

## Вплив неоднорідностей показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових оптичних фільтрів при зміні робочої довжини

О. Міца\*<sup>1</sup>, В. Пецько<sup>1</sup>, Є. Боркач<sup>2</sup>, С. Петрецький<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна,

<sup>2</sup>Закарпатський угорський інститут ім. Ференц Ракоці ІІ, м. Берегово, Україна

\*Corresponding author. E-mail: alex.mitsa@gmail.com

Paper received 02.06.15; Revised 20.06.15; Accepted for publication 23.07.15.

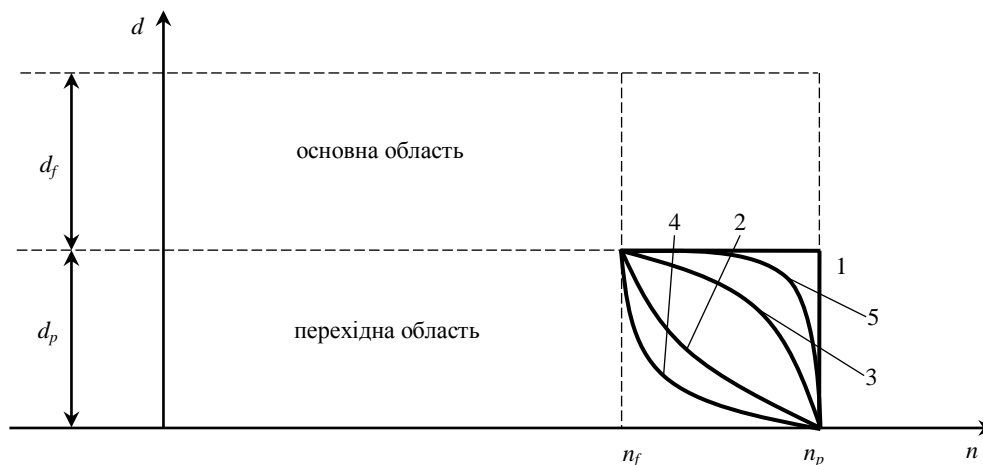
**Анотація.** В роботі досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від робочої довжини хвилі.

**Ключові слова:** характеристична матриця, спектральні характеристики, спектр пропускання, неоднорідності показника заломлення

Останнім часом синтез багат шарових оптичних систем набув чималого розвитку, успіхи цих досліджень впливають як на розвиток оптики, так і інших галузей науки та техніки. Тепер отримують інтерференційні фільтри будь-якого типу для всього оптичного діапазону заданими спектральними характеристиками [1, 2]. Одним із найактуальніших завдань в оптичному при-

ладобудуванні є створення вузькосмугових фільтрів, оскільки галузь застосування дуже широка – це астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [2, 3].

Розглянемо наступну шаруватонеоднорідну модель [4-6] профілю показника заломлення плівки, яка включає в себе основну та перехідну області (рис. 1).



**Рис. 1.** Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

При розрахунках спектральних характеристик багат шарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлюючій компоненті. Позначимо її товщину через  $d_p$ . Після проведення експерименту було виявлено, що геометрична товщина перехідної області ( $d_p$ ) може досягати до 30 нм. Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом  $n(z)$  по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на  $m_p$  (в дослідженні вибиралось 10) рівних по товщині зон і значення  $j$ -ої зони перехідної області показника заломлення в залежності від типу розподілу визначається за відповідною формулою:

1) ступінчастий:

$$n_{pj} = n_f;$$

2) лінійний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{m_p - 1} \cdot (j - 1);$$

3) квадратичний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2;$$

4) логарифмічний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j);$$

5) експоненціальний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{m_p - 1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1);$$

де  $n_{pj}$  – показник заломлення  $j$ -тої зони при розбитті перехідної області;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $n_p$  – показник заломлення перехідної області.

Геометрична товщина центральної частини плівки ( $d_f$ ) у цьому випадку:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left( \frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \quad (1)$$

де  $n_{sp} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}$ ,  $n_{sp}$  – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно;  $m$  – кількість розбиттів перехідного шару;  $k = 4$  – розглядається четвертьхвильовий шар;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $\lambda_0$  – робоча довжина хвилі.

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за

допомогою матричного методу Абеле [4]. Вибираючи за параметри показник заломлення  $n$ , геометричну товщину шару  $d$  і довжину хвилі  $\lambda$ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

$$M_S(n, d, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos(n, d, \lambda) & -\frac{i}{p} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -ip \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{pmatrix} \quad (2)$$

де  $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi n d \cos \theta}{\lambda}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\theta$  – кут між променем і нормаллю до площини падіння. Значення  $p = n \cos \theta$  для ТЕ хвилі ( $s$ -поляризація) і  $p = \frac{n}{\cos \theta}$  для ТМ хвилі ( $p$ -поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару буде рівна:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{m_p-1} M_S(n_{pj}, d, \lambda), \quad (3)$$

Розглянемо вузькосмуговий фільтр конструкції  $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-x)V]^4$ . Будемо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця буде рівною:

$$M_B(\lambda) = M_S(n_B, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (4)$$

де  $n_B$  – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю рівною:

$$M_H(\lambda) = M_S(n_H, d_f(d_p), \lambda), \quad (5)$$

де  $n_H$  – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Тоді характеристична матриця  $(4k+1)$ -шарової структури задається формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \times M_S\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp}\right), \lambda\right) \times \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)) \quad (6)$$

Звідси ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

$$T = \frac{p_S}{p_0} |t|^2 = \frac{1}{4 \left(2 + \frac{p_0}{p_S} m_{11}^2 + \frac{p_S}{p_0} m_{22}^2 + p_0 p_S m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_S} m_{21}^2\right)} \quad (7)$$

де  $p_0 = N_0 \cos \theta_0$  і  $p_S = N_S \cos \theta_S$  для ТЕ хвилі ( $s$ -поляризація);  $p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$  і  $p_S = \frac{N_S}{\cos \theta_S}$  для ТМ хвилі ( $p$ -поляризація);  $\theta_0$  – кут під яким промінь на шаруваті структуру;  $\theta_S$  – кут під яким промінь попадає із шаруваті структури, кут заломлення;  $n_0, n_S$  – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно,  $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$  – елементи характеристичної матриці  $M$ .

Вплив перехідної області на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів при зміні робочої довжини розглянемо на прикладі 17-шарового вузькосмугового фільтра S-VNB..2В..ВНВ, для якого показник заломлення високо заломлюючого шару  $n_B=2,3$  та низького  $n_H=1,35$  осадженими на підкладки із скла К-8 з  $n_S=1,51$  та оптичними товщинами рівними  $nd = \frac{\lambda_0}{4}$ , показник заломлення перехідної області  $n_p=2,6$ .

Розглянемо ступінчастий розподіл показника заломлення (оскільки найбільше на всі спектральні характеристики впливає ступінчастий розподіл [5]), то будемо розглядати саме цей розподіл.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, коефіцієнт пропускання при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta T=0,02883308$  (табл. 1, в якій подані значення коефіцієнта пропускання для ступінчастого розподілу показника заломлення), при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta T=0,0217706$ , при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta T=0,0175378$ , при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta T=0,0115229$  і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta T=0,00015864$ . Звідси випливає, що із збільшенням робочої довжини хвилі, значення коефіцієнта пропускання в точці мінімуму менше відрізняється від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта пропускання для ступінчастого розподілу показника заломлення

| Робоча довжина хвилі фільтра | 0°    | 30°       | 45°        | 56°48'    | 60°        | 75°       |           |
|------------------------------|-------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| S-поляризація                | 480   | 0,9870457 | 0,9776190  | 0,9565078 | 0,91432448 | 0,8929391 | 0,6834261 |
|                              | 630   | 0,9804855 | 0,9688199  | 0,9439835 | 0,8981770  | 0,8741932 | 0,6622928 |
|                              | 750   | 0,9762527 | 0,9632034  | 0,9363142 | 0,8874990  | 0,8634601 | 0,6490945 |
|                              | 1000  | 0,9702379 | 0,9553672  | 0,9255525 | 0,8735697  | 0,8479316 | 0,6297038 |
|                              | 30000 | 0,9603013 | 0,9425345  | 0,9083275 | 0,8511620  | 0,8237071 | 0,6007351 |
| P-поляризація                | 480   | 0,9870457 | 0,9947447  | 0,9999702 | 0,9924089  | 0,9840422 | 0,8558164 |
|                              | 630   | 0,9804855 | 0,9904630  | 0,9991171 | 0,9958738  | 0,9891690 | 0,8684357 |
|                              | 750   | 0,9762527 | 0,98746496 | 0,9980849 | 0,99744213 | 0,9917721 | 0,8749830 |
|                              | 1000  | 0,9702379 | 0,9829792  | 0,9961158 | 0,9989569  | 0,9947086 | 0,8827127 |
|                              | 30000 | 0,9603013 | 0,9751334  | 0,9918654 | 0,9999818  | 0,9979746 | 0,8924824 |

Розглянемо зсуви точки максимуму пропускання при різних робочих довжинах хвиль для ступінчастого показника заломлення (табл. 2.). При  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм відбувається зсув точки максимуму пропускання в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=19,05$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм на  $\Delta\lambda=20,84$  нм, при

$\lambda_0=750$  нм на  $\Delta\lambda=21,71$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм на  $\Delta\lambda=22,74$  нм і при  $\lambda_0=3000$  нм на  $\Delta\lambda=24,10$  нм. Отже, із збільшенням робочої довжини хвилі, при наявності перехідної області, збільшується зсув точки максимуму пропускання в область довгих хвиль, що характерне для всіх кутів обох поляризацій.

Таблиця 2. Робоча довжина хвилі для ступінчастого розподілу показника заломлення, нм

| Робоча довжина хвилі фільтра |       | 0°      | 30°     | 45°     | 56°48'  | 60°     | 75°     |
|------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| S-поляризація                | 480   | 499,05  | 480,33  | 461,12  | 445,8   | 441,44  | 426,75  |
|                              | 630   | 650,84  | 626,15  | 600,81  | 580,59  | 574,84  | 555,45  |
|                              | 750   | 771,71  | 742,18  | 711,87  | 687,68  | 680,79  | 657,58  |
|                              | 1000  | 1022,74 | 983,07  | 942,31  | 909,76  | 900,49  | 869,23  |
|                              | 30000 | 3024,1  | 2902,87 | 2778,09 | 2678,26 | 2649,82 | 2553,8  |
| P-поляризація                | 480   | 499,05  | 479,17  | 457,42  | 438,7   | 433,08  | 412,27  |
|                              | 630   | 650,84  | 624,49  | 595,66  | 570,85  | 563,4   | 535,72  |
|                              | 750   | 771,71  | 740,24  | 705,81  | 676,18  | 667,29  | 634,21  |
|                              | 1000  | 1022,74 | 980,68  | 934,67  | 895,09  | 883,21  | 839,15  |
|                              | 30000 | 3024,1  | 2898,22 | 2760,50 | 2642,11 | 2606,66 | 2478,02 |

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, півширина пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta\lambda=0,83$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=0,81$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=0,76$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,65$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,20$  нм. Десятична ширина пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta\lambda=2,61$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=2,55$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=2,41$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=2,04$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,66$  нм. Отримаємо, що із збільшенням робочої довжини хвилі, для напівширини та десятичної ширини зменшуються відхилення від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_K$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області менш короткохвильової як  $\lambda_{max}$ , при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм збільшується на  $\Delta\lambda=14,49$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=14,80$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=14,32$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=12,95$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=7,83$  нм. Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_D$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області більш довгохвильової чим  $\lambda_{max}$ , при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм збільшується на  $\Delta\lambda=23,80$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=21,04$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=19,23$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=16,45$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=9,79$  нм. Звідси випливає, що із збільшенням робочої довжини хвилі (починаючи з  $\lambda_0=630$  нм) для даних інтервалів зменшуються відхилення від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Розглянемо випадок, коли кількість шарів у фільтрі S-BNB..2B..BNB збільшується при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=630$  нм. Так, наявність перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення у високозаломлюючій компоненті для 17-шарового відрізаючого фільтра S-BNB..BNB приводить до збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T=0,0217706$  відносно ідеального випадку, зміщення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=20,84$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda=0,81$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda=2,55$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_K$  на  $\Delta\lambda=14,80$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_D$  на  $\Delta\lambda=21,04$  нм. Для 25-шарового відбувається збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T=0,02174216$  відносно ідеального випадку, зміщення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=20,80$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda=0,14$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda=0,42$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_K$  на  $\Delta\lambda=13,14$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_D$  на  $\Delta\lambda=18,96$  нм. Як бачимо, ці відхилення є меншими, ніж у випадку з 17-шаровими структурами. Подальше збільшення шарів теж зменшує різницю між ідеальним випадком різних меж між плівками при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті. Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль і довільних кутах падіння світла

**Висновки.** Виявлені особливості спектральних характеристик частково неоднорідних плівок з різним типом розподілу показника заломлення на межах розділу та математичне моделювання їх структури дозволяють розширити можливість застосування плівок некристалічних матеріалів в практиці конструювання та виготовлення оптичних покриттів.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Яковлев П.П. Проектирование интерференционных покрытий / П.П. Яковлев, Б.Б. Мешков – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
- [2] Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
- [3] Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия [Текст] / Т.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
- [4] Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A.V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gifsur Yvette, 1992. – 242 p.
- [5] Пецко В.І., Міца О.В. Моделювання впливу неоднорідностей на спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 4/5(70). – С. 15-20.
- [6] Mitsa, V. Holomb, R., Kondrat, O., Popovych, N., Tsud, N., Matolín, V., Prince, K., Petretskiy, S., Tóth, S. Synchrotron XPS studies of illuminated and annealed flash evaporated a-Ge<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films. Journal of Non-Crystalline Solids. – 2014. – Vol. 401, P. 258-262.

#### REFERENCES

- [1] Yakovlev, P.P. Designing interference coatings / P.P. Yakovlev, B.B. Meshkov – M.: Engineering, 1987. – 192 p.
- [2] Putilin, E.S. Optical coatings. Tutorial. – St.-Petersburg: SPbSU ITMO, 2010. – 227 p.
- [3] Krylova, T.N. Interferential coatings [Text] / T.N. Krylova. – L.: Engineering, 1973. – 224 p.#
- [4] Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A.V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gifsur Yvette, 1992. – 242 p.
- [5] Petsko, V.I., Mitsa, O.V. Modelling the impact of irregularities on narrowband spectral characteristics of optical filters // Eastern European Journal of advanced technologies. – 2014. – 4/5 (70). – P. 15-20.
- [6] Mitsa, V. Holomb, R., Kondrat, O., Popovych, N., Tsud, N., Matolín, V., Prince, K., Petretskiy, S., Tóth, S. Synchrotron XPS studies of illuminated and annealed flash evaporated a-Ge<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films. Journal of Non-Crystalline Solids. – 2014. – Vol. 401, P. 258-262.

#### **Effect of inhomogeneities of the refractive index in spectral characteristics of narrowband optical filters by changing the working length**

**O. Mitsa, V. Petsko, E. Borkach, S. Petretskiy**

**Abstract.** In this work the influence of transition region with an inhomogeneous distribution of the refractive index for the spectral characteristics of narrow-band filters, depending on the operating wavelength, was studied.

**Keywords:** characteristic matrix, the spectral characteristics, the transmission spectrum, inhomogeneities of the refractive index