, что позволяет предотвращать нежелательные эффекты тепловых пробоев и горения формируемых пленок [9, 10]. Локализация электрохимического анодирования может быть проведена и без использования специальной ячейки. В частности, электрохимическое анодирование алюминиевой проволоки диаметром 2,5 мм обеспечивает преимущества локального процесса за счет увеличенного конвекционного теплоотвода [9].

Пористое электрохимическое анодирование алюминия проводили в электролитах на основе водных растворов различных органических кислот (муравьиной, щавелевой, малоновой, яблочной, винной, лимонной, янтарной) в комбинированном режиме. Первая стадия выполнялась в потенциодинамическом режиме с разверткой анодного напряжения со скоростью 1 В/с до заданного значения, после чего процесс проводили в потенциостатическом режиме. Время анодного процесса выбирали так, чтобы толщина формируемой пленки находилась в диапазоне 10–20 мкм.

Для сравнения структуры и свойств пленок пористого оксида алюминия, полученных локальным анодированием и анодированием на большой площади, часть пленок формировали на алюминиевой поверхности без локализации зоны анодирования. В частности, площадь анодной обработки составляла примерно 1 см². Пористый оксид алюминия в этом случае формировали в 10%-ном водном растворе щавелевой кислоты при плотности анодного тока 20 мА/см². Время анодирования выбирали в зависимости от требуемой толщины оксида (от 30 мин до 1 ч). Для увеличения антиотражающего эффекта пленки пористого оксида алюминия обрабатывали при отрицательном смещении в 5%-ном водном растворе сернокислого кобальта в течение 15 мин, что позволяло осадить металлический кобальт внутри пор.

Структуру и состав формируемых пленок изучали при помощи растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа. Исследования спектров отражения видимого диапазона проводили с применением спектрофотометра МС 121. В качестве базы для измерения относительных спектров отражения использовали спектр отражения контрольного зеркала ИСШТ 3.910.001, входящего в комплект спектрофотометра.

Результаты исследований и их обсуждение

Известно, что трубчатый анодный оксид алюминия формируется в тех же электролитах, что и ячеистый оксид (оксид с гексагональными ячейками типа пчелиных сот), но при более высоких значениях плотностей анодного тока и напряжения формовки. Ранее в [13] были определены электрические режимы, обеспечивающие переход от ячеистой структуры пористого оксида к трубчатой для основных электролитов, используемых для пористого анодирования алюминия. В настоящей статье рассмотрены органические электролиты (табл. 1), данные по которым в научно-технической литературе отсутствуют. Так, показатели по трубчатым оксидам, сформированным в электролитах на основе водных растворов муравьиной и янтарной кислот, приводятся впервые.

Таблица 1. Условия локального электрохимического анодирования, обеспечивающие формирование трубчатого оксида алюминия

Table 1. Conditions for local electrochemical anodization, ensuring the formation of tubular aluminum oxide

| Органическая кислота в водном электролите / Organic acid in aqueous electrolyte | Состав электролита / Electrolyte composition | Напряжение формовки, В / Forming voltage, V | Плотность анодного тока, мА/см ² / Anodic current density, mA/cm ² |
|---|--|---|--|
| Муравьиная (СН ₂ О ₂) | 10 М | >17 | >10 |
| Щавелевая (С ₂ Н ₂ О ₄) | 0,5 М | >200 | >100 |
| Малоновая (С ₃ Н ₄ О ₄) | 0,5 М | >200 | >200 |
| Яблочная (С ₄ Н ₆ О ₅) | 0,5 М | >250 | >150 |
| Винная (С ₄ Н ₆ О ₆) | 1 М | >300 | >200 |
| Лимонная (С ₆ Н ₈ О ₇) | 1 М | >400 | >200 |
| Янтарная (С ₄ Н ₆ О ₄) | 0,5 М | >450 | >150 |

Особо следует отметить, что данные табл. 1 соответствуют процессу локального электрохимического анодирования алюминия, при котором характерный размер обрабатываемой поверхности не превышает 1 мм, что обеспечивает эффективный теплоотвод выделяемого при анодировании тепла за счет увеличения конвективной теплоотдачи. Именно увеличение конвективного теплового потока предупреждает нежелательный перегрев обрабатываемой поверхности, что, в конечном итоге, предотвращает процесс тепловых пробоев и неконтролируемого травления формируемых структур [14].

Отдельно следует остановиться на режимах формирования трубчатого оксида алюминия в электролитах на основе водных растворов муравьиной кислоты. Прежде всего отметим, что еще в 1977 г. было заявлено, что анодный оксид в водных растворах муравьиной кислоты сформировать невозможно из-за интенсивного травления алюминия, аналогично травлению алюминия в электролитах, содержащих ионы хлора [15]. Позднее сообщалось о формировании тонкого слоя пористого оксида алюминия (0,2–0,3 мкм) при малых плотностях анодного тока (менее 0,1 мА/см²), низких температурах электролита и длительном времени анодного процесса (более 20 ч) [16].

Условия протекания электрохимического анодирования алюминия в водных растворах муравьиной кислоты резко изменяются при локализованном процессе за счет увеличения конвективного теплоотвода, что позволяет надежно предотвратить процесс травления алюминия и формировать пористый оксид алюминия толщиной более 1 мкм. При этом, как было установлено во время исследований, при использовании напряжения формовки более 17 В формируемый оксид имеет трубчатую форму, что является рекордно низким значением для органических электролитов, в которых были получены пленки анодного оксида алюминия трубчатой формы.

Также особо следует остановиться на электролитах на основе водных растворов янтарной кислоты. В процессе исследований было обнаружено, что пористый оксид алюминия трубчатой формы образуется в таких электролитах только при локальном анодировании при напряжениях формовки более 450 В и плотностях анодного тока более 150 мА/см². Отметим, что анодный оксид алюминия трубчатой формы в электролитах на основе муравьиной и янтарной кислот получен впервые.

На рис. 1 представлены микрофотографии, полученные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) трубчатых оксидов алюминия, сформированных в электролитах на основе водных растворов муравьиной и янтарной кислот. Согласно рис. 1, разница структуры трубчатых и ячеистых оксидов заметна на фотографиях их поперечного сечения. В случае трубчатой структуры поперечное сечение проходит через границы гексагональных ячеек, а в традиционных ячеистых структурах – через центры ячеек, т. е. через поры. Диаметр трубок в оксидах, сформированных в муравьиновокислых электролитах, находился в диапазоне 40–60 нм (рис. 1, *a*), а диаметр трубчатых оксидов, сформированных в водных электролитах на основе янтарной кислоты, – в диапазоне 700–1100 нм (рис. 1, *b*).

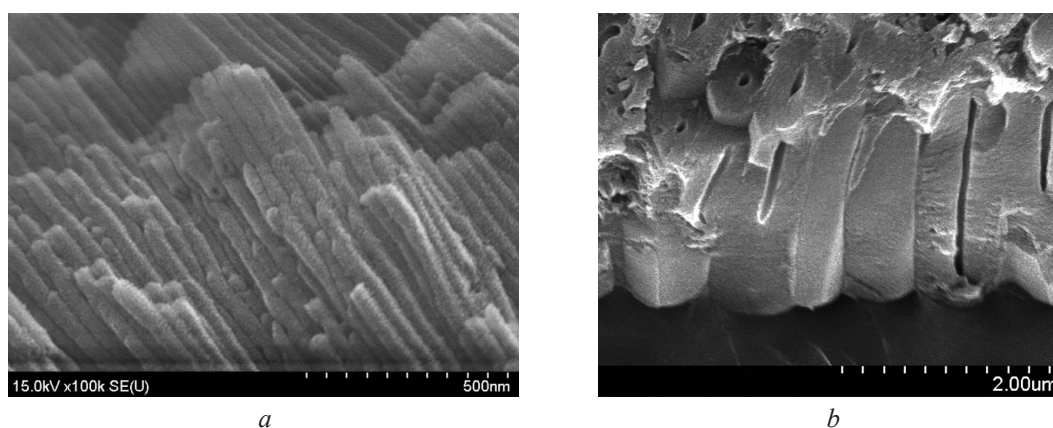


Рис. 1. РЭМ-фотографии поперечного сечения трубчатых оксидов алюминия, сформированных электрохимическим анодированием в водных растворах органических кислот: *a* – муравьиной; *b* – янтарной

Fig. 1. SEM photographs of the cross section of tubular aluminum oxides formed by electrochemical anodization in aqueous solutions of organic acids: *a* – formic; *b* – succinic

Таким образом, локальное электрохимическое анодирование алюминия в органических электролитах за счет выбора режимов процесса позволяет формировать трубчатые оксиды с диаметром трубок от 40 до 1100 нм. Минимальные и максимальные значения диаметров для органических электролитов публикуются впервые.

Отличительной особенностью анодного оксида алюминия с трубчатой формой является высокое содержание примесей, в частности углерода, в виде анионных комплексов, встраиваемых в оксид во время анодного процесса. Именно атомы углерода обеспечивают поглощение света видимого диапазона в анодном оксиде алюминия и антиотражающие свойства формируемых оксидов. Результаты рентгеноспектрального (EDX) анализа трубчатых оксидов алюминия показали, что содержание в них атомов углерода превышает 10 ат.%, а в пленках трубчатого оксида алюминия, сформированных при высоких анодных напряжениях, например, в электролитах на основе янтарной кислоты, содержание атомов углерода составило 21 ат.%. Отметим, что содержание углерода в пористых оксидах алюминия с формой типа пчелиных сот не превышает 5 ат.%. Большое содержание углерода в трубчатых оксидах объясняется высоким анодным напряжением при электрохимическом процессе, что приводит к большим значениям напряженности электрического поля в барьерном слое во время роста оксида. Напряженность электрического поля в барьерном слое трубчатого оксида алюминия может достигать 10^{11} В/м, а в пористом оксиде с традиционной ячеистой формой не превышает 10^{10} В/м. Именно большие значения напряженности электрического поля во время роста трубчатого оксида определяют различия в механизме роста трубчатых и традиционных ячеистых пористых оксидов алюминия [10, 17], а также различия содержания примесных атомов, встраиваемых из электролита во время электрохимического процесса.

На рис. 2 представлены спектры отражения пленок пористого оксида алюминия с различной структурой. Линия 1 соответствует спектру отражения пленок пористого оксида алюминия с трубчатой структурой, сформированного в водном растворе янтарной кислоты, линия 2 – спектру отражения пленок трубчатого оксида алюминия, сформированного в водном растворе муравьиной кислоты, 3 – спектру отражения пленки пористого оксида алюминия, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты, с ячеистой структурой, в поры которой осажден кобальт.

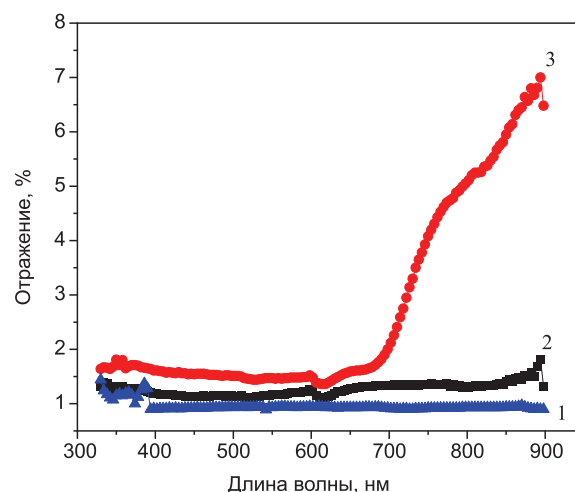


Рис. 2. Спектры отражения пленок оксида алюминия:

- 1, 2 – трубчатого, сформированного в водном растворе янтарной и муравьиной кислот соответственно;
3 – пористого, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты с металлом внутри пор

Fig. 2. Reflection spectra of aluminum oxide films:

- 1, 2 – tubular, formed in an aqueous solution of succinic and formic acids, respectively;
3 – porous, formed in an aqueous solution of oxalic acid with metal inside the pores

Как видно из рис. 2, спектр отражения пористого оксида алюминия с трубчатой структурой демонстрирует высокие антиотражающие свойства, при которых уровень зеркального отражения в видимом диапазоне длин волн составляет 0,7–1,4 %, в то время как этот же показатель для пленок на основе пористого оксида алюминия с традиционной ячеистой структурой и осажденным металлом внутри пор составляет 1,5–5,0 % в зависимости от длины волны электромагнитного

излучения видимого диапазона. Значительная разница в величинах отраженного сигнала наблюдается в красной области видимого диапазона, где отраженный сигнал пористого оксида с ячеистой структурой составляет около 5,0 %, а для трубчатого оксида – 0,9–1,4 %. Также следует отметить, что уровень зеркального отражения от анодного оксида алюминия с ячеистой структурой без дополнительных обработок составил 10–20 % (на рис. 2 не показано).

Лучшие антиотражающие свойства анодного оксида алюминия с трубчатой структурой, по сравнению с пористым оксидом с ячеистой структурой, могут быть объяснены различием морфологии и состава исследуемых пленок. Как показано на рис. 3, трубчатая структура имеет большую площадь вертикальной внутренней поверхности, расположенной перпендикулярно поверхности оксидной пленки. Осаждение металла внутрь пор также способствует увеличению вертикальной внутренней отражающей поверхности, но не в той степени, как это имеет место в трубчатых оксидах. Кроме того, следует отметить, что ячейки трубчатого оксида в нижней части на границе оксид–алюминий имеют большее значение пикового центрального угла (до 90°), в то время как для пористого оксида пиковый центральный угол не более 40°–45° [10]. В результате этих структурных особенностей свет, проникающий в трубчатый оксид из-за многократного отражения от внутренних вертикальных поверхностей, преодолевает более длинный путь внутри трубчатого оксида, по сравнению с ячеистым пористым оксидом, как это схематично показано на рис. 3.

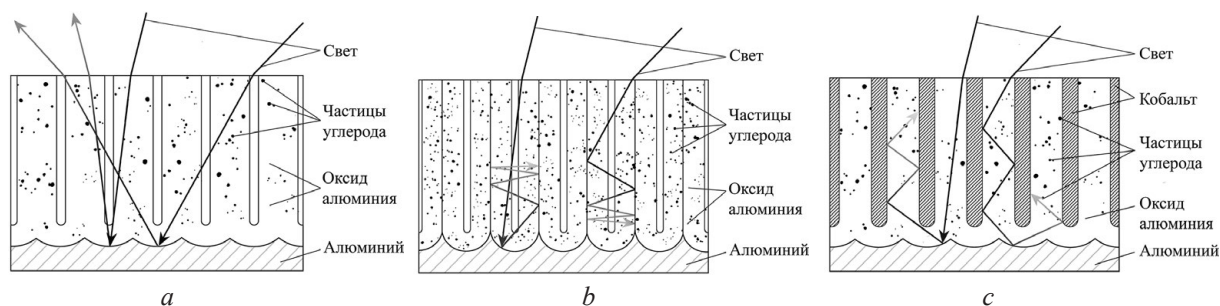


Рис. 3. Схематическое изображение распространения света в алюмооксидных пленках с различной морфологией: *a, b* – ячеистая и трубчатая структуры соответственно; *c* – ячеистая структура с осажденным кобальтом в порах

Fig. 3. Schematic representation of light propagation in aluminum oxide films with different morphologies: *a, b* – cellular and tubular structures, respectively; *c* – cellular structure with precipitated cobalt in the pores

Существенным фактором, определяющим эффективные антиотражающие свойства трубчатого оксида, является наличие примесных атомов углерода, доля которых может превышать 20 ат.%. Высокая атомная концентрация углерода символически изображена на рис. 3, *b*. Именно атомы углерода поглощают свет видимого диапазона, что, в конечном счете, обеспечивает антиотражающие свойства трубчатых оксидов алюминия, сформированных в органических электролитах при локальном анодировании.

Следует также отметить, что пленки трубчатого оксида алюминия, обладающие антиотражающими свойствами, могут быть сформированы локальным анодированием и без ограничения обрабатываемой площади. В частности, при менисковом анодировании локализация происходит за счет ограничения зоны анодирования менисковой областью, которая перемещается по поверхности образца. Поэтому при менисковом анодировании можно формировать трубчатый оксид алюминия на изделиях любой площади [18].

Закключение

1. Установлены граничные режимы для формирования локальным анодированием трубчатого оксида алюминия в электролитах на основе водных растворов органических кислот. Сформированные трубчатые структуры имеют высокую концентрацию анионных комплексов в виде примесных соединений углерода, атомарное содержание которого находилось в диапазоне 10–21 ат.%. Диаметр трубок в зависимости от режимов анодных процессов составлял от 40,0 нм до 1,1 мкм.

2. Спектры отражения сформированных трубчатых пленок показали эффективные антиотражающие свойства. Величина отраженного оптического сигнала в трубчатых структурах составляла 0,7–1,4 % в видимом диапазоне, что меньше, чем в аналогичных пленках на основе пористого оксида алюминия со структурой типа пчелиных сот.

3. Пленки трубчатого оксида, обладающие антиотражающими свойствами, могут быть использованы при изготовлении различных оптических устройств, в частности, при создании оптических межсоединений интегральных схем [19–23], систем спутникового зондирования поверхности Земли [24] и др.

Список литературы / References

1. Ruiz A. C., Caballero O. C., Marisol M. G. (2021) Revisiting Anodic Alumina Templates: from Fabrication to Applications. *Nanoscale*. 13, 2227–2265.
2. Anh Nguyen T. N., Fedotova J., Kasiuk J., Bayev V., Kupreeva O., Lazarouk S., Manh D. H., Vu D. L., Chung S., Akerman J., Altynov V., Maximenko A. (2018) Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films. *Applied Surface Science*. 427, 649–655.
3. Lazarouk S., Muravski A., Sasinovich D., Chigrinov V., Kwok H. S. (2007) Porous and Pillar Structures Formed by Anodization for Vertical Alignment of Nematic Liquid Crystal. *Japanese Journal of Applied Physics*. 46 (10A), 6889–6892.
4. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukevich P., La Monica S., Maiello G. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate *n*-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 358, 659–664.
5. Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., Ferrari A. (1996) Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped *n*-Type Polysilicon. *Thin Solid Films*. 276, 296–298.
6. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Katsuba P. S., Labunov V. A., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2007) Electroluminescence from Nanostructured Silicon Embedded in Anodic Alumina. *Semiconductors*. 41 (9), 1109–1112.
7. Lazarouk S., Katsouba S., Leshok A., Demianovich A., Stanovski V., Voitech S., Vysotski V., Ponomar V. (2000) Porous Alumina as Low- ϵ Insulator for Multilevel Metallization. *Microelectronic Engineering*. 50 (1–4), 321–327.
8. Chu S., Wada K., Inoue S., Isogai M., Yasumori A. (2005) Fabrication of Ideally Ordered Nanoporous Alumina Films and Integrated Alumina Nanotubule Arrays by High-Field Anodization. *Advanced Materials*. 17, 2115–2119.
9. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Dudich V. V., Lazarouk A. S., Borisenko V. E. (2022) Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect During High-Voltage Local Anodization of Aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 24.
10. Huang X., Sul W., Sun L., Liu J., Sasinovich D. A., Kupreeva O. V., Tsirkunov D. A., Rabatuev G. G., Lazarouk S. K. (2019) Effect of Anodic Voltage on Parameters of Porous Alumina Formed in Sulfuric Acid Electrolytes. *Materials Physics and Mechanics*. 41, 62–68.
11. Jagminas A., Kaciulis S., Klimas V., Reza A., Mickevicius S., Soltani P. (2016) Fabrication of Graphene-Alumina Heterostructured Films with Nanotube Morphology. *The Journal of Physical Chemistry*. 17, 9490–9497.
12. Jagminas A., Grinciene G., Selskisa A., Chernyakova K. (2019) Cleavage of Alumina Cells in Organic Acid Solutions During High Voltage Anodization. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 21, 14941–14944.
13. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Orekhovskaya T. L., Kupreeva O. V., Korotkevich A. V., Dudich V. V., Tomashevich L. P. (2022) Formation of Porous Aluminum Oxide with a Tubular Structure in Various Electrolytes. *Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus*. 1, 163–172.
14. Lazarouk S. K. (2013) High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. World Scientific Press. 355–358.
15. Tajima S. (1977) Luminescence, Breakdown and Colouring of Anodic Oxide Films on Aluminium. *Electrochimica Acta*. 22, 995–1011.
16. Pashchanka M., Schneider J. (2011) Origin of Self-Organisation in Porous Anodic Alumina Films Derived from Analogy with Rayleigh-Benard Convection Cells. *J. Mater. Chem.* 21, 18761.
17. Lazarouk S. K., Katsuba P. S., Leshok A. A., Vysotsky V. B. (2015) The Influence of Local Electric Field Strength on the Formation of an Ordered Structure of Porous Anodic Aluminum Oxide. *Journal of Technical Physics*. 65 (9), 86–90.
18. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Borisenko V. E., Muravski A., Chigrinov V., Kwok H. S. (2010) Tubular Alumina Formed by Anodization in the Meniscal Region. *Journal of Applied Physics*. 107, 033527.
19. Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V. (1998) Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon. *Physica of Status Solidi (a)*. 165, 87–90.

20. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (1), 136–138.
21. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41, 1094–1096.
22. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Kozlova T. A., Dolbik A. V., Vi L. D., Ilkov V. K. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18, 1940091.
23. Katsuba P., Jaguiro P., Lazarouk S., Smirnov A. (2009) Stable Electroluminescence of Nanostructured Silicon Embedded into Anodic Alumina. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 41, 931–934.
24. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Granko S. V. (2021) Formation of Nanostructured Anti-Reflection Coatings on Titanium Elements of Optical Devices. *National Research Nuclear University "MEPhI"*. 127–128.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лазарук С. К., д-р физ.-мат. наук, доц., зав. научно-исследовательской лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы» (НИЛ 4.6) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Дудич В. В., науч. сотр. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР

Ореховская Т. И., вед. инж.-технол. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР

Сасинович Д. А., науч. сотр. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР

Томашевич Л. П., инж.-электрон. НИЛ 4.6 НИЧ БГУИР

Устименко А. А., инж.-технол. 2-й кат. ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Повжик А. А., нач. сектора СП-110 ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Каланда Н. А., д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению

Симоненко Д. А., студ. БГУИР

Иванюта С. М., студ. БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Лазарук Сергей Константинович

Information about the authors

Lazarouk S. K., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory "Integrated Micro- and Nanosystems" 4.6 (RL 4.6) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Dudich V. V., Researcher of RL 4.6 of R&D Department of the BSUIR

Orekhovskaya T. I., Leading Technologist of the RL 4.6 of R&D Department of the BSUIR

Sasinovich D. A., Researcher of the RL 4.6 of R&D Department of the BSUIR

Tomashevich L. P., Electronics Engineer at the RL 4.6 of R&D Department of the BSUIR

Ustimenko A. A., Engineer Technologist of the 2nd Category at OJSC "Minsk Research Institute of Radiomaterials"

Povzhik A. A., Head of Sector SP-110 at OJSC "Minsk Research Institute of Radiomaterials"

Kalanda N. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science

Symonenko D. A., Student at the BSUIR

Ivanyuta S. M., Student at the BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Lazarouk Serguei Konstantinovich