



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.74-022.532:669.056.91

ФОРМИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ И СЛОЯ КСЕРОГЕЛЯ ТИТАНАТА БАРИЯ

С. К. ЛАЗАРУК¹, Т. Ф. РАЙЧЕНОК², Л. П. ТОМАШЕВИЧ¹, Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹,
А. А. ПОВЖИК³, Н. В. ГАПОНЕНКО¹

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

²Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

³ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20.11.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Выполнены исследования по формированию антиотражающих покрытий на основе пористого алюминия, полученного методом электрохимического анодного травления, и нанесенного на его поверхность слоя ксерогеля титаната бария. Толщина пористого алюминия составила от 15 до 100 мкм. Анализ спектров отражения полученных структур показал эффективные антиотражающие свойства сформированных покрытий с коэффициентом зеркального отражения 0,25–2,50 % в диапазоне 200–1100 нм. Применение сформированных покрытий с низким коэффициентом отражения возможно в авиастроении, электронике и энергетике.

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, пористый алюминий, хлорид натрия, ксерогель титаната бария, антиотражающие свойства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № X23M-044.

Для цитирования. Формирование антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного алюминия и слоя ксерогеля титаната бария / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22. № 3. С. 14–20.
<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20>

FORMATION OF ANTI-REFLECTION COATINGS BASED ON NANOSTRUCTURED ALUMINUM AND BARIUM TITANATE XEROGEL LAYER

SERGUEI K. LAZAROUK¹, TAMARA F. RAICHENOK², LEONID P. TOMASHEVICH¹,
EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, ALEXANDER A. POVZHIK³, NIKOLAI V. GAPONENKO¹

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

²State Scientific Institution B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

³OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.11.2023

Abstract. The research has been carried out on the formation of anti-reflection coatings based on porous aluminum obtained by electrochemical anodic etching and a layer of barium titanate xerogel deposited on its surface. The thickness of the porous aluminum ranged from 15 to 100 microns. Analysis of the reflection spectra of the

resulting structures showed effective anti-reflection properties of the formed coatings with a specular reflection coefficient of 0.25–2.50 % in the range of 200–1100 nm. The use of formed coatings with a low reflectance coefficient is possible in aircraft manufacturing, electronics and energy.

Keywords: electrochemical anodizing, porous aluminum, sodium chloride, barium titanate xerogel, anti-reflective properties.

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

Gratitude. The work was carried out with the financial support of the project of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research No X23M-044.

For citation. Lazarouk S. K., Raichenok T. F., Tomashevich L. P., Lashkovskaya E. I., Povzhik A. A. Gaponenko N. V. (2024) Formation of Anti-Reflection Coatings Based on Nanostructured Aluminum and Barium Titanate Xerogel Layer. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20> (in Russian).

Введение

Алюминий является наиболее распространенным металлом, по наличию в земной коре он уступает только кислороду и кремнию. Сплавы на основе алюминия широко используются в авиастроении, электронике и энергетике. При этом возникает задача формирования антиотражающих покрытий на алюминиевой поверхности. В частности, в авиастроении это необходимо при разработке стелс-технологии, в микроэлектронике они формируются на поверхности алюминиевых пленок для подавления бликов в процессе операций фотолитографии, в энергетике – при изготовлении солнечных тепловых коллекторов. Также изменение отражения на поверхности алюминия в сочетании с нанесением люминесцентных пленок может быть использовано в технологии защиты изделий от подделок. Для формирования антиотражающих покрытий на поверхности алюминия рассматривались конусообразные наноструктуры оксида алюминия [1, 2], наночастицы оксида алюминия, получаемые лазерной абляцией алюминиевых мишеней [3], пленки нитрида алюминия [4]. Однако известные методы формирования таких покрытий на алюминии имеют ограничение по уровню поглощения оптического сигнала и диапазону длин волн поглощения [1–5]. Следует отметить, что если процесс анодного пористого окисления алюминия интенсивно исследуется [7–9], то анодное пористое травление алюминия недостаточно изучено. Известны лишь единичные сообщения о процессе травления без исследования формируемой структуры.

В статье предложен метод формирования антиотражающего покрытия на алюминиевой поверхности, основанный на наноструктурировании алюминия с последующим нанесением слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$.

Проведение экспериментов

Эксперименты по формированию пленок пористого алюминия проводили на образцах из алюминиевой фольги толщиной 500 мкм, чистотой 99,7 %, площадью 1 см². В качестве электролита использовали 1%-ный раствор хлорида натрия.

После предварительной обработки поверхности алюминиевой фольги спиртосодержащим раствором выполняли формирование пористого алюминия в двухэлектродной электрохимической ячейке. Ячейка состояла из фторопластового (тефлонового) цилиндра, который при помощи уплотнительного резинового кольца прижимался к анодируемому образцу. Образец находился на металлическом (алюминиевом) аноде-держателе. Для формирования пористого алюминия использовали катод из титановой фольги, который располагался внутри фторопластового цилиндра. Анодирование проводили в гальваностатическом режиме при плотности тока $J_f = 200 \text{ mA/cm}^2$. Время анодирования – от 5 до 30 мин.

Пленкообразующий золь титаната бария, содержащий европий, готовили с использованием ранее разработанной методики на основе ледяной уксусной кислоты (CH_3COOH) и ацетилацетона ($\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COCH}_3$) с объемным соотношением 4:1, с добавлением изопропоксида титана ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$), ацетата бария ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) и гидрата ацетата европия ($\text{Eu}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) [6]. Концентрация оксидов в получившемся растворе составила 61,2 мг/мл титаната бария BaTiO_3 и 1,5 мг/мл оксида европия (III) Eu_2O_3 .

Для получения однослойных образцов $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ золь титаната бария наносили центрифугированием на подложки пористого алюминия, затем образцы сушили в сушильном шкафу при тем-

пературе 200 °С в течение 10 мин, после чего отжигали при 450 °С в течение 30 мин. Спектры отражения измеряли на спектрофотометре МС 122 (СООО «Проскан специальные инструменты», Беларусь).

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе экспериментов были сформированы пленки пористого алюминия толщиной от 15 до 100 мкм (рис. 1, *a, b*). Анализ образцов с помощью растрового электронного микроскопа показал, что полученные пленки действительно имеют пористую структуру, диаметр пор варьируется от 0,8 до 2,0 мкм, минимальный размер алюминиевого «скелета» – 50 нм (рис. 1, *c, d*).

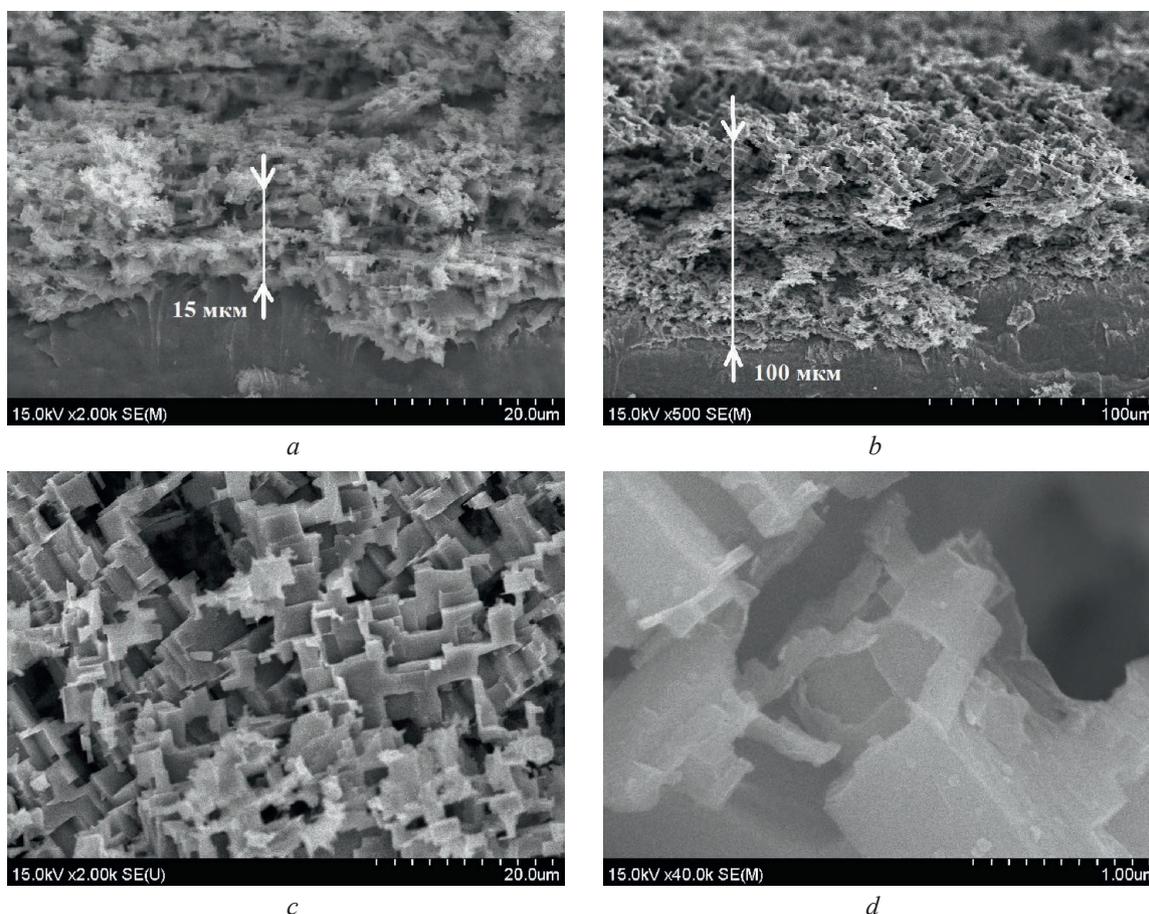


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, полученных в гальваностатическом режиме при разных плотностях тока в 1%-ном водном растворе хлорида натрия:
a, b – пористый слой толщиной 15 и 100 мкм соответственно;
c, d – поперечное сечение пористой структуры с увеличением 2 и 40 тыс. крат
Fig. 1. SEM images of samples obtained in galvanostatic mode at different current densities in a 1 % aqueous solution of sodium chloride:
a, b – porous layer with a thickness of 15 and 100 μm , respectively;
c, d – cross section of the porous structure with magnification of 2 and 40 thousand times

Результаты рентгеноспектрального анализа сформированных пористых пленок изображены на рис. 2. Из рисунка видно, что пористая пленка в основном состоит из алюминия (83 ат.%), также в ней присутствуют примесные элементы – углерод (10 ат.%) и кислород (7 ат.%).

Спектры отражения сформированных образцов приведены на рис. 3, 4. Кривая 0 относится к исходной подложке без анодирования, кривые 1, 2, 3 – к образцам, подвергавшимся анодированию в течение 5, 20 и 30 мин соответственно, кривые 4, 5, 6 – к образцам, подвергавшимся анодированию в течение 5, 20 и 30 мин и покрытых одним слоем ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$. Отражение чистой исходной подложки алюминия без анодирования увеличивается во всем диапазоне длин волн от 6–7 % при 200 нм до 25 % при 940 нм.

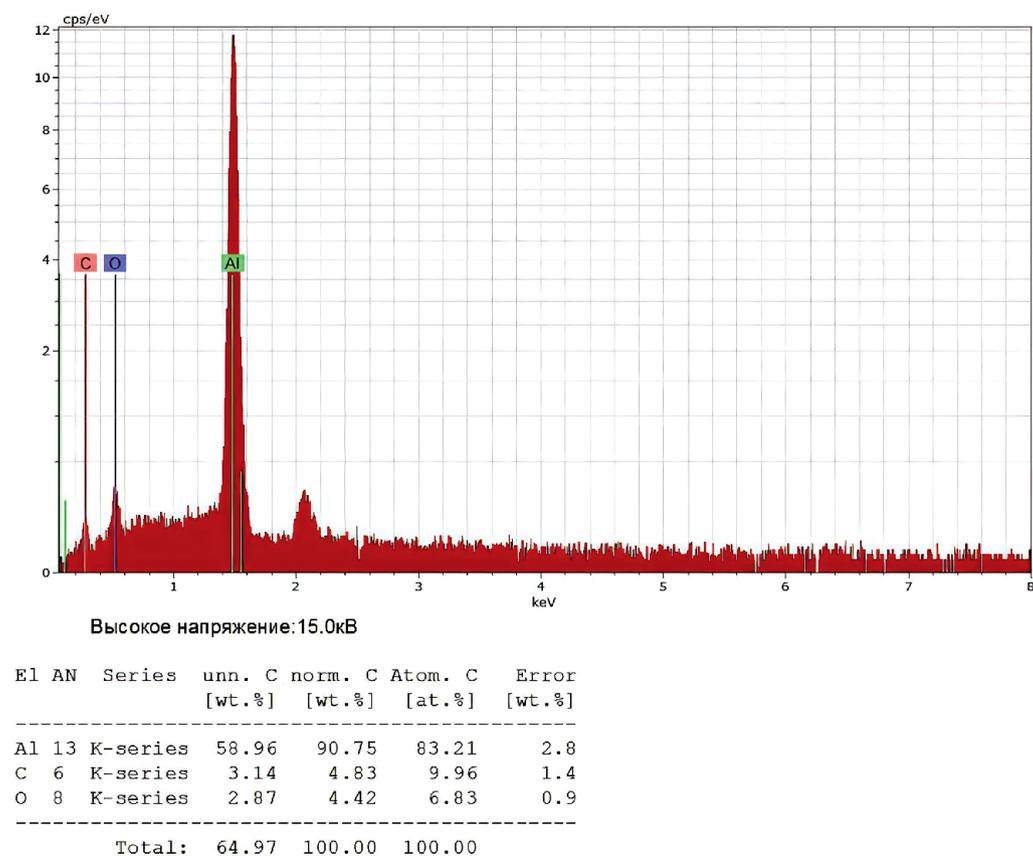


Рис. 2. Рентгеноспектральный анализ пленок пористого алюминия
Fig. 2. EDX analysis of porous aluminum films

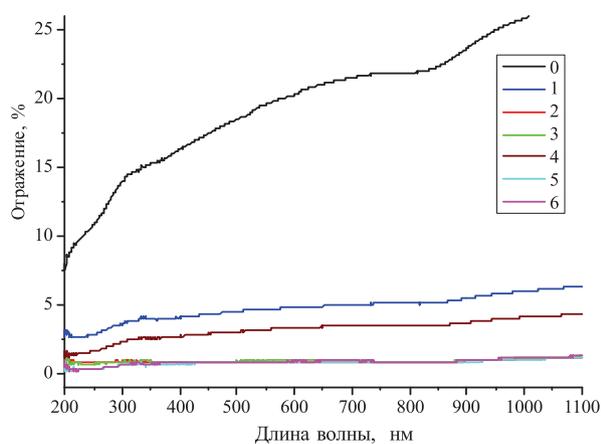


Рис. 3. Спектры отражения образцов пористого алюминия, полученных в процессе анодирования: 1, 2, 3 – в течение 5, 20 и 30 мин соответственно; 4, 5, 6 – в течение 5, 20 и 30 мин соответственно с осажденным слоем ксерогеля BaTiO₃:Eu; 0 – образец чистого непроаноцированного алюминия
Fig. 3. Reflection spectra of porous aluminum samples obtained during anodization:

1, 2, 3 – for 5, 20 and 30 min, respectively;
4, 5, 6 – for 5, 20 and 30 min, respectively, with a deposited layer of BaTiO₃:Eu xerogel;
0 – sample of pure non-anodized aluminum

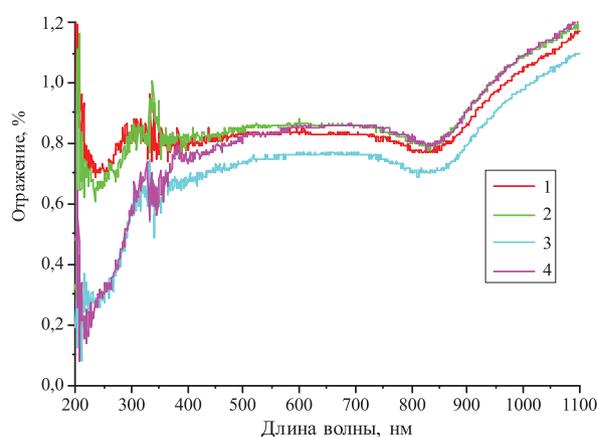


Рис. 4. Спектры отражения образцов алюминия, полученных в процессе анодирования, в диапазоне регистрируемого отражения 0,1–1,2 %: 1, 2 – в течение 20 и 30 мин соответственно; 3, 4 – в течение 20 и 30 мин соответственно с осажденным слоем ксерогеля BaTiO₃:Eu
Fig. 4. Reflection spectra of aluminum samples obtained during the anodizing process, in the range of recorded reflection 0.1–1.2 %:

1, 2 – for 20 and 30 min, respectively;
3, 4 – for 20 and 30 min, respectively, with the deposited layer of BaTiO₃:Eu xerogel

Анодирование приводит к значительному уменьшению отражения. Но так же, как и для исходной подложки алюминия, наблюдается увеличение отражения в диапазоне 200–1100 нм. Для образца, анодированного в течение 5 мин (рис. 3, кривая 1), отражение увеличивается от 2,5–3,0 % при 200 нм до 6,0–6,4 % при 1100 нм. Для образцов, анодированных в течение 20 и 30 мин (рис. 3, кривые 2 и 3 соответственно), отражение увеличивается от 0,5 % при 200 нм до 1,1 % при 1100 нм. Для образца, подвергнувшегося анодированию в течение 5 мин (рис. 3, кривая 4), уменьшение отражения после формирования слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ составило приблизительно 1–3 % во всем диапазоне длин волн. Отражение увеличивается от 1,5 % при 200 нм до 4,0 % при 1100 нм. Для образцов, подвергнувшихся анодированию в течение 20 и 30 мин (рис. 3, кривые 5 и 6 соответственно), нанесение слоя ксерогеля на подложку пористого алюминия приводит к уменьшению отражения приблизительно в два раза в области 200–300 нм и достигает минимума 0,2 % в диапазоне 200–225 нм. Для образца 5 уменьшение отражения составило около 0,1–0,3 % в диапазоне от 350 до 1100 нм и достигло максимума до 1 % при 1100 нм. Для образца 6 уменьшение отражения – около 0,1–0,2 % в диапазоне от 300 до 500 нм, от 500 до 1100 нм значения отражения почти такие же, как и до нанесения слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$.

Ввиду масштабного ограничения рис. 3, ряд кривых на графике трудно различим. Поэтому на рис. 4 представлены спектры отражения исследуемых образцов в диапазоне регистрируемого отражения 0,1–1,2 %, что позволяет увидеть различия полученных спектральных характеристик.

Заключение

1. Предложен метод формирования антиотражающего покрытия на алюминиевой поверхности, основанный на наноструктурировании алюминия с последующим нанесением слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$. Пленки пористого алюминия толщиной 15–100 мкм получены впервые.

2. Установлено, что формирование на поверхности алюминия пористого слоя анодным травлением приводит к значительному уменьшению отражения. Введение в пористый алюминий ксерогеля титаната бария, легированного европием, также уменьшает отражение.

3. Предлагаемые антиотражающие покрытия могут быть использованы как в интегральной электронике, так и в интегральной оптике. Управление световым сигналом с помощью антиотражающих покрытий при генерации, распространении и регистрации света в оптических межсоединениях интегральных схем востребовано в интегральной оптике, в частности в кремниевой фотонике [10–17]. Кроме того, антиотражающие покрытия на металлических деталях могут найти применение в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли, где необходимо предотвратить паразитные блики из-за нежелательного отражения света от металлических поверхностей. При формировании анодированного алюминия и люминесцентных покрытий золь-гель-методом на поверхности алюминия возможно создание участков, отличающихся интенсивностью люминесценции, что представляет интерес для технологии формирования люминесцентных изображений и защиты изделий от подделок [18].

Список литературы

1. Isakov, K. Superhydrophobic Antireflection Coating on Glass Using Grass-Like Alumina and Fluoropolymer / K. Isakov, C. Kauppinen, S. Franssila // ACS Applied Material Interfaces. 2020. Vol. 12, No 44. P. 49957–49962.
2. Soon, H. L. Nanopatterned Polymer Molds Using Anodized Aluminum Templates for Anti-Reflective Coating / H. L. Soon, H. L. Nguen, A. L. Jung // Polymer MDPI. 2021. Vol. 13, No 19. P. 3333–3342.
3. Raid, A. I. Preparation and Characterization of Aluminum Oxide Nanoparticles by Laser Ablation in Liquid as Passivating and Anti-Reflection Coating for Silicon Photodiodes / A. I. Raid, A. Z. Shihab, M. K. Rafal // Appl. Nanoscience. 2017. Vol. 7. P. 477–487.
4. Goldsmith, J. Black Aluminum: A Novel Anti-Reflective Absorbing Coating / J. Goldsmith, V. Vasilyev, J. Vella // United States Air Force Research Laboratory. Wright-Patterson AFB. 2014. P. 69–70.
5. Kumar, R. H. Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review / R. H. Kumar, A. Ganesh, N. Sreekumar // Energy and Environmental Science. 2011. Vol. 4. P. 3779–3804.
6. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ Multilayer Cavity Structure / N. V. Gaponenko [et al.] // Optical Materials. 2019. Vol. 96.
7. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. 2013. P. 355–358.
8. 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. P. 2115–2119.

9. 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, No 1.
10. 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. P. 659–664.
11. 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. P. 296–298.
12. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, № 1. С. 136–138.
13. Si-Based Optoelectronic Couple / P. Jaguiro [et al.] // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2009. Vol. 41. P. 1094–1096.
14. Porous Alumina as Low- ϵ Insulator for Multilevel Metallization / S. Lazarouk [et al.] // *Microelectronic Engineering*. 2000. Vol. 50, No 1–4. P. 321–327.
15. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. 2019. Vol. 18, No 3, 4.
16. Электролюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41, № 9. С. 1126–1129.
17. Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices / S. Lazarouk [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 46.
18. Enhancement of Green Terbium-Related Photoluminescence from Highly Doped Microporous Alumina Xerogels in Mesoporous Anodic Alumina / N. V. Gaponenko [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149.

References

1. Isakov K., Kauppinen C., Franssila S. (2020) Superhydrophobic Antireflection Coating on Glass Using Grass-Like Alumina and Fluoropolymer. *ACS Applied Material Interfaces*. 12 (44), 49957–49962.
2. Soon H. L., Nguen H. L., Jung A. L. (2021) Nanopatterned Polymer Molds Using Anodized Aluminum Templates for Anti-Reflective Coating. *Polymer MDPI*. 13 (19), 3333–3342.
3. Raid A. I., Shihab A. Z., Rafal M. K. (2017) Preparation and Characterization of Aluminum Oxide Nanoparticles by Laser Ablation in Liquid as Passivating and Anti-Reflection Coating for Silicon Photodiodes. *Appl. Nanoscience*. (7), 477–487.
4. Goldsmith J., Vasilyev V., Vella J. (2014) Black Aluminum: A Novel Anti-Reflective Absorbing Coating. *United States Air Force Research Laboratory. Wright-Patterson AFB*. 69–70.
5. Kumar R. H., Ganesh A., Sreekumaran N. (2011) Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review. *Energy and Environmental Science*. 4, 3779–3804.
6. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F., Prislowski S. Ya. (2019) Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 96.
7. Lazarouk S. K. (2013) High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 355–358.
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 (1).
10. 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.
11. Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., et al. (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.
12. 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.
13. 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.
14. Lazarouk S., Katsouba S., Leshok A., Demianovich A., Stanovski V., Voitech S., et al. (2000) Porous Alumina as Low- ϵ Insulator for Multilevel Metallization. *Microelectronic Engineering*. 50 (1–4), 321–327.
15. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Kozlova T. A., Dolbik A. V., Le Dinh Vi, Ilkov V. K., et al. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3, 4).

16. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Katsuba P. S., Labunov V. A., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2007) Electroluminescence of Nanostructured Silicon in Anodic Alumina Matrix. *Semiconductors*. 41 (9), 1126–1129.
17. Lazarouk S., Xie Z., Chigrinov V., Kwok H. S. (2007) Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*. 46.
18. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Sergeev O. V., Thompson G. E., Pakes A., Skeldon P., et al. (2002) Enhancement of Green Terbium-Related Photoluminescence from Highly Doped Microporous Alumina Xerogels in Mesoporous Anodic Alumina. *J. Electrochem. Soc.* 149.

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, проф., проф. каф. микро- и наноэлектроники, зав. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы» (НИЛ 4.6) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Райченко Т. Ф., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра «Фотоника атомных и молекулярных структур», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

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

Лашковская Е. И., инж. науч.-исслед. лаб. «Нанофотоника» (НИЛ 4.5) НИЧ, БГУИР

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

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и наноэлектроники, зав. НИЛ 4.5 НИЧ, 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.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Scientific Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems” (Lab. 4.6) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Raichenok T. F., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Center “Photonics of Atomic and Molecular Structures”, State Scientific Institution B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

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

Lashkovskaya E. I., Engineer at the Scientific Research Laboratory “Nanophotonics” (Lab. 4.5) of R&D Department, BSUIR

Povzhik A. A., Head of Sector SP-110, OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Lab. 4.5 of R&D Department, 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