

ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ ПРИ ЗМІНІ РОБОЧОЇ ДОВЖИНИ

Мица О.¹, Пецко В.¹, Боркач Є.²

¹Ужгородський національний університет,
Ужгород, Україна, alex.mitsa@gmail.com

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

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 багатошарових 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 приладобудуванні є

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

Розглянемо наступну шаруватонеоднорідну модель [4,5] профілю показника заломлення плівок, яка включає в себе основну та перехідну області (рис. 1).

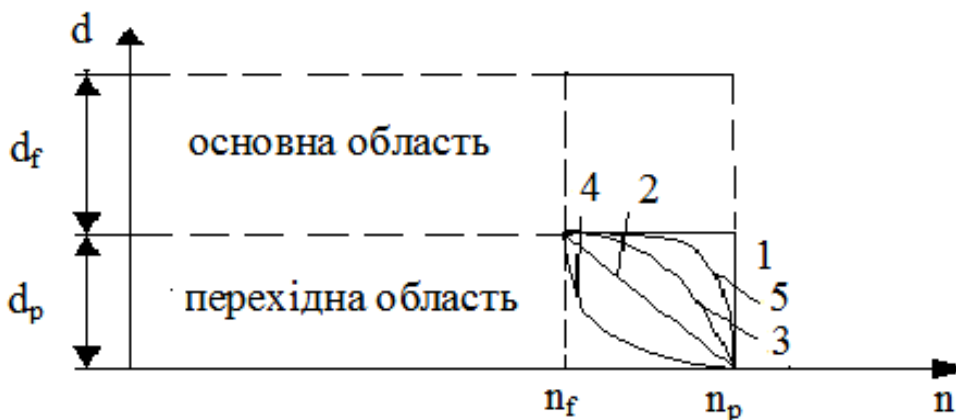


Рис. 1. Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

При розрахунках спектральних характеристик багатошарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлюючій компоненті. Позначимо її товщину через d_p . Після проведеного 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:

$$n_{pj} = n_p ;$$

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:

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

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 $n_{sp} = \frac{1}{m_p} \sum_{j=1}^{mp} n_{pj}$, 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:

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

де $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda}$, $i = \sqrt{-1}$, 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:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{mp-1} M_s(n_{pj}, d_p, \lambda), \quad (3)$$

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:

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

Звідси ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \\ = \frac{4}{\left(2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + P_0 P_s m_{12}^2 + \frac{1}{P_0 P_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (7)$$

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 шарувату структуру; θ_s – кут під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення; n_o, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладинки 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-ВНВ..2В..ВНВ, для якого показник заломлення високого шару $n_B = 2,3$, та низького $n_H = 1,35$, осадженими на підкладинки 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 $\Delta T = 0,0283308$ (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 $\Delta T = 0,0015864$. 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	0,9874649	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

робочій довжині 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 напівщини 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 чим 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 $\lambda_0=630$) для даних інтервалів зменшуються відхилення від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Розглянемо випадок, коли кількість шарів у фільтрі S-VNB..2В..ВNB 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 фільтру S-VNB..ВNB 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 $\Delta\lambda = 14,80$, збільшення спектрального інтервалу $\Delta\lambda_D$ на $\Delta\lambda = 21,04$. 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 $\Delta\lambda = 13,14$, збільшення спектрального інтервалу $\Delta\lambda_D$ на $\Delta\lambda = 18,96$. 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. – 227с
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, Gif-sur 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). – ст. 15- 20.

Аннотация. В работе исследовано влияние переходной области с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики узкополосных фильтров в зависимости от рабочей длины волны.

Ключевые слова: характеристическая матрица, спектральные характеристики, спектр пропускания, неоднородности показателя преломления.