

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

О. Міца*¹, В. Пецко¹, Є. Боркач², С. Петрецький¹

¹Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна,

²Закарпатський угорський інститут ім. Ференц Ракоці ІІ, м. Берегово, Україна

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

Paper received 02.06.15; 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 багатопарових 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).

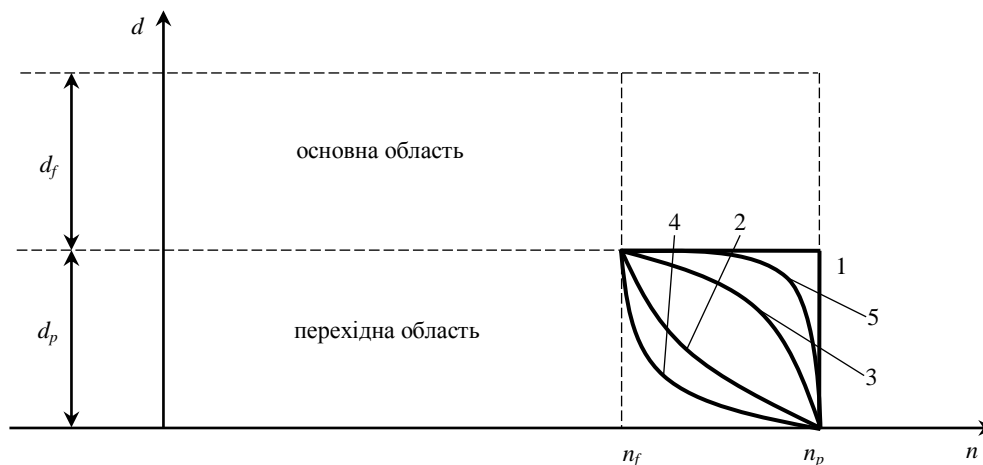


Рис. 1. Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

При розрахунках спектральних характеристик багатопарового 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; λ_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 λ , 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 $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi n d \cos \theta}{\lambda}$, $i = \sqrt{-1}$, θ – 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]⁴2(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); θ_0 – кут під яким промінь на шаруваті структуру; θ_S – кут під яким промінь попадає із шаруватої 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 λ_{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 λ_{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 різких 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-Ge₂S₃ 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-Ge₂S₃ 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