

УДК: 535

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-81-89

## СПЕКТРОСКОПИЯ СТОП-ЗОН ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

**Горелик В.С.<sup>1,2</sup>, Яшин М.М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, Российская Федерация*

<sup>2</sup> *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, Российская Федерация*

**Аннотация.** Зарегистрированы спектры отражения широкополосного излучения от поверхности одномерного фотонного кристаллов на основе оксида алюминия. Установлена угловая зависимость спектральных положений второй стоп-зоны одномерного фотонного кристалла. Рассчитан закон дисперсии электромагнитных волн в исследуемом образце. Анализируется возможность применений мезопористых одномерных фотонных кристаллов на основе оксида алюминия в качестве селективных узкополосных светофильтров.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, стоп-зона, узкополосный фильтр, формула Френеля, формула Брэгга.

## SPECTROSCOPY OF STOP-BANDS OF ONE-DIMENSION PHOTONIC CRYSTALS – POROUS ALUMINIUM OXIDE

**V. Gorelik<sup>1,2</sup>, M. Yashin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninsky prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5/1, 105005 Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** Reflectance spectra of broadband radiation from the surface of one-dimensional photonic aluminum oxide crystals are investigated. The angular dependence of the second stop-band spectral position is estimated. The dispersion law of electromagnetic waves in the samples is calculated. The possibility of application of mesoporous one-dimensional photonic aluminum oxide crystals as selective narrow-band filters is analyzed.

**Keywords:** photonic crystal, stop-band, narrow-band filter, Fresnel formula, Bragg formula.

## Введение

В настоящее время весьма актуальным является создание диэлектрических материалов с управляемыми оптическими свойствами. В связи с этим большой интерес исследователей вызывают так называемые фотонные кристаллы [1–4] – среды, диэлектрическая проницаемость которых периодически изменяется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света. Простейшим представителем фотонных кристаллов являются одномерные фотонные кристаллы, построенные из чередующихся слоев с двумя различными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . В спектре отражения такого кристалла наблюдаются так называемые запрещённые зоны (стоп-зоны). Стоп-зона представляет собой интервал частот, в пределах которого свет, распространяющийся в определённых направлениях, экспоненциально затухает. Спектральное положение стоп-зон зависит от показателей преломления слоёв, периода соответствующей кристаллической решётки и угла падения излучения на поверхность кристалла.

К настоящему времени разработан способ создания одномерных мезопористых фотонных кристаллов, основанный на электрохимическом травлении слоев оксида алюминия во время его анодирования из электролита [5; 6]. Тем самым реализуется «двухкомпонентный» одномерный фотонный кристалл, состоящий из большого числа двойных слоёв с различной степенью пористости. В результате были сформированы одномерные фотонные кристаллы на основе пористого оксида алюминия [5].

В данной работе была поставлена задача исследования спектров стоп-зон пористого одномерного фотонного кристалла на основе оксида алюминия и установления возможности управления его оптическими свойствами.

## Экспериментальная часть

На рис. 1 приведена экспериментальная схема установки для электрохимического травления алюминиевой пластины. При этом осуществляется периодическое изменение силы тока в цепи для изменения степени пористости смежных слоёв формируемой наноструктуры.

В результате процесса окисления алюминия в кислоте электролита происходит формирование мезопористого оксида алюминия с периодическим изменением степени пористости в смежных слоях. После многочасового процесса травления образуется мезопористый одномерный фотонный кристалл с конечным (200–300) числом периодов. Величина периода кристаллической решётки зависит от режима травления и составляет 200–400 нм.

На рис. 2 представлена фотография поверхности алюминиевой пластины, протравленной в процессе анодирования. В центре образца (область 3) находится фотонно-кристаллическая пленка пористого оксида алюминия. Данная плёнка окружена кольцевым слоем (область 2), состоящим из фотонно-кристаллической пленки пористого оксида алюминия, находящейся на алюминиевой подложке. Оставшаяся часть поверхности образца (область 1) соответствует чистому алюминию.

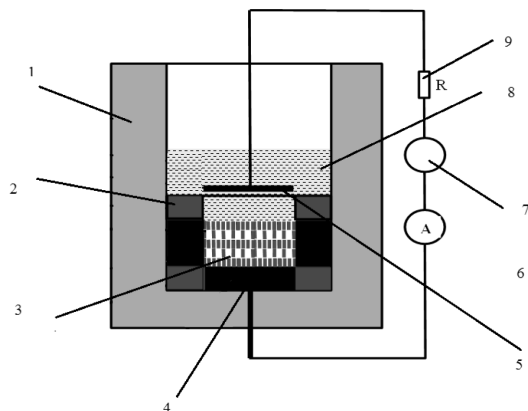


Рис. 1. Экспериментальная схема получения мезопористых фотонно-кристаллических плёнок оксида алюминия при электрохимическом травлении алюминиевой пластины;  
 1 – цилиндрический сосуд; 2 – диэлектрик; 3 – образец; 4 – анод; 5 – катод;  
 6 – амперметр; 7 – источник тока; 8 – кислота; 9 – сопротивление

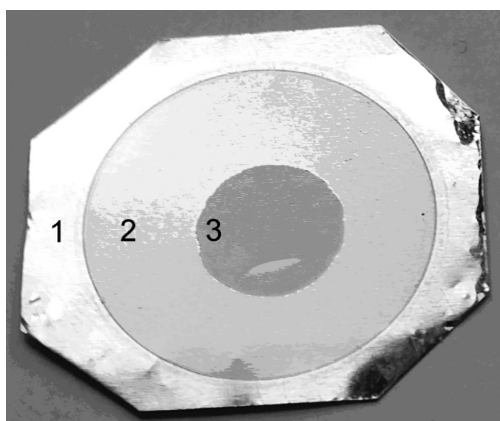


Рис. 2. Вид поверхности пористого фотонного кристалла на основе оксида алюминия;  
 1 – поверхность алюминия; 2 – поверхность фотонно-кристаллической плёнки, протравленной на алюминии; 3 – поверхность фотонно-кристаллической плёнки.

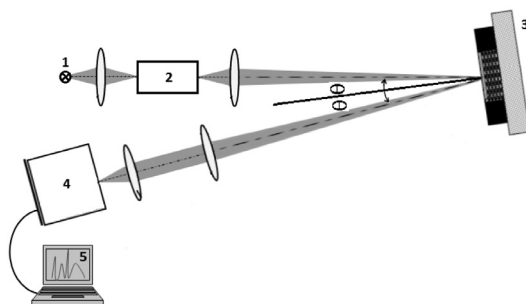


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. 1 – ксеноновая лампа, 2 – монохроматор, 3 – фотонный кристалл, 4 – приёмник излучения, 5 – компьютер.

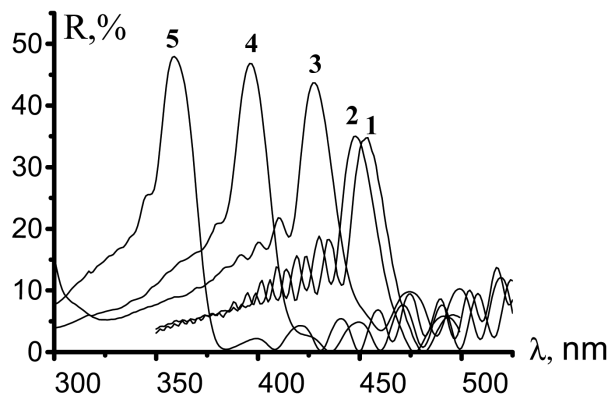


Рис. 4. Спектры отражения широкополосного излучения от поверхности фотонно-кристаллического образца при различных углах падения  $\theta$  (Рис. 3) излучения на поверхность фотонного кристалла;  
1 –  $\theta = 8$ , 2 –  $\theta = 15$ , 3 –  $\theta = 30$ , 4 –  $\theta = 45$ , 5 –  $\theta = 60$  градусов.

Схема экспериментальной установки для получения спектров зеркального отражения широкополосного излучения от поверхности фотонно-кристаллической плёнки при различных углах падения приведена на рис. 3.

Методика получения спектров отражения при нормальном падении этого излучения на поверхность фотонного кристалла изложена ранее в работе [9]. Спектры отражения излучения ксеноновой лампы от поверхности исследуемого образца, зарегистрированные при различных углах падения на поверхность плёнки ( $8, 15, 30, 45, 60^\circ$ ), соответствующие второй стоп-зоне, приведены на рис. 4.

Из известного соотношения [7] для угловой зависимости спектрального положения стоп-зон одномерного фотонного кристалла получаем:

$$m\lambda_B = 2a\sqrt{n_{ef}^2 - \sin^2 \theta}; \quad m = 1, 2. \quad (1)$$

Здесь  $a$  – период кристаллической решётки фотонного кристалла,

$$n_{ef}^2 = n_1^2 \eta + n_2^2 (1 - \eta); \quad \eta = 1/2.$$

В рассматриваемом случае анализа второй стоп-зоны ( $m = 2$ ) получаем:

$$\lambda_B^2 = a^2 n_{ef}^2 - a^2 \sin^2 \theta. \quad (2)$$

В связи с этим была построена зависимость квадрата длины волны  $\lambda_B^2$  от  $\sin^2 \theta$ . Как видно из рис. 5, такая зависимость носит линейный характер, что согласуется с соотношениями (1) и (2).

Для нормального падения соотношение (1) при  $m = 2$  принимает вид:

$$\lambda_B = a n_{ef}. \quad (3)$$

На основе полученных данных об угловой зависимости длин волн  $\lambda_B$  максимумов интенсивности спектров отражения и соотношений (2) и (3) были вы-

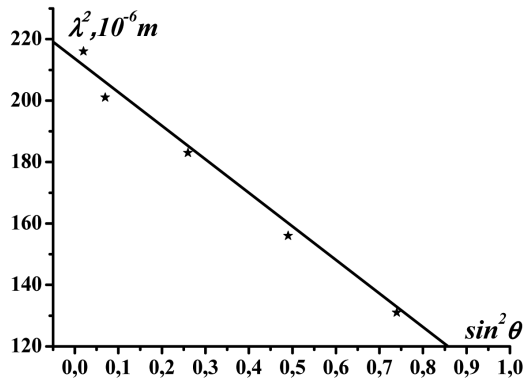


Рис. 5. Линейная зависимость квадрата длины волны  $\lambda_B^2$  от  $\sin^2 \theta$ .

числены значения периода исследуемого фотонного кристалла и эффективного показателя преломления:  $n_{ef} = 1,7$ ;  $a = 270$  нм;  $n_1 = 1,60$ ,  $n_2 = 1,79$ .

### Теоретический анализ

Для анализа наблюдаемых оптических свойств одномерного фотонного кристалла воспользуемся моделью Кронига-Пенни. При этом закон дисперсии электромагнитных волн в одномерном фотонном кристалле с бесконечным числом слоёв определяется выражением [8]:

$$\cos ka = \cos k_1 a_1 \times \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \sin k_1 a_1 \cdot \sin k_2 a_2. \quad (4)$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления слоёв композита, толщины которых равны  $a_1$  и  $a_2$ ,  $k_1 = \frac{\omega}{c} n_1$ ;  $k_2 = \frac{\omega}{c} n_2$ ;  $c = 3 \times 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $a = a_1 + a_2$  – период кристаллической структуры.

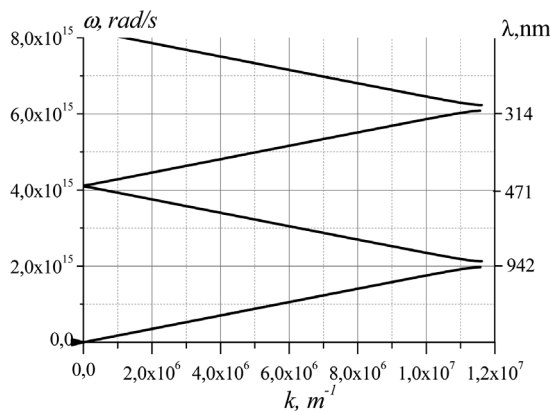


Рис. 6. Дисперсионная зависимость  $\omega(k)$  мезопористого фотонного кристалла на основе оксида алюминия.

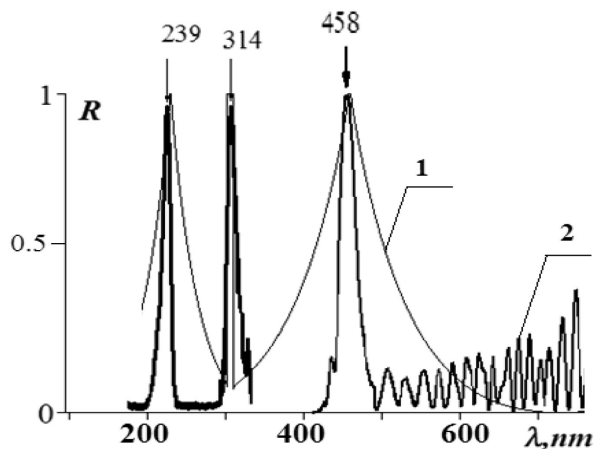


Рис. 7. Расчётный теоретический спектр (кривая 1) в сравнении с экспериментальным спектром отражения (кривая 2) для бесконечного кристалла при заданном угле  $\theta$ .

Рис. 6 иллюстрирует вид рассчитанных дисперсионных ветвей фотонного кристалла при следующих параметрах:  $a_1 = a_2 = 135$  нм,  $n_1 = 1,60$ ;  $n_2 = 1,79$ .

Коэффициент отражения излучения от поверхности одномерного фотонного кристалла при нормальном падении излучения на поверхность определяется по формуле Френеля:

$$R(\omega) = \left| \frac{\frac{ck(\omega)}{\omega} - 1}{\frac{ck(\omega)}{\omega} + 1} \right|^2 \quad (5)$$

На рис. 7 приведены рассчитанные по соотношению (5) спектры отражения и экспериментальные данные по спектрам отражения от поверхности анализируемого фотонного кристалла для второй, третьей и четвёртой стоп-зон при нормальном падении на поверхность.

Как видно из этого рисунка, наблюдается удовлетворительное согласие теории с экспериментом для положений максимумов интенсивности в спектрах отражения. В то же время наблюдается существенное различие в форме экспериментальных и теоретических зависимостей (рис. 7), особенно для второй и третьей стоп-зон.

Нами был проведён анализ характеристик узкополосного светофильтра, создаваемого на основе обсуждаемого фотонного кристалла, обеспечивающего селективное отражение лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 440$  нм. При этом за счёт изменения угла падения лазерного излучения на поверхность фотонного кристалла изменяется спектральное положение соответствующей стоп-зоны для обеспечения селективного отражения лазерного излучения. Схема экспериментальной установки для исследования спектров комбинационного рассеяния света с использованием такого рода светофильтра приведена на рис. 8.

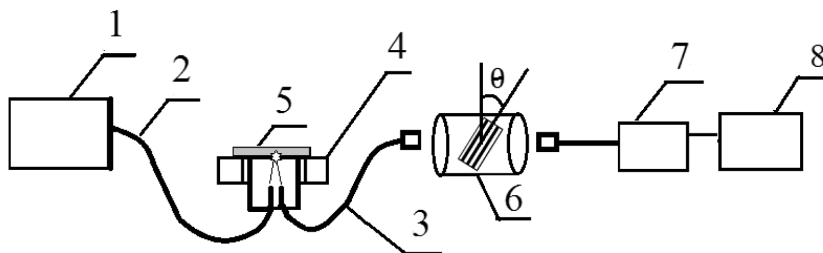


Рис. 8. Схема экспериментальной установки с использованием светофильтра на основе фотонного кристалла; 1 – лазерное излучение; 2–3 – световоды; 4 – фторопластовая пластина; 5 – исследуемый образец; 6 – рефокусатор с внедрённым фотонным кристаллом; 7 – спектрометр; 8 – компьютер.

Свет от лазера (1) с заданной длиной волны (440 нм) распространяется по световоду (2) и попадает на поверхность исследуемого образца (5), закреплённого с помощью фторопластовой пластины (4). Сигнал комбинационного рассеяния попадает на световод (3) и пропускается через рефокусатор (6) со встроенным фотонным кристаллом, повернутым на определённый угол  $\theta$ . Излучение от лазерного источника попадает в область второй стоп-зоны исследуемого фотонного кристалла и полностью им отражается. Дальнейшее излучение от исследуемого объекта анализируется с помощью миниспектрометра (7) и компьютера (8).

С учётом соотношения (1) угол **поворота**  $\theta$  фотонного кристалла для отражения лазерного излучения от источника 1 (рис. 8) с длиной волны  $\lambda = 440$  нм составляет:  $\theta = 23^\circ$ .

### Заключение

Таким образом, были зарегистрированы спектры отражения широкополосного излучения от поверхности одномерного мезопористого фотонного кристалла, созданного на основе электрохимического травления пластин. Установлены спектральные положения второй, третьей и четвёртой стоп-зон одномерного фотонного кристалла. На основе использования теории спектров отражения широкополосного излучения от поверхности одномерного фотонного кристалла рассчитаны спектры отражения в широком диапазоне. На основе полученных экспериментальных данных о спектрах отражения от поверхности фотонного кристалла и соответствующей теории рассчитаны параметры фотонного кристалла для второй стоп-зоны: эффективный коэффициент преломления  $n_{ef} = 1,7$ ; период кристаллической решётки фотонного кристалла  $a = 270$  нм; показатели преломления слоёв  $n_1 = 1,60$  и  $n_2 = 1,79$ . Изменение характеристик мезопористого одномерного фотонного кристалла может быть достигнуто при внедрении в поры такого кристалла других веществ. При этом изменяется эффективный показатель преломления, что приводит в соответствии с соотношением (1) к изменению спектрального положения стоп-зон и их спектральной ширины. Изменение угла падения  $\theta$  также позволяет изменять спектральные характеристики обсуждаемых фотонных кристаллов. Таким образом, открывается возможность для использования мезопористых одномерных фотонно-кристаллических плёнок

в качестве узкополосных светофильтров с управляемыми характеристиками в различных оптических устройствах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В.П. Спонтанное излучение в периодической структуре // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 62. С. 505–512.
2. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Physical Review Letters. 1987, vol. 58, pp. 2059–2062.
3. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Physical Review Letters. 1987, vol. 58, pp. 2486–2489.
4. Горелик В.С. Оптика глобулярных фотонных кристаллов // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. С. 409–432.
5. Liu Yisen, Chang Yi, Ling Zhiyuan, Hu Xing, Li Yi. Structural coloring of aluminum // Electrochemistry Communications. 2011, vol. 13, pp. 1336–1339.
6. Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., Murzina T.V. Mesoporous silicon photonic structures with thousands of periods // Journal of Applied Physics. 2012, vol. 112, p. 013106.
7. Горелик В.С., Лепнев Л.С., Литвинова А.О. Конверсия электромагнитного излучения в глобулярных фотонных кристаллах SiO<sub>2</sub> при коротковолновом излучении // Неорганические материалы. 2014, Т. 50, С. 1086–1090.
8. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. Propagation and control of laser radiation. New York: Wiley. 1984. 589 p.
9. Горелик В. С., Климонский С. О., Филатов В. В., Напольский К. С. Оптические свойства одномерных фотонных кристаллов на основе пористых пленок анодного оксида алюминия // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 4. С. 562–568.

### REFERENCES

1. Bykov V.P. Spontaneous emission in a periodic structure. In: Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki [Journal of experimental and theoretical physics]. 1972, no. 62, pp. 505–512.
2. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. In: Physical Review Letters. 1987, vol. 58, pp. 2059–2062.
3. John S.. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. In: Physical Review Letters. 1987, vol. 58, pp. 2486–2489.
4. Gorelik V.S. Optics of globular photonic crystals. In: Kvantovaya elektronika [Quantum electronics]. 2007, no. 37, pp. 409–432.
5. Liu Yisen, Chang Yi, Ling Zhiyuan, Hu Xing, Li Yi. Structural coloring of aluminum. In: Electrochemistry Communications. 2011, vol. 13, pp. 1336–1339.
6. Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., Murzina T.V. Mesoporous silicon photonic structures with thousands of periods. In: Journal of Applied Physics. 2012, vol. 112, p. 013106.
7. Gorelik V.S., Lepnev L.S., Litvinova A.O. Conversion of electromagnetic radiation in globular photonic SiO<sub>2</sub> crystals under short wavelength irradiation. In: Neorganicheskie materialy [Inorganic materials]. 2014, no. 50, pp. 1086–1090.
8. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. Propagation and control of laser radiation. New York: Wiley. 1984. 589 p.
9. Optical properties of one-dimensional photonic crystals based on porous films of anodic alumina. Gorelik V.S., Klimonskii S.O., Filatov V.V., Napol'skii K.S. In: Optika i spektroskopiya [Optics and spectroscopy]. 2016, vol. 120, no. 4, pp. 562–568.



### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Горелик Владимир Семенович* – доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;  
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

*Яшин Максим Михайлович* – студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;  
e-mail: ihkamax@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vladimir Gorelik* – doctor of physico-mathematical sciences, professor at the Bauman Moscow State Technical University and P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences;  
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

*Maxim Yashin* – student at the Bauman Moscow State Technical University;  
e-mail: ihkamax@mail.ru

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Горелик В.С., Яшин М.М. Спектроскопия стоп-зон одномерного фотонного кристалла на основе оксида алюминия // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2017. № 1. С. 81–89.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-81–89.

### THE CORRECT REFERENCE TO ARTICLE

V. Gorelik, M. Yashin. Spectroscopy of stop-bands of one-dimension photonic aluminum oxide crystals. In: *Bulletin of Moscow Region State University*. Series: Physics and Mathematics. 2017, no. 1, pp. 81–89.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-81–89.