

---

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSOR MATERIALS

---

---

УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

### ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ

*Н. Л. Дьяконенко<sup>1</sup>, О. П. Овчаренко<sup>2</sup>*

1. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
dnina490@gmail.com
2. Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна aromira20b@gmail.com

### ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ

*Н. Л. Дьяконенко, О. П. Овчаренко*

**Анотація.** Властивості фотонних кристалів - штучно створених багатошарових структур, в яких діелектрична проникність і геометричні розміри змінюються з періодом, які можна порівняти з довжиною хвилі - розглядаються шляхом розрахунку інтерференції світла в заданій багатошаровій системі. Обчислення проводилися за допомогою розроблених програм, складених з використанням матричних методів. Основна увага приділялася впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів, на кількість і розташування дозволених і заборонених зон у широкому спектральному діапазоні. Наведено спектральні залежності коефіцієнта відбиття, аргументу полінома Чебишева і модуля аргументу полінома Чебишева.

Розрахунок оптичних характеристик багатошарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузькосмугового інтерференційного фільтра.

**Ключові слова:** фотонні кристали; інтерференція світла; багатошарова система; матричний метод

## INTERFERENCE SYSTEMS AS PHOTONIC CRYSTALS

*N. Dyakonenko, O. Ovcharenko*

**Abstract.** Photonic crystals that are the artificially created multilayer structures, which dielectric permittivity and geometric dimensions vary with a period comparable with the wavelength, were examined by the calculation of interference of light in a given multilayer system. The developed calculation programs using the matrix method make it possible to obtain the given optical characteristics (reflection, transmission, etc.) for any multilayer coatings. The main attention is paid to the analysis of the effect of defects associated with the violation of the layer periodicity. Spectral dependences of the reflection coefficient, argument of Chebyshev polynomial and argument module of the Chebyshev polynomial are given.

Calculation of the multilayer coatings optical characteristics with the help of the matrix method made it possible to determine the presence of barrier zones for periodic and defective systems and to propose their application as a contrast or narrowband interference filter.

**Keywords:** photonic crystals; interference of light; multi-layered system; matrix method

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

*Н. Л. Дьяконенко, А. П. Овчаренко*

**Аннотация.** Свойства фотонных кристаллов – искусственно созданных многослойных структур, в которых диэлектрическая проницаемость и геометрические размеры изменяются с периодом, сравнимым с длиной волны – рассматриваются путем расчета интерференции света в заданной многослойной системе. Вычисления проводились с помощью разработанных программ, составленных с использованием матричных методов. Основное внимание уделялось влиянию дефектов, связанных с нарушением периодичности слоев, на количество и расположение разрешенных и запрещенных зон в широком спектральном диапазоне. Приведены спектральные зависимости коэффициента отражения, аргумента полинома Чебышева и модуля аргумента полинома Чебышева.

Расчет оптических характеристик многослойных покрытий с помощью матричного метода позволяет определить наличие зон заграждения для периодических и дефектных систем и предложить их применение в качестве контрастного или узкополосного интерференционного фильтра.

**Ключевые слова:** фотонные кристаллы; интерференция света; многослойная система; матричный метод

У сучасній оптиці велику роль відіграють шаруватоперіодичні середовища - так звані фотонні кристали [1]. Зміна параметрів шарів дає можливість управляти властивостями фотонних кристалів, що відкриває широкі можливості для створення оптичних ізоляторів, фотоелектричних перетворювачів сонячного випромінювання та інших оптоелектронних пристроїв. Властивості таких середовищ обумовлені формуванням дозволених і заборонених зон для електромагнітного випромінювання. Порушення періодичності в фотонних кристалах приводить до виникнення «дефектних мод». Ця мода являє собою хвилю, електромагнітне поле якої локалізовано поблизу дефектного шару. Виявлено, що зі збільшенням товщини дефектного шару піки дефектних мод зміщуються в область низьких частот [2].

Вивчення спектрів відбиття і пропускання одновимірного фотонного кристала з дефектом з моношару наночастинок показало, що в залежності від послідовності шарів, що використовувались, в фотонному кристалі дефектна мода може придушуватися, коли моношар розташовується ближче до країв або, навпаки, до середини дефектного шару [3].

Нааявні на сьогоднішній день результати теоретичних досліджень дефектних мод в фотонних кристалах не надають повного опису даного ефекту. Однак, існує добре розроблена теорія багат шарових покриттів, в якій описується поведінка заборонених і дозволених зон (областей високого відбиття і високого пропускання) [4].

У тонких плівках це є добре відоме явище інтерференції. Дозволені і заборонені зони, що спостерігаються у фотонних кристалах, являють собою не що інше, як інтерференційні максимуми і мінімуми. Інтерференційні системи, що складаються з чергування плівок необхідної оптичної товщини з високим і низьким показниками заломлення, дозволяють зменшити відбиття світла у вузькій або широкій області спектра (покриття, що просвітлюють), підвищити відбиття падаючого світла на дільницях різної спектральної ширини (дзеркала),

виділити вузьку спектральну область монохроматичного світла (інтерференційні світлофільтри).

У даній роботі основна увага приділяється впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів на кількість і розташування дозволених і заборонених зон в широкому спектральному діапазоні.

Найбільшого поширення останнім часом отримав матричний метод розрахунку оптичних характеристик і властивостей багат шарових покриттів [4]. При вивченні поширення плоскої монохроматичної хвилі в шаруватій структурі, останню зручно характеризувати унітарною  $2 \times 2$  матрицею  $m$  (так званою характеристичною або матрицею інтерференції). Для одного шару завтовшки  $t_j$  з показником заломлення  $n_j$  характеристична матриця має вигляд:

$$m_j = \begin{pmatrix} \cos(\beta_j) & \frac{i}{u_j} \sin(\beta_j) \\ i u_j \sin(\beta_j) & \cos(\beta_j) \end{pmatrix},$$

де  $\beta_j = 0,5\pi n_j g_j c_j$  – фазова товщина шару,  $g_j = 4n_j t_j / \lambda_0$  – що виражена у одиницях чверті довжини хвилі  $\lambda_0$  оптична товщина шару,  $c_j = \cos(\theta_j)$ . Кути заломлення  $\theta_j$  в усіх середовищах пов'язані поміж собою та кутом падіння законом Снелліуса  $n_j \sin(\theta_j) = \text{const}$ .

Ефективні показники заломлення  $u_j$  дорівнюють  $n_j c_j$  для S- та  $n_j / c_j$  для P- складової поляризації падаючого світла. Частота  $n = \lambda_0 / l$ , де  $l$  – поточна довжина хвилі.

У разі багат шарового покриття, яке складається з  $K$  тонких однорідних шарів, характеристична матриця буде мати вигляд:

$$A_{i,k} = \prod_{j=1}^K m_j.$$

Використовуючи ці матриці можна розраховувати амплітудні коефіцієнти відбиття та пропускання:

$$r = \frac{(A_{11}u_0 - A_{22}u) + i(u_0uA_{12} - A_{21})}{(A_{11}u_0 + A_{22}u) + i(u_0uA_{12} + A_{21})},$$

$$t = \frac{2u_0}{(A_{11}u_0 + A_{22}u) + i(u_0uA_{12} + A_{21})}$$

і відповідні енергетичні коефіцієнти:

$$R = |r|^2, \quad T = \frac{u}{u_0} |t|^2.$$

Для періодичних систем, що містять  $N$  періодів, наприклад  $S_0N(ab)S$ , матриця інтерференції може бути представлена через матрицю періоду

$M = m_a m_b$ , тоді  $A_{i,k} = M^N$  і виражена через поліноми Чебишева першого  $T_N$  і другого  $U_N$  роду

$$A_{11,22} = T_N \pm 0.5(M_{11} - M_{22})U_{N-1};$$

$$A_{12,21} = M_{12,21}U_{N-1}, \text{ де}$$

$$T_N = \cos[N \arccos(A)];$$

$$U_{N-1} = \frac{\sin[N \arccos(A)]}{\sin[\arccos(A)]}$$

з аргументом  $A = 0.5(M_{11} + M_{22})$

В областях спектра, для яких  $|A| > 1$ , коефіцієнт відбиття з ростом числа періодів буде прагнути до одиниці. Це і є так звані області високого відбиття або зони загордження.

На графіках наведені спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу полінома Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) і модуля аргументу полінома Чебишева  $|A(\nu)|$  у діапазоні від 0,9 до 1,1 (суцільні лінії). В усіх розрахунках шари  $a$  і  $b$  передбачалися розміром в одну чверть довжини хвилі ( $g_j = 1$ ) з показниками заломлення  $n_a = 2,2$  і  $n_b = 1,32$ . Середовища, що обрамляли багат шарову систему  $S_0$  і  $S$  бралися з показниками заломлення  $n_0 = n = 1$ .

Для двох шарів  $K = 2$  найпростішого періоду  $(ab)$  на нижній залежності видно можлива область високого відбиття (рис. 1). На рис. 2, де  $K = 10$ ,  $N = 5$  найпростішого

періоду  $(ab)$ , на залежності  $R(\nu)$  явно проявилася область високого відбивання, але її ширина, див.  $A(\nu)$  залишилася колишньою. На залежності  $A(\nu)$  для симетричного періоду  $(a2ba)$   $K = 3$  видно дві можливі області високого відбивання в областях  $\nu$  0,5 і 1,5 (рис. 3). Для такого ж симетричного періоду  $(a2ba)$ , але з числом шарів  $K = 15$ ,  $N = 5$ , тобто система  $[a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba]$  на залежності  $R(\nu)$  явно проявилися області високого відбивання в областях частот 0,5 і 1,5, але їх ширини залишилися колишніми (рис. 4).

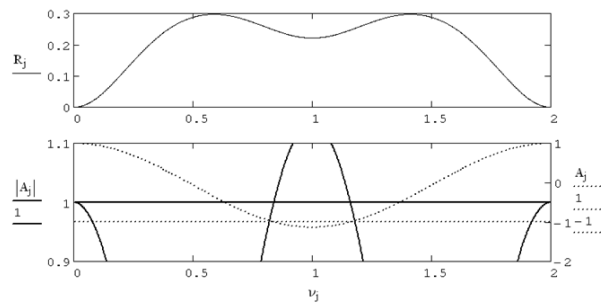


Рис. 1. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Кількість шарів  $K=2$ , найпростіший період  $(ab)$ .

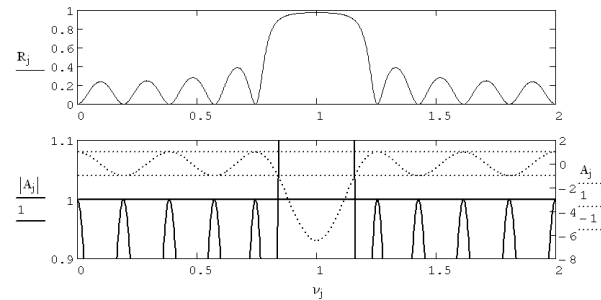


Рис. 2. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Кількість шарів  $K=10$ ,  $N=5$ , найпростіший період  $(ab)$ .

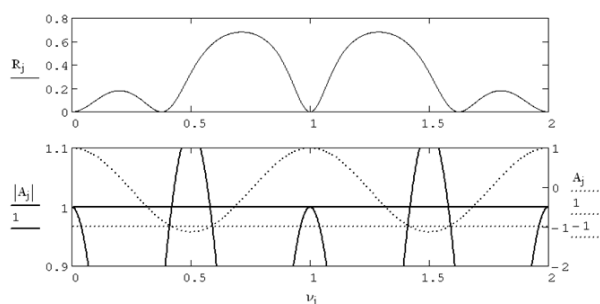


Рис. 3. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Кількість шарів  $K=3$ ,  $N=5$ , найпростіший період (аb), симетричний період (a2ba).

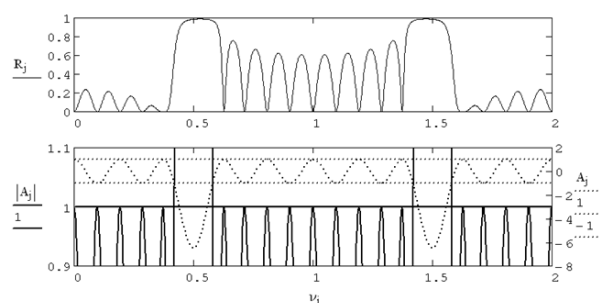


Рис. 4. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Кількість шарів  $K=15$ ,  $N=5$ . Той же, що й на рис.3 симетричний період (a2ba), тобто система [a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba a2ba]

Прояв дефектів, які пов'язані з порушенням періодичності шарів показано на рис. 5-7. Чвертьхвильова система «зі збоєм» ab2abab на залежностях  $R(\nu)$  і  $A(\nu)$  демонструє область пропускання при  $\nu = 1$ . Крім того, з залежності  $A(\nu)$  слідує розташовані симетрично  $\nu = 1$  по три додаткових області загородження. Для трьох періодів чвертьхвильової системи «зі збоєм» 3 (ab2abab) область пропускання при  $\nu = 1$  на залежностях  $R(\nu)$  і  $A(\nu)$  може бути використана в якості так званого контрастного фільтра. При цьому на  $A(\nu)$  явно проявляються розташовані симетрично  $\nu = 1$  по три додаткових області загородження. На залежностях  $R(\nu)$  і  $A(\nu)$  симетричною чвертьхвильової системи «зі збоєм» 4(ab) a2ba4 4(ba) (рис. 7) видно досить вузька область пропускання при  $\nu = 1$ . Така сис-

тема зазвичай використовується в якості вузькосмугового інтерференційного фільтра. Крім того, з залежності  $A(\nu)$  слідує розташовані симетрично  $\nu = 1$  додаткові області загородження.

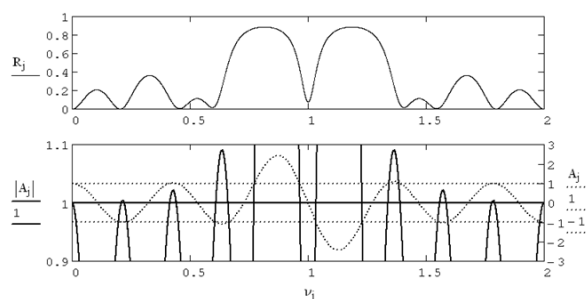


Рис. 5. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Чвертьхвильова система «зі збоєм» ab2abab.

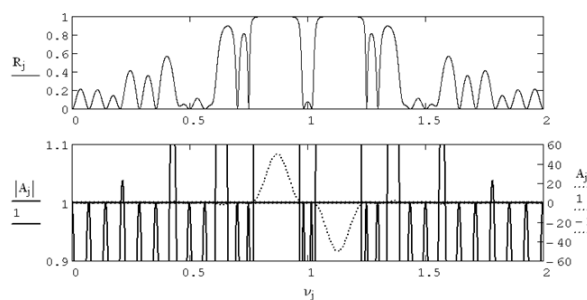


Рис. 6. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії). Три періоди чвертьхвильової системи «зі збоєм» 3(ab2abab) з рис. 5.

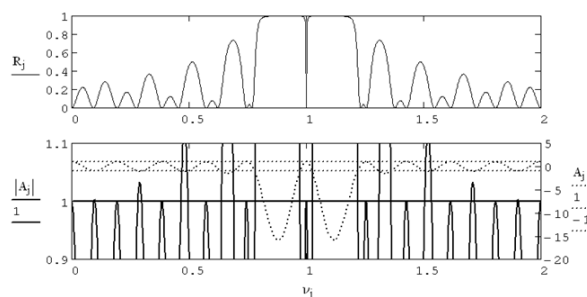


Рис. 7. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу поліному Чебишева  $A(\nu)$  (крапки) та його модулю  $|A(\nu)|$  (суцільні лінії).  $K=19$ . Симетрична чвертьхвильова система «зі збоєм» 4(ab) a2ba4 (ba).

Порівняльний аналіз наведених рисунків показує, що про структуру спектра відбиття (розташування і кількість зон загородження) для багат шарових систем з будь-яким числом періодів цілком можна судити за даними залежності  $A(\nu)$  для одного періоду.

Таким чином, розрахунок оптичних характеристик багат шарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузько смугового інтерференційного фільтра

### Список використаної літератури

[1]. G. S. Johnson and D. J. Joannopoulos, Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice. Kluwer, Boston, (2002).

[2]. L. I. Ivzhenko, D. I. Yudina, S. I. Tarapov. Radiofizika ta elektronika. T.22. № 2. (2017).

[3]. S. G. Moiseev, V. A. Ostatochnikov. Izvestiya Samarskogo nauchnogo zentra Rosiyskoi akademii nauk, t. 14, №4(4), c. 1102-1106, (2012).

[4]. Macleod H. A. Thin-Film Optical Filters. Bristol: Adam Hilger Ltd., 332p (1986).

Стаття надійшла до редакції 21.06.2018 р.

УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

## INTERFERENCE SYSTEMS AS PHOTONIC CRYSTALS

*N. Dyakonenko<sup>1</sup>, O. Ovcharenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”  
dnina490@gmail.com

<sup>2</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University  
apomira20b@gmail.com

### Summary

**Abstract:** Photonic crystals that are the artificially created multilayer structures, which dielectric permittivity and geometric dimensions vary with a period comparable with the wavelength, are becoming increasingly important in modern optics. Control of the properties of photonic crystals is possible by changing the parameters of the layers, first of all, by forming allowed and forbidden zones for electromagnetic radiation. The behavior of forbidden and allowed zones, which are the regions of good reflection and transmission, is determined by calculating the light interference in a given multilayer.

The developed calculation programs using the matrix method make it possible to obtain the given optical characteristics (reflection, transmission, etc.) for any multilayer coatings.

In this paper, the main attention is paid to the analysis of the effect of defects associated with the violation of the layer periodicity on the number and location of allowed and forbidden zones in a wide spectral range. Spectral dependences of the reflection coefficient  $R(\nu)$ , the argument  $A(\nu)$  and argument module  $|A(\nu)|$  of the Chebyshev polynomial are given. The carried out calculations were based on the assumption that the layers  $a$  and  $b$  were quarter-waves ( $g_j = 1$ ) with refractive indices  $n_a = 2.2$  and  $n_b = 1.32$ , while the framing media  $S_0$  and  $S$  had refractive indices  $n_0 = n = 1$ .

Calculation of the multilayer coatings optical characteristics with the help of the matrix method made it possible to determine the presence of barrier zones for periodic and defective systems and to propose their application as a contrast or narrowband interference filter.

**Keywords:** photonic crystals; light interference; multilayer system; matrix method



УДК 666.1.056

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142043

**ІНТЕРЕНФЕРЕНЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ФОТОННІ КРИСТАЛИ***Н. Л. Дьяконенко<sup>1</sup>, О. П. Овчаренко<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
dnina490@gmail.com<sup>2</sup> Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна  
apomira20b@gmail.com**Реферат**

У сучасній оптиці велику роль відіграють так звані фотонні кристали - штучно створені багатошарові структури, в яких діелектрична проникність і геометричні розміри змінюються з періодом, який можна порівняти з довжиною хвилі. Зміна параметрів шарів дає можливість управляти властивостями фотонних кристалів. Властивості таких середовищ обумовлені формуванням дозволених та заборонених зон для електромагнітного випромінювання. Поведінка заборонених і дозволених зон (областей високого відбиття і високого пропускання) описується шляхом розрахунку інтерференції світла в заданій багатошаровій системі. Обчислення значно полегшуються завдяки розробленими програмам. Розрахунки, проведені за допомогою матричного методу, дозволяють отримати задані оптичні характеристики (коефіцієнти відбиття, пропускання і т. ін.) для будь-яких багатошарових покриттів.

У даній роботі основна увага приділяється впливу дефектів, пов'язаних з порушенням періодичності шарів на кількість і розташування дозволених і заборонених зон в широкому спектральному діапазоні. На графіках наведені спектральні залежності коефіцієнта відбиття  $R(\nu)$ , аргументу полінома Чебишева  $A(\nu)$  і модуля аргументу полінома Чебишева  $|A(\nu)|$ . У всіх розрахунках шари  $a$  і  $b$  передбачалися розміром в одну чверть довжини хвилі ( $g_j = 1$ ) с показниками заломлення  $n_a = 2,2$  і  $n_b = 1,32$ . Середовища, що обрамляли багатошарову систему  $S_0$  і  $S$  бралися з показниками заломлення  $n_0 = n = 1$ .

Розрахунок оптичних характеристик багатошарових покриттів за допомогою матричного методу дозволяє визначити наявність зон загородження для періодичних та дефектних систем і запропонувати їх застосування в якості контрастного або вузько смугового інтерференційного фільтра.

**Ключові слова:** фотонні кристали; інтерференція світла; багатошарова система; матричний метод