

УДК 535.361

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_1_62_7

EDN: QGYDDM

АНАЛИЗ СТОП-ЗОН ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

И.В. Гасенкова, Н.И. Мухуров, И.М. Андрухович

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

ANALYSIS OF STOP ZONES OF PHOTONIC-CRYSTALLINE STRUCTURES OF ANODIC ALUMINUM OXIDE

I.V. Gasenkova, N.I. Mukhurov, I.M. Andrukhovich

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

Аннотация. Изучено влияние температуры и состава электролита, количества и величины периодов фотонно-кристаллических (ФК) структур анодного оксида на алюминии и без алюминия на спектральное положение стоп-зон (СЗ). Установлены гипсохромный сдвиг максимума СЗ на 76 нм при увеличении температуры электролита от 7 до 12°С и на 103 нм при изменении количества периодов от 52 до 230, bathochromный сдвиг на 160 нм при увеличении периода структуры в 1,5 раза. Получены ФК структуры с коэффициентом пропускания 0,1% и коэффициентом отражения 83% в области СЗ. ФК структуры имеют окраску, колориметрические характеристики определены, представлены на диаграмме цветности и согласуются с положением СЗ.

Ключевые слова: фотонно-кристаллическая структура, анодный оксид алюминия, спектр зеркального отражения, стоп-зона.

Для цитирования: Гасенкова, И.В. Анализ стоп-зон фотонно-кристаллических структур анодного оксида алюминия / И.В. Гасенкова, Н.И. Мухуров, И.М. Андрухович // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 1 (62). – С. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_1_62_7. – EDN: QGYDDM

Abstract. The influence of the temperature and composition of the electrolyte, the number and value of the periods of photonic crystal (PC) structures of anodic oxide on aluminum and without aluminum on the spectral position of the stop zones (SZ) was studied. A hypsochromic shift of the SZ maximum by 76 nm was established with an increase in the electrolyte temperature from 7 to 12°С and by 103 nm with a change in the number of periods from 52 to 230, a bathochromic shift by 160 nm with an increase in the structure period by 1.5 times. PC structures with a transmittance of 0.1% and a reflectivity of 83% in the SZ region were obtained. The PC structures have a color, the colorimetric characteristics are determined, presented on the chromaticity diagram and are consistent with the SZ position.

Keywords: photonic crystal structure, anodic aluminum oxide, specular reflection spectrum, stop zone.

For citation: Gasenkova, I.V. Analysis of stop zones of photonic-crystalline structures of anodic aluminum oxide / I.V. Gasenkova, N.I. Mukhurov, I.M. Andrukhovich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 1 (62). – P. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_1_62_7 (in Russian). – EDN: QGYDDM

Введение

Наличие в энергетическом спектре запрещенных зон является основным свойством для ФК структур, спектральное положение которых необходимо прогнозировать для управления оптическими свойствами при практических приложениях. Анодный оксид алюминия с чередующимися слоями различной пористости проявляет свойства фотонных кристаллов [1], [2]. В последнее время фотонно-кристаллические структуры на основе анодного оксида алюминия находят применение в качестве оптических микрорезонаторов [3], распределенных брэгговских отражателей [4]–[6], оптических фильтров [7]–[9] и оптических сенсоров [10]–[13] благодаря избирательности в различных областях спектра.

АОА является пористым материалом с высокой химической стабильностью, свойства

оксида варьируются с помощью условий анодирования (плотность тока и напряжения анодирования, состав и температура электролита и т. д.), что позволяет формировать ФК структуры с заданными функциями [14]–[17]. Период ФК структуры, показатель преломления, а также угол падения излучения на поверхность ФК структур определяют спектральное положение стоп-зон. Периодом структуры и показателем преломления слоев АОА можно управлять в процессе анодирования. Для описания оптических свойств используют термины эффективной среды, поскольку длина волны света существенно больше диаметра пор, который может варьироваться от 15 до 100 нм в зависимости от условий формирования.

Рассмотрены технологические аспекты и влияние условий формирования на оптические

свойства ФК структур, сформированных в электролитах на основе серной кислоты с добавкой этиленгликоля в различных соотношениях. Электролиты на основе серной кислоты широко используются в промышленности для формирования анодных оксидных пленок и, согласно литературным данным, наиболее распространены для формирования ФК.

1 Методика эксперимента

Формирование фотонных кристаллов на основе анодного оксида алюминия проводилось в двухэлектродной ячейке с принудительным перемешиванием, в качестве катода использовалась пластина алюминия А99, в качестве анода – образец. Образец представлял собой алюминиевую пластину толщиной 100 мкм, полированную в импульсном режиме в растворе ортофосфорной кислоты и шестивалентного оксида хрома [18]. В качестве электролита использовался водный раствор серной кислоты с добавлением этиленгликоля различной концентрации. Режимы анодирования при периодически изменяющейся плотности тока с прямоугольной формой импульса с составами электролитов и величинами плотности электрического заряда (Q) в течение периода формирования ФК структуры и суммарной плотности заряда (Q_c) представлены в таблице 1.1. Суммарная плотность заряда $Q_c = Q \cdot N$, где N количество периодов.

Спектры зеркального отражения в диапазоне длин волн 190–1100 нм были исследованы с помощью спектрофотометра MC 122 Proscan special instrument при угле падения излучения относительно вертикали к поверхности образцов 10° и на спектрофотометре РВ 2201 при углах падения излучения 25° – 55° .

Координаты цвета и цветности ФК определяли, исходя из диаграммы цветности с использованием стандартных данных колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. (XYZ) и осветителя D65.

Изучение морфологии поверхности полученных фотонных кристаллов было проведено с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN с детекторами вторичных электронов SE при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Таблица 1.1 – Режимы анодирования

Состав электролита	Плотность заряда за период Q , Кл/см ²	Плотность тока, j , мА/см ²	Температура, T , °С	Количество периодов, N , шт.	Суммарная плотность заряда, Q_c , Кл/см ²
1,1М H ₂ SO ₄	0,44	0,4–2,27	5	52, 67, 111, 180, 230	22,3; 29,8; 47,5; 72; 90,0
1М H ₂ SO ₄ , 50 об.% этиленгликоля	0,44	0,4–1,8	5	165	66,8
1М H ₂ SO ₄ , 25 об.% этиленгликоля	0,44; 0,59; 0,66	0,4–1,8	9	85, 91, 84	35,7; 51,2; 51,0
	0,44	0,4–1,8	7, 12, 17	85	35,7

2 Результаты эксперимента и их обсуждение

Появление осцилляций Фабри – Перо на спектрах обусловлено интерференцией света, отраженного от поверхности АОА и границы АОА – алюминий (рисунок 2.1). По мере увеличения количества периодов интенсивность осцилляций убывает. В коротковолновой области осцилляции не разрешены. Различие спектров состоит в изменяющемся спектральном положении СЗ и их смещении в коротковолновую область с увеличением количества периодов структуры.

Исследовали спектральное положение СЗ в структурах с количеством периодов равным 52, 67, 111, 180, 230, сформированных в водном растворе 1,1 М H₂SO₄, спектры зеркального отражения при угле падения излучения 10° которых представлены на рисунке 2.1. Качественно спектры имеют схожий вид: на спектрах присутствуют области, в которых коэффициент отражения имеет высокое значение, и области с малым значением коэффициента отражения. Коэффициент отражения в СЗ находится в диапазоне значений от 70 до 84%. Увеличение периода с 52 до 67 приводит к сдвигу с 478 нм до 476 нм (рисунки 2.1, а, б), при 111 периодах спектральное положение зоны равно 420 нм (рисунок 2.1, в) сдвиг составляет 58 нм. Дальнейшему увеличению количества периодов до 180 и 230 соответствует спектральное положение максимумов 411 и 375 нм (рисунки 2.1, г, д).

Спектральное положение определяется формулой [19]:

$$m\lambda = 2d\sqrt{n_{\text{эф}}^2 - \sin^2 \theta}, \quad (2.1)$$

где m – порядок отражения; λ – длина волны, соответствующая максимуму коэффициента отражения, нм; d – период структуры, нм; $n_{\text{эф}}$ – эффективный показатель преломления; θ – угол отражения, при котором снят спектр.

Поскольку период структуры оставался постоянным, то смещение максимума СЗ в коротковолновую область в соответствии с формулой (2.1) обусловлено изменением показателя преломления, который в свою очередь зависит от пористости оксида [20]:

$$n_{0\text{эф}}^2 = n_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 (1 - P) + P, \quad (2.2)$$

где $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – показатель преломления стенок ячеек анодного оксида алюминия, P – пористость анодного оксида алюминия.

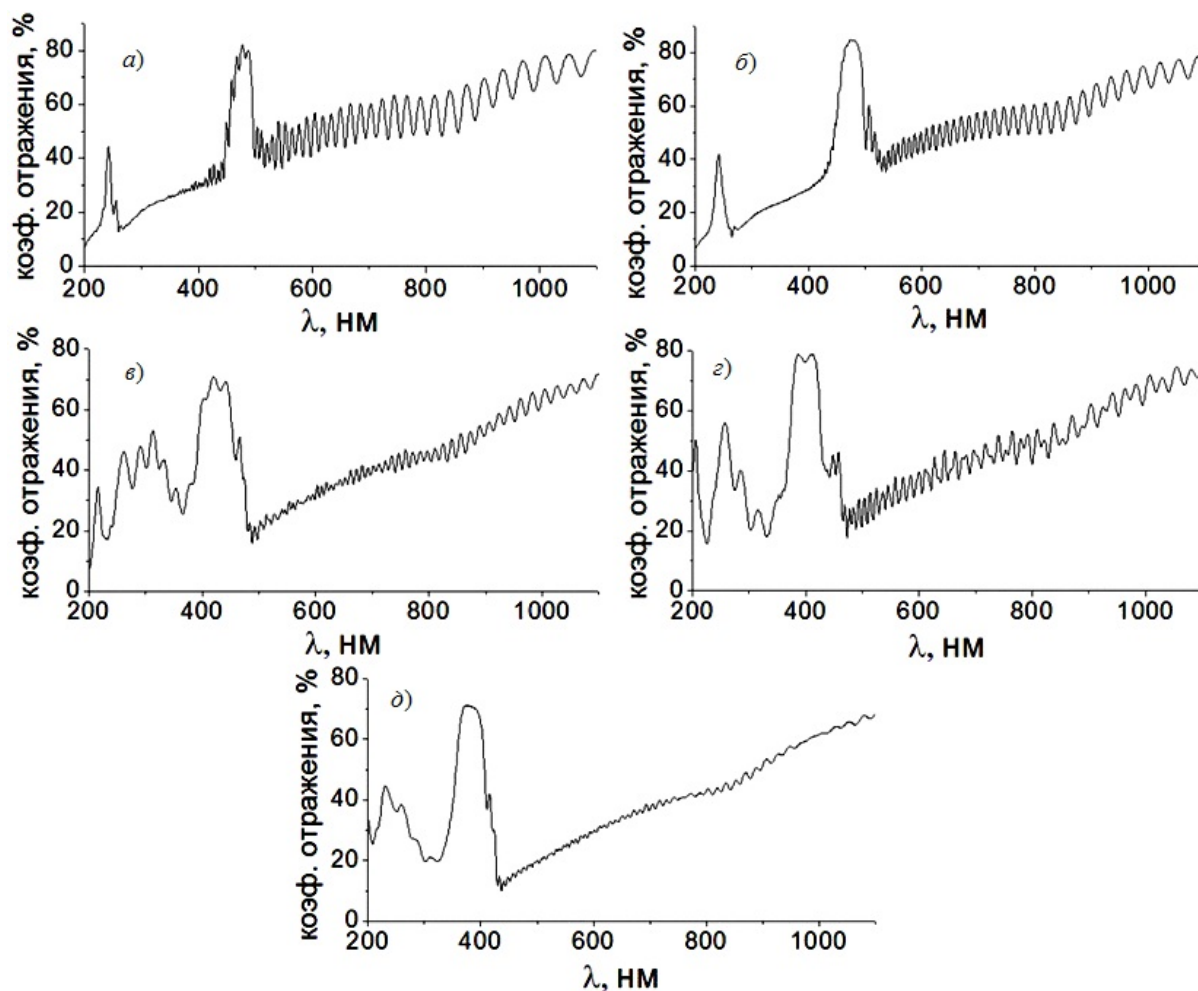


Рисунок 2.1 – Спектры зеркального отражения образцов ФК, сформированных в 1,1 М растворе серной кислоты при количестве периодов: а) 52, б) 67, в) 111, г) 180, д) 230

Следовательно, изменяется пористость оксида с увеличением количества периодов в процессе формирования анодного оксида алюминия. Это вызвано расширением пор вследствие химического травления. Чем длительнее процесс формирования ФК, тем больше изменения. Поэтому в верхних слоях фотонно-кристаллической структуры пористость всегда выше, чем в нижних. Это объясняет меньшее значение показателя преломления и, соответственно, сдвиг максимума стоп-зоны в коротковолновую область с увеличением количества периодов. Изменение пористости согласуется с данными, приведенными в работе [21].

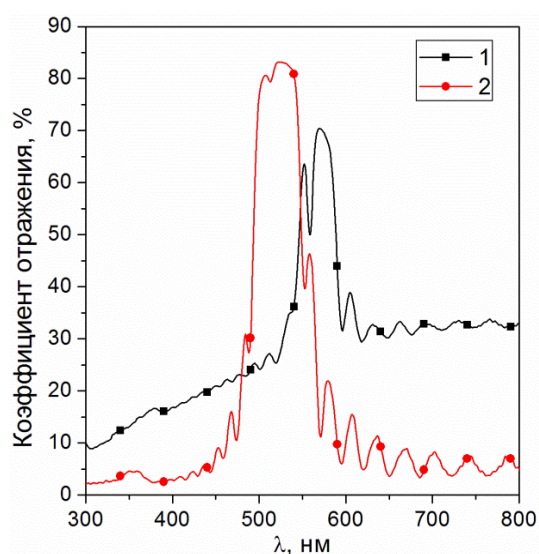
Фотонно-кристаллические структуры получены в 1,0 М серной кислоте в растворе воды и этиленгликоля в соотношениях 50:50 об.%. Сравнение спектров зеркального отражения ФК структур на алюминии и отделенных от алюминия (рисунок 2.2, а) показало отличие в различных спектральном положении СЗ и интенсивности фоновой составляющей спектров. Отделение ФК от алюминиевой основы проводилось в течение

15–20 минут в водном растворе соляной кислоты и хлорида меди (II) при температуре $22 \pm 1^\circ \text{C}$. Большая интенсивность фона структур на алюминии вызвана отражением от поверхности алюминия. Сдвиг максимума пика СЗ на 53 нм в область коротких волн связан с изменением оптической толщины в соответствии с формулой (2.1). Изменением геометрической толщины АОО можно пренебречь, так как общая толщина структуры намного больше диаметра пор. Следовательно, происходит преимущественное химическое растворение стенок пор, растет пористость, которая определяет уменьшение показателя преломления оксида. Это согласуется с кинетикой растворения оксида, приведенной в [22].

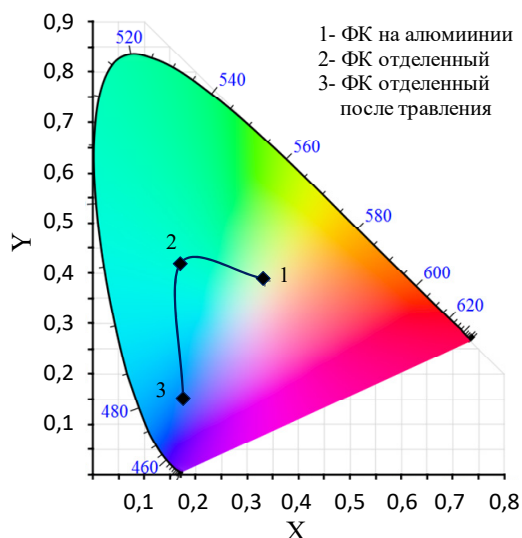
Дальнейшая выдержка в травителе свободных от алюминия структур в условиях, соответствующих отделению от алюминия, приводит к аналогичному результату (рисунок 2.3, а). Величины сдвигов максимумов стоп-зон близки по значению и составляют 53 и 56 нм. Подтверждается хорошая воспроизводимость изменения пористости ФК структур в данных условиях, что

позволяет управлять спектральным положением СЗ. Наблюдается согласие в положении СЗ в спектрах пропускания (рисунок 2.3, б) и отражения (рисунок 2.3, а). Коэффициент пропускания в СЗ достигает 0,1%, снижаясь с 58%, коэффициент отражения равен 83%.

На рисунке 2.2, б, представлены цветовые координаты в цветовой диаграмме СIE максимумов СЗ спектров зеркального отражения ФК структур на алюминии, свободных и дополнительно травленных, свободных от алюминия. Различные цвета и значения координат цвета подтверждают смещение стоп-зон при травлении фотонно-кристаллических структур, следовательно, возможно получать различные цвета, изменяя время травления.



а) спектры зеркального отражения образцов ФК при угле падения 10° на алюминии (1) и отделенного от алюминия (2);



б) диаграмма цвета ФК

Рисунок 2.2 – Сравнение спектров зеркального отражения ФК структур на алюминии и отделенных от алюминия

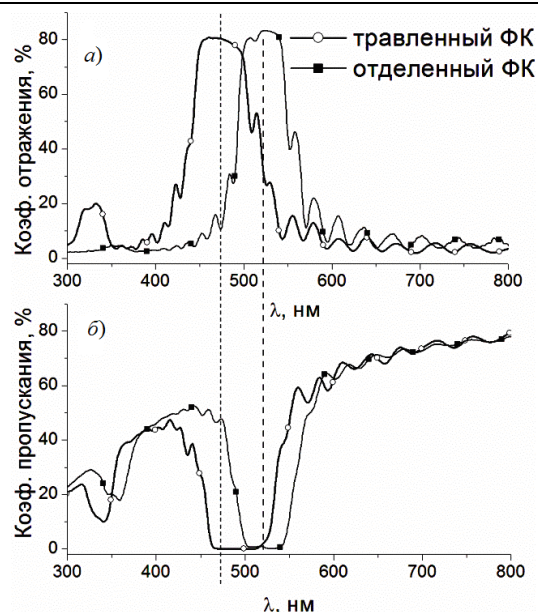


Рисунок 2.3 – Спектры зеркального отражения при угле падения 10° (а) и пропускания (б) образцов ФК

Особенностью ФК структур, полученных в электролите с 50% этиленгликоля, является не наблюдаемая и нехарактерная для структур, полученных в других электролитах, морфология поверхности (рисунок 2.4, а). Она имеет развитый рельеф в виде точечных выступов. Они становятся заметны после 75 периодов, затем сливаются друг с другом, образуя характерный рисунок в виде линий. Часть линий образует концентрические окружности, в центре которых располагается одиночный выступ. Наблюдается упорядочение в рисунке линий. При этом изменяются колориметрические характеристики, образуя дополнительный золотистый к основному зеленому цвет. Между линиями наблюдается, характерная для ФК структуры, морфология поверхности со стороны барьерного слоя (рисунок 2.4, б).

На рисунке 2.5 приведены спектры зеркального отражения в диапазоне длин волн от 350 до 1000 нм при угле падения излучения, равном 45° , структур с разной величиной периода ФК. В соответствие с формулой (2.1) при увеличении значения периода спектральные положения СЗ смещаются в длинноволновую область. При увеличении плотности заряда на период на $0,15 \text{ Кл/см}^2$ наблюдается смещение максимума СЗ на 138 нм, при угле излучения 45° , увеличение на $0,22 \text{ Кл/см}^2$ приводит к смещению на 160 нм. Сдвиг СЗ приводит к изменению визуально определяемого цвета. В таблице 2.2 приведены данные для фотонно-кристаллических структур с плотностью заряда на период $0,44 \text{ Кл/см}^2$, $0,59 \text{ Кл/см}^2$ и $0,66 \text{ Кл/см}^2$, общей плотностью заряда $35,8 \text{ Кл/см}^2$, $51,2 \text{ Кл/см}^2$, $51,0 \text{ Кл/см}^2$ и количеством периодов 85, 91 и 84 соответственно. Изменение цвета подтверждает смещение пика СЗ, приведенные колориметрические характеристики соответствуют положению СЗ.

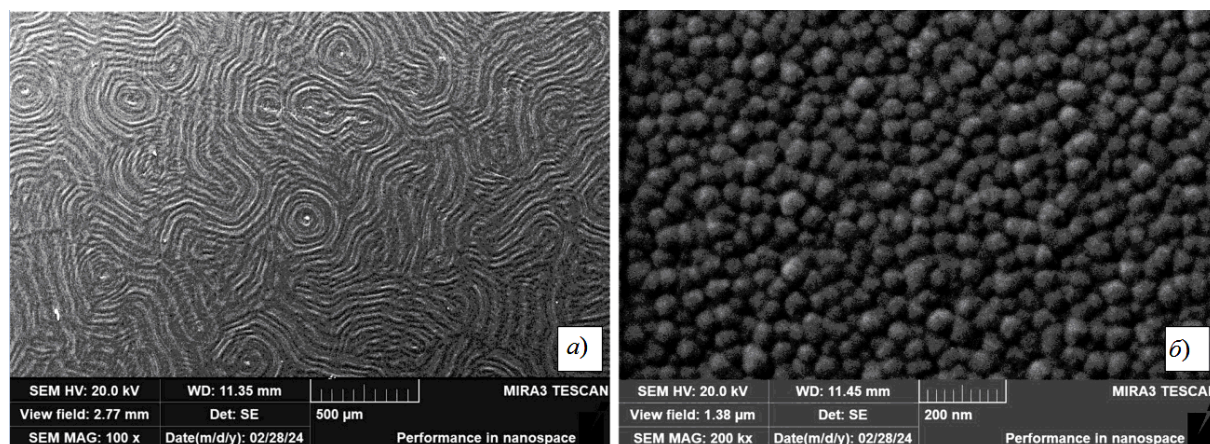


Рисунок 2.4 – Морфология поверхности образца ФК, полученного в электролите с добавлением 50% этиленгликоля (а); увеличенный масштаб (б)

Таблица 2.2 – Основные параметры цветности ФК структур при различных плотностях заряда и количествах периодов

Плотность заряда на период, Q , Кл/см ²	Угол, Θ , °	Положение СЗ, λ , нм	Координаты цвета			Цвет
			X	Y	Z	
0,44	25	504	1375.9188	1716.9317	1528.2883	
	45	450	1298.5556	1143.2592	2319.4635	
0,59	25	667	224.5916	213.1972	231.4438	
	45	588	2178.0591	2204.4718	1427.3478	
0,66	25	700	1778.6567	1842.3455	1746.1523	
	45	610	2564.7755	2405.8881	1906.2879	

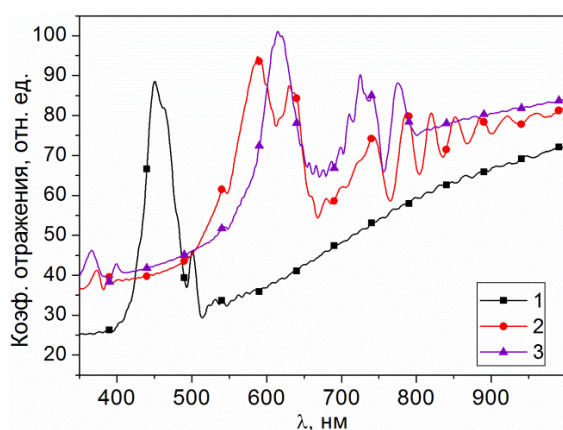


Рисунок 2.5 – Спектры зеркального отражения ФК структур с Q 0,44 Кл/см² (1), 0,59 Кл/см² (2), 0,66 Кл/см² (3)

На рисунке 2.6, а, представлены спектры зеркального отражения при угле 25° образцов ФК, полученных в диапазоне температуры от 7° С до 17° С. Увеличение температуры до 12° С приводит к смещению спектрального положения

максимума СЗ на 76 нм в коротковолновую область, при дальнейшем увеличении температуры до 17° С происходит размытие фотонной зоны. Поскольку анодирование проводили при периодическом изменении плотности тока, то напряжение также периодически изменялось с максимального до минимального значений. При этом максимальное напряжение формирования структур при заданных неизменных токовых значениях уменьшалось с ростом температуры электролита от 19,4 В при 7° С до 15,4 В при 12° С и 10,9 В при 17° С. Минимальные значения составляли 7,0 В, 5,6 В и 4,1 В при температурах 7° С, 12° С, 17° С, соответственно. Напряжение анодирования и межпоровое расстояние / диаметр ячейки связаны выражением [23]:

$$U \approx k \cdot D_{int}, \quad (2.3)$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный 2,5 [23], [24].

Согласно (2.3), уменьшение напряжения анодирования приведет к уменьшению межпорового расстояния / диаметра ячейки анодного оксида алюминия. В свою очередь пористость определяется по формуле:

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{D_p}{D_{int}} \right)^2, \quad (2.4)$$

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

Поэтому уменьшение межпорового расстояния / диаметра ячейки приведет к увеличению пористости (2.4), тем самым, согласно (2.2), к уменьшению показателя преломления и, согласно (2.1), к сдвигу в коротковолновую область.

Изменения в положении максимумов СЗ проявляются изменением цвета структур и соответствующим изменением цветовых координат на диаграмме цветности (рисунок 2.6, б). Таким образом, изменяя температуру электролита, можно формировать ФК структуры различной цветовой гаммы при прочих одинаковых условиях анодирования.

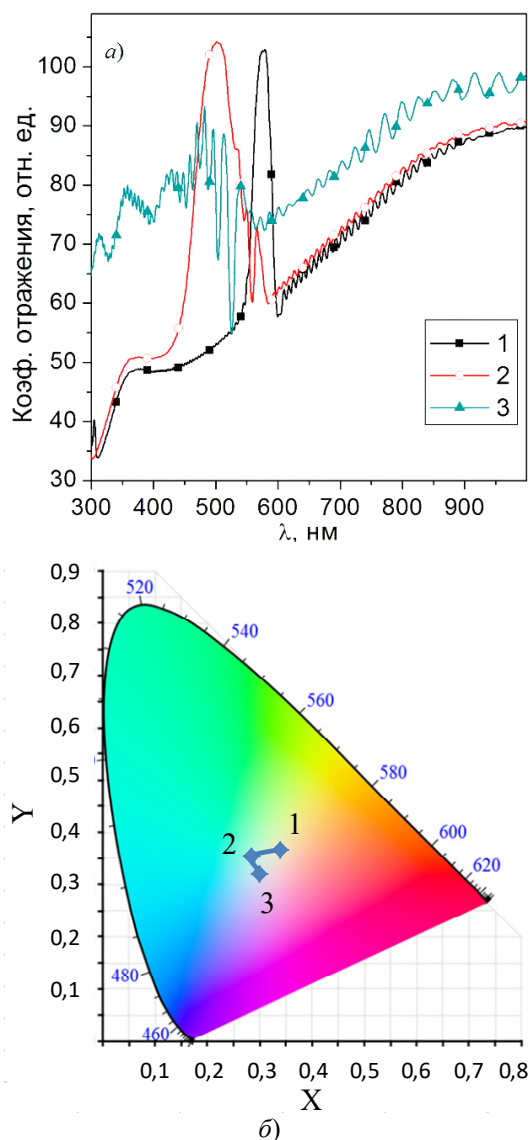


Рисунок 2.6 – Спектры зеркального отражения при угле 25° (а) и диаграмма цвета (б) образцов ФК, полученных при температуре: 1 – 7° С; 2 – 12° С; 3 – 17° С

Заключение

Определены спектральные положения стоп-зон фотонно-кристаллических структур анодного оксида алюминия, полученных в сернокислых электролитах с добавкой различного количества этиленгликоля при различных температуре и величине периода СЗ. Для ФК структур, полученных в растворе 1,0 М серной кислоты с 50% этиленгликоля, при плотности тока 0,4–1,8 мА/см² и количестве периодов 165, коэффициент пропускания равен 0,1%, коэффициент отражения 83% в области СЗ. Увеличение температуры электролита с 7 до 12° С приводит к гипсохромному сдвигу СЗ на 76 нм, при температуре 17° С наблюдается размытие фотонной зоны. Вследствие этого формирование ФК структур необходимо проводить при низких температурах электролита, не выше 12° С. К гипсохромному сдвигу СЗ на 103 нм приводит и рост количества периодов с 52 до 230. Увеличение периода ФК структуры с 0,44 Кл/см² до 0,66 Кл/см² приводит к батохромному сдвигу на 160 нм в соответствии с законом Брэгга – Снелла. Существенное изменение морфологии поверхности ФК структур наблюдается при формировании в водном растворе серной кислоты с добавлением этиленгликоля в объёме 50%. Развитый рельеф не характерен для структур, сформированных в электролитах, как в водном растворе серной кислоты, так и с добавкой 25% этиленгликоля.

Для исследования колориметрических характеристик использованы диаграммы цветности цветового пространства МКО 1931г (XYZ). Фотонно-кристаллические структуры на алюминии и отделенные от алюминия существенно отличаются окраской. При прочих одинаковых условиях анодирования, изменяя температуру электролита и величину периода, можно формировать ФК структуры различного цвета.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Optical engineering of nanoporous photonic crystals by Gaussian-Like pulse anodization* / L. Liu [et al.] // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2021. – Vol. 312. – P. 110770.
2. *Structural coloring of aluminum* / L. Yisen [et al.] // *Electrochem. Commun.* – 2011. – Vol. 13. – P. 1336–1339.
3. *Facile synthesis of optical microcavities by a rationally designed anodization approach: Tailoring photonic signals by nanopore structure* / Y. Wang [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2015. – Vol. 7. – P. 9879–9888.
4. *Sulka, G.D. Distributed Bragg reflector based on porous anodic alumina fabricated by pulse anodization* / G.D. Sulka, K. Hnida // *Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 23. – P. 075303–7.
5. *Tuning the photonic stop bands of nanoporous anodic alumina-based distributed Bragg reflectors by pore widening* / M. Rahman [et al.] // *ACS*

- Appl. Mater. Interfaces. – 2013. – Vol. 5. – P. 13375–13381.
6. *Interferometric nanoporous anodic alumina photonic coatings for optical sensing* / Y. Chen [et al.] // *Nanoscale*. – 2015. – Vol. 7. – P. 7770–9.
7. Sukarno, K.T. Realization and optical engineering of linear variable bandpass filters in nanoporous anodic alumina photonic crystals / K.T. Sukarno, Ch. Law, A. Santos // *Nanoscale*. – 2017. – Vol. 9. – P. 7541–7550.
8. *Nanoporous anodic alumina rugate filters for sensing of ionic mercury: Toward environmental point-of-analysis systems* / T. Kumeria [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2014. – Vol. 6. – P. 12971–12978.
9. *From gradient-index to step-index filters: A switch between the two types of photonic crystals induced by the amplitude and period of sinusoidal function applied during high-temperature anodization of aluminium* / G. Szwachta [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 607. – P. 155031.
10. Nemat, M. Fabrication and Optimization of Bilayered Nanoporous Anodic Alumina Structures as Multi-Point Interferometric Sensing Platform / M. Nemat, A. Santos, D. Losic // *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18. – P. 470.
11. *Anodic Alumina Photonic Crystals as Refractive Index Sensors for Controlling the Composition of Liquid Mixtures crystals* / C. S. Law [et al.] // *Nanomaterials*. – 2018. – Vol. 8. – P. 788–154.
12. *Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals for Optical Chemo- and Biosensing: Fundamentals, Advances, and Perspectives* / M. Ashurov [et al.] // *Photonic Sensors*. – 2020. – Vol. 10. – P. 147–154.
13. *Stacked Nanoporous Anodic Alumina Gradient-Index Filters with Tunable Multispectral Photonic Stopbands as Sensing Platforms* / L.K. Acosta [et al.] // *ACS Applied Materials & Interfaces* – 2019. – Vol. 11, № 3. – P. 3360–3371.
14. *Anodic alumina photonic crystals: Structure engineering, optical properties and prospective applications* / G. Shang [et al.] // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 34. – P. 105052.
15. *One-dimensional photonic crystals based on porous anodic alumina: Optical and morphology changes under thermal and chemical treatments* / N.A. Shirin [et al.] // *Optical Materials*. – 2024. – Vol. 152. – P. 115518.
16. *Tuning the optical properties of nanoporous anodic alumina photonic crystals by control of allowed voltage range via mixed acid concentration* / S. Abbasimofrad [et al.] // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2018. – Vol. 118. – P. 221–231.
17. *The effect of the voltage waveform on the microstructure and optical properties of porous anodic alumina photonic crystals* / S. Zhang [et al.] // *Optical Materials*. – 2019. – Vol. 98. – P. 109488.
18. Гасенкова, И.В. Угловые зависимости спектров зеркального отражения и цвета анодного оксида алюминия со свойствами фотонного кристалла / И.В. Гасенкова, Н.И. Мухуров, И.М. Андрухович // *Нано- и микросистемная техника*. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 18–24.
19. *Transmission spectra of one-dimensional porous alumina photonic crystals* / V.S. Gorelik [et al.] // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2018. – Vol. 32. – P. 6–10.
20. Schwarz, J.A. Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology / J.A. Schwarz, C.I. Contescu, K. Putyera. – Vol. 4. Issues in Science and Technology Librarianship. M. Dekker: New York, 2004. – 34 p.
21. Kushnir, S.E. Thickness-dependent iridescence of one-dimensional photonic crystals based on anodic alumina / S.E. Kushnir, K.S. Napolskii // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 144. – P. 140–150.
22. *Кинетика формирования и растворения анодного оксида алюминия в электролитах на основе серной и селеновой кислот* / А.И. Садыков [и др.] // *Журнал неорганической химии*. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 265–273.
23. Sulka, G.D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing / G.D. Sulka // *Nanostructured Materials in Electrochemistry*. Edited by Ali Eftekhari. – Weinheim: WILEY-VCH, 2008. – P. 1–116.
24. Lee, W. Structural engineering of nanoporous anodic aluminium oxide by pulse anodization of aluminium / W. Lee, K. Steinhart, E. Pippel, R. Scholz // *Nature Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 3. – P. 234–239.

Поступила в редакцию 09.12.2024.

Информация об авторах

Гасенкова Ирина Владимировна – д.ф.-м.н., доцент
 Мухуров Николай Иванович – д.т.н., профессор
 Андрухович Ирина Михайловна – к.т.н.