

УДК 53.082.54: 563.5

## ПРОСВІТЛЕННЯ БАГАТОШАРОВОЇ ПРОЗОРОЇ СТРУКТУРИ З ДОПОМОГОЮ ДВОХ ДОДАТКОВИХ ШАРІВ

*С. Мягкота, д.ф.-м.н., Я. Білий, к.ф.-м.н., О. Кушнір, к.ф.-м.н.  
Львівський національний аграрний університет*

**Ключові слова:** багатошарова структура, просвітлення, вузькосмуговий оптичний фільтр.

Встановлено аналітичні умови просвітлення прозорої багатошарової структури з фазовими товщинами шарів, кратними  $\pi/2$ , з використанням двох додаткових шарів. Отримані умови представляються простими математичними виразами і можуть бути корисними при проектуванні вузькосмугових оптичних фільтрів.

**Постановка проблеми.** Потреба розробки нових ефективних методів проектування вузькосмугових оптичних фільтрів зумовлює пошук нових ефективних умов просвітлення багатошарових інтерференційних структур.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний момент вже встановлено аналітичні умови просвітлення багатошарових прозорих структур [1-5] на основі матричного способу визначення показників заломлення або фазових товщин шарів. Однак числовий розрахунок з використанням знайдених виразів потребує використання складного програмного забезпечення, що створює певні проблеми використання знайдених умов на практиці.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є пошук нових математично простих виразів для фазових товщин двох шарів, які забезпечують просвітлення багатошарової плоскопаралельної структури.

**Виклад основного матеріалу.** Просвітлення прозорої багатошарової структури з фазовими товщинами шарів, кратними  $\pi/2$ , може бути досягнуте з допомогою двох додаткових нестандартних шарів. Розміщення цих додаткових шарів всередині структури (вибір їхніх номерів  $s$  і  $m$ ) є довільним, а фазові товщини  $\delta_s$  і  $\delta_m$  повинні бути розраховані з допомогою отриманих нижче виразів.

Нехай  $l$  – кількість шарів структури, фазові товщини яких є кратні  $\pi/2$

$$\delta_{z_j} = \frac{\pi}{2}(1 + 2\nu_j), \quad z_j \neq s, m.$$

$$\nu_j = 0, 1, \dots; \quad j = 1, 2, \dots, l.$$

Тоді із врахуванням виразів для коефіцієнта відбивання структур з фазовими товщинами шарів, кратними  $\pi/2$  [4,6], умови просвітлення запишуться в наступному вигляді:

$$\tan \delta_s^\pm = \pm \sqrt{\frac{-N_s^2 \Delta \Delta_m}{\Delta_s \Delta_{s,m}}}, \quad (1)$$

$$\tan \delta_m^\pm = \pm \sqrt{\frac{-N_m^2 \Delta \Delta_s}{\Delta_m \Delta_{s,m}}}, \quad (2)$$

де для випадку непарного  $l$  ( $l = 2w + 1$ )

$$\Delta = N_0 N_{k+1} \left( N_{z_2} N_{z_4} \dots N_{z_{2w}} \right)^2 - \left( N_{z_1} N_{z_3} \dots N_{z_{2w+1}} \right)^2,$$

$$\Delta_s = N_0 \left( N_{\zeta_2} N_{\zeta_4} \dots N_{\zeta_{2w+2}} \right)^2 - N_{k+1} \left( N_{\zeta_1} N_{\zeta_3} \dots N_{\zeta_{2w+1}} \right)^2,$$

$$\Delta_m = N_0 \left( N_{\xi_2} N_{\xi_4} \dots N_{\xi_{2w+2}} \right)^2 - N_{k+1} \left( N_{\xi_1} N_{\xi_3} \dots N_{\xi_{2w+1}} \right)^2,$$

$$\Delta_{s,m} = N_0 N_{k+1} \left( N_{\rho_2} N_{\rho_4} \dots N_{\rho_{2w+2}} \right)^2 - \left( N_{\rho_1} N_{\rho_3} \dots N_{\rho_{2w+3}} \right)^2,$$

а для випадку парного  $l$  ( $l = 2w$ )

$$\Delta = N_0 \left( N_{z_2} N_{z_4} \dots N_{z_{2w}} \right)^2 - N_{k+1} \left( N_{z_1} N_{z_3} \dots N_{z_{2w-1}} \right)^2,$$

$$\Delta_s = N_0 N_{k+1} \left( N_{\zeta_2} N_{\zeta_4} \dots N_{\zeta_{2w}} \right)^2 - \left( N_{\zeta_1} N_{\zeta_3} \dots N_{\zeta_{2w+1}} \right)^2,$$

$$\Delta_m = N_0 N_{k+1} \left( N_{\xi_2} N_{\xi_4} \dots N_{\xi_{2w}} \right)^2 - \left( N_{\xi_1} N_{\xi_3} \dots N_{\xi_{2w+1}} \right)^2,$$

$$\Delta_{s,m} = N_0 \left( N_{\rho_2} N_{\rho_4} \dots N_{\rho_{2w+2}} \right)^2 - N_{k+1} \left( N_{\rho_1} N_{\rho_3} \dots N_{\rho_{2w+1}} \right)^2.$$

Тут номери  $\zeta_u$  ( $u = 1, 2, \dots, l+1$ ) включають в себе всі номери  $z_j$  і номер  $s$ ; номери  $\xi_u$  включають в себе всі номери  $z_j$  і номер  $m$ ; номери  $\rho_x$  ( $x = 1, 2, \dots, l+2$ ) включають в себе всі номери  $z_j$ , а також номери  $s$  і  $m$ . При цьому повинні виконуватися умови  $z_{j+1} > z_j$ ,  $\zeta_{u+1} > \zeta_u$ ,  $\xi_{u+1} > \xi_u$ ,  $\rho_{x+1} > \rho_x$ . У виразах (1), (2)  $N_i$  – це ефективні показники заломлення шарів:

$N_i = \frac{\cos \beta_i}{n_i}$  для  $p$ -поляризації і  $N_i = n_i \cos \beta_i$  для  $s$ -поляризації. Умовою існування розв'язків  $\delta_s^\pm$  і  $\delta_m^\pm \in \frac{\Delta \Delta_m}{\Delta_s \Delta_{s,m}} \leq 0$ .

**Висновки.** Отримано аналітичні умови просвітлення прозорих багат шарових структур з фазовими товщинами шарів, кратними  $\pi/2$ , з використанням двох додаткових нестандартних шарів. У порівнянні з іншими відомими умовами просвітлення, отримані умови є більш зручними для їх практичного використання при проектуванні вузькосмугових оптичних фільтрів.

#### Бібліографічний список

1. Thelen A. Design of optical interference coatings / A. Thelen. – New York: McGraw–Hill, 1989. – 232 p.
2. Macleod H. A. Thin-Film Optical Filters / H. A. Macleod. – 3rd ed. – London: IOP, 2001. – 631 p.
3. Mouchart J. Thin film optical coatings. 4: Multilayer antireflection coatings / J. Mouchart // Applied Optics. – 1977. – V. 16. – P. 3237-3241.
4. Kushnir O. P. Angular antireflection conditions for multilayer coating with phase thickness of layers a multiple of  $\pi/2$  / O. P. Kushnir // Journal Optics A: Pure Appl. Opt. – 2009. – V. 11. – 085704 (6pp).
5. Kushnir O. P. Application of spectral envelope functions of multilayer structures for analytical determination of antireflection conditions / O. P. Kushnir // Ukrainian Journal of Physical Optics. – 2009. – V. 10, N. 2. – P. 82-88.
6. Лисица М. П. Отражение и пропускание света системой тонких и толстых диэлектрических слоев / ЖТФ. – 1954. – Т. 24. – С. 1837-1850.

#### **Mjagkota S., Biliy Y., Kushnir O. Blooming of the transparent multilayer structure by means of two additional layers.**

The analytical antireflection conditions for the transparent multilayer structure with phase thicknesses of layers a multiple of  $\pi/2$  with use of two additional layers are determined. The obtained conditions are represented by simple mathematical expressions and can be useful at designing of narrow bandpass optical filters.

**Key words:** multilayer structure, antireflection, narrow bandpass optical filter.

#### **Мягкота С., Билый Я., Кушнир О. Просветление многослойной прозрачной структуры с помощью двух дополнительных слоев.**

Определены аналитические условия просветления прозрачной многослойной структуры с фазовыми толщинами слоев, кратными  $\pi/2$ , с использованием двух дополнительных слоев. Полученные условия представляются простыми математическими выражениями и могут быть полезными при проектировании узкополосовых оптических фильтров.

**Ключевые слова:** многослойная структура, просветление, узкополосовой оптический фильтр.