



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.323

ПАРАМЕТРЫ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ИЗ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ФАБРИ – ПЕРО В СПЕКТРАХ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ

И. В. ГАСЕНКОВА, Н. И. МУХУРОВ, И. М. АНДРУХОВИЧ

Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
(г. Минск, Республика Беларусь))

Поступила в редакцию 26.07.2024

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

Аннотация. Исследованы осцилляции Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения в видимом диапазоне длин волн в зависимости от толщины анодного оксида алюминия. Формирование анодного оксида алюминия проводили в водном растворе 1,0 М H_2SO_4 с добавлением этиленгликоля в соотношении 1:1 воды и этиленгликоля. Определены условия получения оксидов, спектры отражения которых характеризуются высокой интенсивностью осцилляций и могут быть использованы в сенсорных структурах. С применением оптических осцилляций рассчитаны эффективные показатели преломления анодного оксида алюминия и установлено их увеличение на 0,04 в среде изопропилового спирта по сравнению с воздухом для образцов толщиной порядка 2–5 мкм. Показана возможность определения пористости анодного оксида алюминия по сдвигу осцилляций Фабри – Перо в средах с различными показателями преломления. Установлено хорошее согласие значений пористости, полученных из расчетов спектров отражений и электронно-микроскопических изображений.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, оптические свойства, эффективный показатель преломления, пористость, коэффициент отражения, оптическая толщина.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гасенкова, И. В. Параметры анодного оксида алюминия, определяемые из осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20>.

PARAMETERS OF ANODIC ALUMINA DETERMINED FROM FABRY – PEROT OSCILLATIONS IN SPECULAR REFLECTION SPECTRA

IRINA V. GASENKOVA, NIKOLAI I. MUKHUROV, IRYNA M. ANDRUKHOVICH

State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26.07.2024

Abstract. The Fabry – Perot oscillations in specular reflection spectra in the visible wavelength range depending on the anodic alumina thickness have been investigated. The anodic alumina was formed in 1.0 M H_2SO_4 aqueous solution with the 1:1 water to ethylene glycol solution additive. The oxides fabrication conditions have been established whose reflection spectra were characterized by high intensity of oscillations to be used in sensor structures. Using these optical oscillations data, the anodic alumina effective refractive indices have been calculated; the increase by 0.04 has been revealed in the isopropyl alcohol solution compared to the air medium

for the 2 to 5 micrometer thick samples. The ability to determine the anodic alumina porosity using the Fabry – Perot oscillation shift in the different refractive indices media has been shown. A good agreement between the porosity values obtained from the reflection spectra calculations and the electron microscopic images has been established.

Keywords: anodic alumina, optical properties, effective refractive index, porosity, reflection coefficient, optical thickness.

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

For citation. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andrukhovich I. M. (2024) Parameters of Anodic Alumina Determined from Fabry – Perot Oscillations in Specular Reflection Spectra. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20> (in Russian).

Введение

Взаимодействие света с наноструктурированным пористым анодным оксидом алюминия (АОА) приводит к появлению оптических свойств, которые представляют интерес как на уровне научных исследований, так и практического применения [1]. Особое внимание уделяется анодному оксиду с упорядоченным расположением пор и отличающимся различной степенью пористости наноразмерными слоями. Изученные их оптические свойства – наличие фотонной стоп-зоны, интерферометрические и фотолюминесцентные свойства, прозрачность в определенном диапазоне длин волн – могут быть применены к созданию биосенсоров, компонентов фотоники, таких как отражатели с распределенным эффектом Брэгга или фильтры с характеристическими фотонными полосами пропускания [2], а также сенсорные структуры с использованием фотолюминесценции (ФЛ) [3].

В пленках АОА с оптически гладкими поверхностями наблюдаемая в спектрах пропускания [4], отражения [5, 6], фотолюминесценции [4, 7] интерференция излучения характеризуется наличием осцилляций Фабри – Перо. Было исследовано влияние структурных параметров АОА, включая диаметры пор, расстояние между порами, длину пор, модификации поверхности осаждением тонкопленочных Au, Ag, Cr, Pt, Ni и TiO₂ на количество полос Фабри – Перо и интенсивность спектра АОА [7]. С учетом систематического исследования влияния длины пор и их диаметров на спектры зеркального отражения в АОА, в [8] предложена система штрихкодов для оценки чувствительности оптических биосенсоров к изменениям среды в порах оксида.

В [9] показано, что пористость АОА в диапазоне от 14 до 70 % и модификация оксида нанесением тонких (10 и 20 нм) слоев золота значительно улучшают контрастность колебаний в спектре отражения. Исследовано и подтверждено влияние температуры электролита на количество и интенсивность колебаний, обусловленных интерференцией Фабри – Перо, в наблюдаемых спектрах ФЛ пленок АОА. Повышение температуры электролита при формировании оксида способствовало росту числа осцилляций с одновременным уменьшением их амплитуды [10].

Наличие осцилляций Фабри – Перо в оптических спектрах АОА при проведении спектроскопии зеркального отражения [8, 10, 11] и ФЛ [11, 12] позволяет определять эффективный показатель преломления материала и его изменения при взаимодействии анализируемого вещества с АОА. Показатель преломления, определяемый по осцилляциям, и его зависимость от морфологических характеристик АОА, которыми можно управлять при формировании оксида, дают возможность использовать АОА в качестве платформы для оптических датчиков и биосенсоров [13]. Аналитическим сигналом в них является сдвиг спектрального положения осцилляций Фабри – Перо при изменении среды. В [14] предложен альтернативный подход – использовать в качестве аналитического сигнала для оптических датчиков многофакторный анализ. Исследованы изменения оптических спектров с увеличением концентрации глюкозы и создана количественная регрессионная модель для определения концентраций глюкозы по спектрам ФЛ. Результаты показали, что многофакторный анализ может быть использован при интерференциях Фабри – Перо для получения откликов оптических датчиков.

Интерференция Фабри – Перо в оптических спектрах рассмотрена для пленок АОА, сформированных в простых электролитах, а также изучены осцилляции в спектрах фотолюминесценции. В литературе отсутствуют данные о возможности использования сложных электролитов для получения сенсорных платформ пористого оксида алюминия, обеспечивающих достаточную отражательную способность для получения высокоточного интерферометрического спектра отражения. В статье рассмотрены условия формирования в вязком электролите пригодной для сенсорных приложений морфологии АОА и показана возможность определения пористости оксида

по изменению спектрального положения осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения в среде изопропилового спирта.

Методика формирования образцов

На начальном этапе алюминиевая фольга А99 толщиной (100 ± 2) мкм была очищена в бензине при температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$, отрихтована при $160\text{ }^\circ\text{C}$, а затем электрохимически отполирована в растворе оксида шестивалентного хрома и ортофосфорной кислоты. Использовали импульсный режим полировки при общем количестве импульсов 40, длительности импульсов 3 с, паузе между ними 40 с и плотности тока 400 mA/cm^2 . Анодирование алюминия осуществляли в двух-электродной электрохимической ячейке объемом 2 л с катодом из пластины алюминия. В качестве электролита использовали водный раствор $1,0\text{ M H}_2\text{SO}_4$ с добавлением этиленгликоля в соотношении 1:1 воды и этиленгликоля. Электролит интенсивно перемешивался, его температура поддерживалась с помощью термостата и составляла $5\text{ }^\circ\text{C}$. Анодирование проводили в потенциостатическом режиме при напряжении 25 В до достижения значений протекающего электрического заряда 2, 4, 10, 14, 20 Кл при площади образцов 1 cm^2 .

Спектры зеркального отражения образцов измеряли при комнатной температуре на воздухе и в среде изопропилового спирта. Зеркальное отражение исследовали с помощью спектрофотометра MC 122 Proscan Special Instrument, а морфологию и толщину образцов – на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-4800 (Япония) в режиме вторичных электронов.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры отражения образцов АОА, полученные в потенциостатическом режиме при напряжении 25 В и плотности электрического заряда Q в процессе анодирования 2, 4, 10, 14, 20 Кл/см². В спектрах зеркального отражения отчетливо видны интенсивные осцилляции коэффициента отражения, которые объясняются резонансами Фабри – Перо для света, проходящего сквозь весь образец АОА толщиной d , и подтверждают высокую однородность толщины этих образцов.

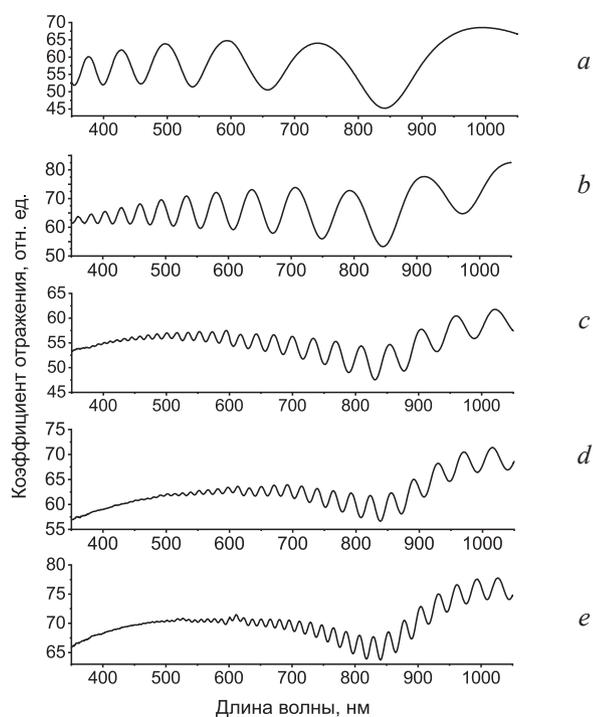


Рис. 1. Спектральная зависимость зеркального отражения пленок анодного оксида алюминия, сформированных при прохождении заряда, Кл: *a* – 2; *b* – 4; *c* – 10; *d* – 14; *e* – 20

Fig. 1. Spectral dependence of the mirror reflection of anodic aluminum oxide films formed during the passage of a charge, C: *a* – 2; *b* – 4; *c* – 10; *d* – 14; *e* – 20

Различия в спектрах отражения связаны с амплитудой и частотой интерференционных полос. Для АОА, полученного при Q , равном 2 и 4 Кл/см², в спектрах отчетливо видны интенсивные осцилляции Фабри – Перо в диапазоне длин волн более 400 нм (рис. 1, *a, b*). Оксидная пленка, полученная при 10 Кл/см², характеризуется спектром с высоким разрешением пиков в диапазоне длин волн более 500 нм и большим количеством полос (рис. 1, *c*). Колебания Фабри – Перо в спектрах образцов, полученных при значениях Q , равных 14 и 20 Кл/см², слабые или полностью отсутствуют в видимой области (рис. 1, *d, e*).

Расстояние между соседними пиками оптической интерференции Фабри – Перо увеличивается с длиной волны в соответствии с соотношением

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d \left[n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right]}, \quad (1)$$

где λ – длина волны света; n – показатель преломления АОА; d – толщина образца; $dn/d\lambda$ – дисперсия материала.

Для более коротких длин волн соседние колебания не могут быть разрешены, поэтому в коротковолновой части спектра наблюдается исчезновение оптических интерференционных полос Фабри – Перо. Согласно (1), расстояние между пиками оптической интерференции Фабри – Перо уменьшается из-за увеличения толщины пленки при том же λ . Это хорошо видно на рис. 1.

Типичные РЭМ-изображения АОА показаны на рис. 2 на примере образцов, сформированных при количестве электричества 4 и 10 Кл/см². Пленки имеют гексагонально упорядоченные ячейки с порами в центре, среднее значение диаметров которых 25,8 нм. Средний диаметр ячеек D_{int} практически постоянен и составляет 61,5 нм для образца с $Q = 4$ Кл/см² и 65,1 нм – с $Q = 10$ Кл/см². Согласно результатам анализа РЭМ-изображений, толщина пленок АОА, полученного при температуре 5 °С и напряжении 25 В, составляет 2,11 мкм для образца с зарядом формирования 4 Кл (рис. 2, *a, c*) и 4,81 мкм – для образца с 10 Кл (рис. 2, *b, d*).

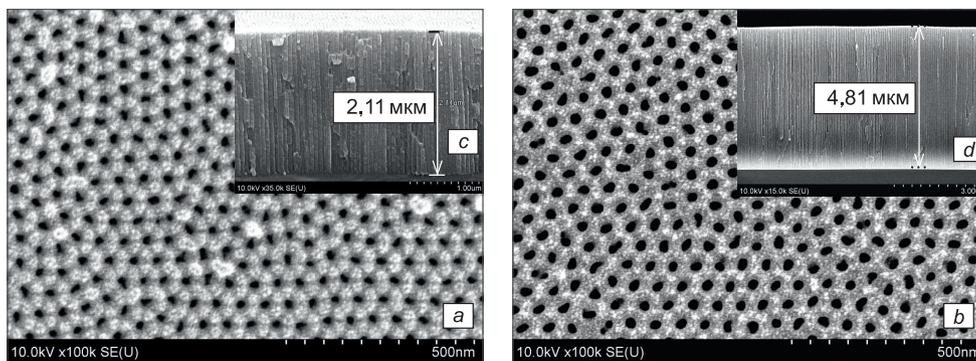


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности образцов, сформированных при $Q = 4$ Кл (*a, c*) и $Q = 10$ Кл (*b, d*) со стороны электролит–анодный оксид алюминия (*a, b*) и скола (*c, d*)

Fig. 2. The surface SEM images for the samples formed at $Q = 4$ C (*a, c*) and $Q = 10$ C (*b, d*) from the side electrolyte–anodic aluminum oxide (*a, b*) and the cleavage (*c, d*)

Таким образом, пленки толщиной 2,11 и 4,81 мкм были выбраны для изучения зависимости эффективного показателя преломления пленок от показателя преломления вещества, заполняющего поры, и использования в сенсорных структурах, поскольку им соответствуют на спектрах отражения осцилляции максимальной интенсивности и количества. Для оценки изменения оптических свойств АОА при заполнении пор веществами с показателем преломления по сравнению с воздухом больше единицы были сняты спектры зеркального отражения в среде изопропилового спирта (рис. 3). Графики разнесены по вертикальной оси для удобства восприятия.

Показатель преломления изопропилового спирта ($n = 1,378$) больше показателя преломления воздуха ($n = 1,000$), поэтому, согласно формуле [15]:

$$n_{эф} = \sqrt{n_{Al_2O_3}^2 (1 - P) + n_{среды}^2 P}, \quad (2)$$

где $n_{Al_2O_3}$ – показатель преломления стенок ячеек анодного оксида; $n_{среды}$ – показатель преломления заполняющего поры вещества; P – пористость АОА.

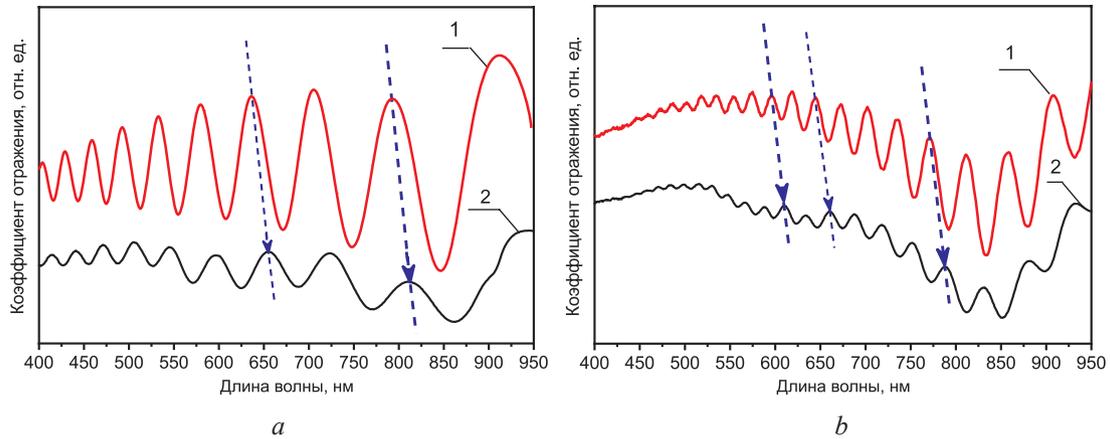


Рис. 3. Спектры отражения исходных (1) и пропитанных изопропиловым спиртом (2) образцов анодного оксид алюминия, полученных при Q , Кл/см²: $a - 4$; $b - 10$; смещение осцилляций Фабри – Перо показано стрелками
Fig. 3. Reflectance spectra of the initial (1) and isopropyl alcohol-impregnated (2) samples of anodic aluminum oxide obtained at Q , C/cm²: $a - 4$; $b - 10$; the shift of the Fabry-Perot oscillations is shown by arrows

Эффективный показатель преломления АОА будет расти при заполнении пор и обуславливать сдвиг осцилляций Фабри – Перо в область более длинных волн (рис. 3). По положению максимумов осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения определены значения эффективного показателя преломления пленок анодного оксида на воздухе и помещенных в изопропиловый спирт по формуле

$$n_{\text{эф}}^2 = \left(\frac{N_2 - N_1}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1) d} \right)^2 + \sin^2 \theta, \quad (3)$$

где N_1, N_2 – номер максимума коэффициента отражения; λ_1, λ_2 – соответствующая максимумам коэффициента отражения длина волны, нм; θ – угол падения светового пучка на образец.

Оптическая толщина определялась умножением эффективного показателя преломления на геометрическую толщину, определенную по данным анализа РЭМ-изображений (рис. 2). Значения показателей преломления и оптической толщины представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оптические характеристики спектров зеркального отражения образцов анодного оксида алюминия

Table 1. Optical characteristics of specular reflection spectra of anodic aluminum oxide samples

Плотность электрического заряда Q , Кл/см ²	Среда	Положение пика, нм		Толщина образца d по данным РЭМ, мкм	Оптическая толщина nd	Эффективный показатель преломления $n_{\text{эф}}$
		λ_1	λ_2			
4	1	392	671	2,11	3,31	1,57
	2	402	688		3,40	1,61
10	1	606	685	4,81	7,94	1,65
	2	623	675		8,13	1,69

Примечание – 1 – воздух; 2 – изопропиловый спирт.

Таким образом, для образцов с $Q = 4$ и $Q = 10$ Кл/см² установлено одинаковое увеличение эффективного показателя преломления на 0,04. Следовательно, пленки, полученные анодированием алюминия при приведенных выше условиях, могут быть использованы для применения в сенсорных структурах.

Исходя из оптических характеристик образцов, можно определить пористость АОА. Из формулы (2) следует, что квадрат эффективного показателя преломления АОА линейно зависит от квадрата эффективного показателя преломления среды, при этом значение углового коэффициента будет равно значению пористости. Линеаризация полученных экспериментальных данных (рис. 4) эффективного показателя преломления для воздуха (1,57 и 1,65) и для изопропилового спирта (1,61 и 1,69) имеет вид $n_{\text{эф}}^2 = 2,5577 + 0,1576n_{\text{среды}}^2$ для пленок АОА,

сформированных при плотности электрического заряда в процессе анодирования 4 Кл/см², и $n_{эф}^2 = 2,3336 + 0,1421n_{среды}^2$ – при 10 Кл/см².

В соответствии с данными рис. 4 значение углового коэффициента равно 0,1421 для АОА, полученного при величине протекающего заряда 4 Кл, следовательно, пористость составляет 14,21 %. Для АОА, полученного при 10 Кл, угловой коэффициент равен 0,1576, и пористость составляет 15,76 %. Следует отметить, что эти значения хорошо согласуются с данными, полученными из анализа РЭМ-изображений. С учетом измерений с помощью РЭМ определены средний диаметр пор и ячеек образцов АОА и рассчитана пористость по формуле

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D_p}{D_{int}} \right)^2, \quad (4)$$

где D_p – диаметр поры; D_{int} – диаметр ячейки.

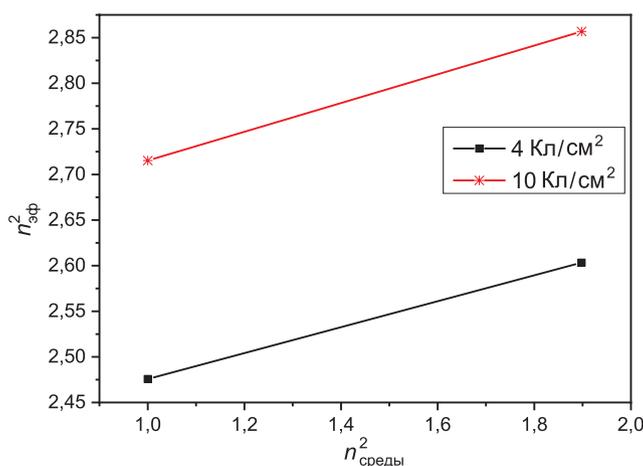


Рис. 4. Линейная аппроксимация экспериментальных данных квадрата эффективного показателя преломления анодного оксида алюминия от квадрата показателя преломления среды

Fig. 4. Linear approximation of experimental data of the square of the effective refractive index of anodic aluminum oxide from the square of the refractive index of the medium

Значения пористости составили 14,24 % для образца с зарядом формирования 4 Кл и 15,96 % – с зарядом формирования 10 Кл. Разница в пористости при расчете через средний диаметр пор и ячеек и при вычислении через линейную аппроксимацию экспериментальных данных квадрата эффективного показателя преломления составляет не более 0,2 %.

Заключение

1. Показана возможность применения вязких электролитов на основе серной кислоты и приведены режимы формирования слоев анодного оксида алюминия, которые обеспечивают получение спектров отражения с хорошо различимыми максимумами осцилляций Фабри – Перо.

2. Определены эффективные показатели преломления, оптическая толщина образцов анодного оксида алюминия, полученных при напряжении 25 В и при плотностях электрического заряда 4 и 10 Кл/см², которые соответствуют геометрической толщине 2,11 и 4,81 мкм на воздухе и в среде изопропилового спирта. Установлено одинаковое увеличение эффективного показателя преломления на 0,04 в изопропиловом спирте в сравнении с воздухом для данных образцов. Это подтверждает возможность использования анодного оксида алюминия в оптических сенсорных структурах.

3. По изменению спектрального положения максимумов осцилляций Фабри – Перо на спектрах зеркального отражения определена пористость анодного оксида алюминия, которая согласуется со значениями пористости, полученными методом электронной микроскопии.

Список литературы / References

1. Ferre-Borrull J., Xifré-Pérez E., Pallares J., Marsal L. (2015) Optical Properties of Nanoporous Anodic Alumina and Derived Applications. *Springer Series in Materials Science*. 219, 185–217. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8_6.

2. Acosta Capilla L., Berto-Rosello F., Xifré-Pérez E., Santos A., Ferre-Borrull J., Marsal L. (2019) Filters with Tunable Multispectral Photonic Stopbands as Sensing Platforms. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 11 (3), 3360–3371. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.8b19411>.
3. Choudhari K. S., Suresh D., Kulkarni, Unnikrishnan V. K., Rajeev K., Sinha, Santhosh C., Sajan D. George (2019) Optical Characterizations of Nanoporous Anodic Alumina for Thickness Measurements Using Interference Oscillations. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100354>.
4. Xu W. L., Chen H., Zheng M. J., Ding G. Q., Shen W. Z. (2006) Optical Transmission Spectra of Ordered Porous Alumina Membranes with Different Thicknesses and Porosities. *Opt. Mater.* 28, 1160–1165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2005.07.003>.
5. Trivinho-Strixino F., Guerreiro H. A., Gomes C. S., Pereira E. C., Guimaraes F. E. G. (2010) Active Waveguide Effects from Porous Anodic Alumina: An Optical Sensor Proposition. *Appl. Phys. Lett.* 97, 011902–011904. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3447375>.
6. Kant K., Low S. P., Marshal A., Shapter J. G., Losic D. (2010) Nanopore Gradients on Porous Aluminum Oxide Generated by Nonuniform Anodization of Aluminum. *ACS Appl. Interfaces*. 2 (12), 3447–3454. <https://doi.org/10.1021/am100502u>.
7. Gardelis S., Nassiopoulou A. G., Giannetta V., Theodoropoulou M. (2010) Photoluminescence Induced Oscillations in Porous Anodic Aluminum Oxide Films Grown on Si: Effect of the Interface and Porosity. *J. Appl. Phys.* 107, 113104–113108. <https://doi.org/10.1063/1.3432694>.
8. Santos A., Balderrama V. S., Alba M., Formentín P., Ferré-Borrull J., Pallarés J., et al. (2012) Tunable Fabry-Pérot Interferometer Based on Nanoporous Anodic Alumina for Optical Biosensing Purposes. *Nanoscale Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-370>.
9. Hernandez L., Ferre-Borrull J., Macias G., Pallarés J., Marsal L. (2014). Engineering Optical Properties of Gold-Coated Nanoporous Anodic Alumina for Biosensing. *Nanoscale Research Letters*. 9. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-414>.
10. Cantelli L., Santos J. S., Trivinho-Strixino F. (2016) The Effect of Anodization Temperature on Optical Properties of Nanoporous Anodic Alumina (NAA) Films. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 780, 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.01.009>.
11. Kumeria T., Santos A., Losic D. (2013) Ultrasensitive Nanoporous Interferometric Sensor for Label-Free Detection of Gold(III) Ions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 5 (22), 11783–11790. <https://doi.org/10.1021/am403465x>.
12. Alekseev S., Lysenko V., Zaitsev V., Barbier D. (2007) Application of Infrared Interferometry for Quantitative Analysis of Chemical Groups Grafted onto the Internal Surface of Porous Silicon Nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*. 111 (42), 15217–15222. <https://doi.org/10.1021/jp0712452>.
13. Santos A., Kumeria T., Losic D. (2013) Nanoporous Anodic Aluminum Oxide for Chemical Sensing and Biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 44, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.11.007>.
14. Ferro L., Lemos S., Ferreira M., Trivinho-Strixino F. (2017) Use of Multivariate Analysis on Fabry-Prerot Interference Spectra of Nanoporous Anodic Alumina (NAA) for Optical Sensors Purposes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 248, 718–723. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.051>.
15. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andrukovich I. M. (2023) Anodizing Aluminum in a Viscous Electrolyte to Produce One-Dimensional Photonic Crystals. *Vesti National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. 68 (1), 7–17. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-7-17>.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Гасенкова И. В., д-р физ.-мат. наук, доц., гл. науч. сотр., Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (ГНПО «ООЛТ»)

Мухуров Н. И., д-р техн. наук, проф., зав. лаб., ГНПО «ООЛТ»

Андрухович И. М., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГНПО «ООЛТ»

Адрес для корреспонденции

220090, Республика Беларусь
г. Минск, Логойский тракт, 22
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Тел.: +375 17 242-32-30
E-mail: mukhurov@oelt.basnet.by
Мухуров Николай Иванович

Information about the authors

Gasenkova I. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” (SSPA “OOLT”)

Mukhurov N. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Laboratory, SSPA “OOLT”

Andrukovich I. M., Cand. of Sci., Senior Researcher, SSPA “OOLT”

Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,
Minsk, Logoiskii Trakt, 22
SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
Tel.: +375 17 242-32-30
E-mail: mukhurov@oelt.basnet.by
Mukhurov Nikolai Ivanovich