

УДК 519.85

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

В. І. Пецко, О. В. Міца

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ

В. И. Пецко, А. В. Мица

MODELING SPECTRAL CHARACTERISTIC OF INTERFERENCE OPTICAL FILTERS WITH INHOMOGENEOUS INTERFACES

V. I. Petsko, O. V. Mitsa

В роботі розроблено модель та досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від кута та поляризації.

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

В работе разработана модель и исследовано влияние переходной области с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики узкополосных фильтров в зависимости от угла та поляризации.

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

1. Вступ

Синтез багат шарових оптичних систем за останні роки 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 з заданими спектральними характеристиками. Одним із найактуальніших завдань в оптичному приладобудуванні є створення вузькосмугових фільтрів, оскільки галузь застосування дуже широка – це астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [1–4].

Перспективи розвитку оптоелектроніки, лазерної техніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багат шарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеною хімічною стійкістю. Для отримання таких систем необхідно вирішити питання вибору матеріалів

підкладинки і шарів, з яких складається система; розрахунку товщини шарів і оптичних параметрів конструкції. У зв'язку з цим необхідно контролювати товщини шарів таких покриттів, визначати вплив похибки напилення на спектральні характеристики систем.

Актуальність цих досліджень має як практичне, так і теоретичне значення для розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем вузькосмугових фільтрів з низькими втратами та підвищеної хімічної стійкості.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Проблема моделювання спектральних характеристик оптичних покриттів з частковою неоднорідністю на даний час вирішена недостатньо. Неоднорідності на межах розділу плівка-підкладка є небажаними, так як затрудняють контроль геометричної товщини плівок при їх виготовленні. Необхідність в нових матеріалах для оптичних покриттів стимулювала дослідження профілю показника заломлення і концентраційного профілю компонент плівок безкисневих некристалічних матеріалів. Такі плівки в залежності від складу є прозорими як у видимій так і у інфрачервоній ділянках спектру. На першому етапі досліджень некристалічних частково неоднорідних плівок незалежно в [5, 6] була запропонована найпростіша шарувато-неоднорідна модель їх профілю показника заломлення. Не вирішеною залишається проблема модельного представлення неоднорідностей в частково неоднорідних плівках при неперервній зміні показника заломлення на межах розділу. Відомі дослідження шарувато-неоднорідних моделей з частковою неоднорідністю [7, 8] не відображають кутових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових фільтрів. Тому **метою дослідження** було вирішення наступних задач: 1) розроблення моделі часткової неоднорідності для вузькосмугових фільтрів; 2) дослідження впливу перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від кута та поляризації.

3. Математична модель.

Розглянемо наступну шарувато-неоднорідну модель профілю показника заломлення плівок, яка включає в себе основну та перехідну області. (рис.1). 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: $n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{m_p - 1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1)$;

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:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left(\frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \text{ де } n_{sp} = \frac{1}{m_p} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}, \quad (1)$$

де n_{sp} – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно; m_p – кількість розбиттів перехідного шару; $k=2$ – коли розглядається напівхвильовий шар і $k=4$ – коли розглядається четвертьхвильовий шар; n_f – показник заломлення основної частини плівки; λ_0 – робоча довжина хвилі.

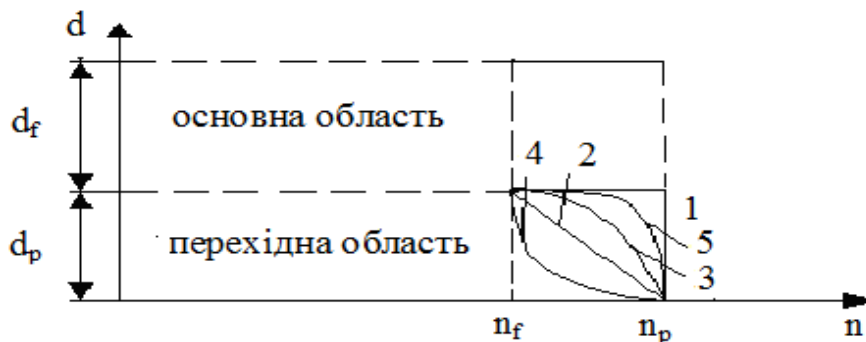


Рис. 1. Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за допомогою матричного методу Абеле [9-10]. 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 $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-x)V]^4$. 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:

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

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_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно, $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ – елементи характеристичної матриці M .

4. Дослідження кутових та поляризаційних параметрів вузькосмугових фільтрів.

Вплив перехідної області на спектральні характеристики [11] вузькосмугових фільтрів розглянемо на прикладі 17-шарового вузькосмугового фільтра $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-x)V]^4$ (рис. 2), для якого показник заломлення високого шару $n_B = 2,3$ та низького $n_H = 1,35$, показник заломлення перехідної області $n_p = 2,6$, робоча довжина хвилі $\lambda_0 = 630$. Для таких

розрахунків було розроблено програмне забезпечення на мові програмування Delphi 7.

Таблиця 1

Коефіцієнт пропускання.

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	0,9587149	0,9404918	0,9056039	0,8475903	0,8198669	0,5960574
Експоненціальний	0,9597866	0,9418814	0,9074613	0,8500532	0,8225212	0,5993514
Квадратичний	0,9635449	0,9466961	0,9138566	0,8581573	0,8310754	0,6095356
Лінійний	0,9672421	0,9514642	0,9201487	0,8663707	0,8403614	0,6205974
Логарифмічний	0,9713342	0,9567738	0,9272983	0,8760161	0,8505212	0,6323141
Ступінчастий	0,9804855	0,9688199	0,9439835	0,8981770	0,8741932	0,6622928
p-поляризація						
Ідеальний	0,9587149	0,9738412	0,9910921	0,9999990	0,9983373	0,8938144
Експоненціальний	0,9597866	0,9747176	0,9916146	0,9999919	0,9981004	0,8927973
Квадратичний	0,9635449	0,9777132	0,9933265	0,9998368	0,9971448	0,8891301
Лінійний	0,9672421	0,9806099	0,9948897	0,9994727	0,9959686	0,8853420
Логарифмічний	0,9713342	0,9837635	0,9964584	0,9987831	0,9943364	0,8809160
Ступінчастий	0,9804855	0,9904630	0,9991171	0,9958738	0,9891690	0,8684357

З табл 1. видно, що при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом коефіцієнт пропускання при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta T = 0,0217706$, з логарифмічним на $\Delta T = 0,0126193$, з лінійним на $\Delta T = 0,0085272$, з квадратичним на $\Delta T = 0,00483$, з експоненціальним на $\Delta T = 0,0010717$, при цьому робоча довжина хвилі при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta \lambda = 20,84$ нм (табл. 2.), на $\Delta \lambda = 14,40$ нм при логарифмічному, на $\Delta \lambda = 11,18$ нм при лінійному, на $\Delta \lambda = 8,05$ нм, при квадратичному, на $\Delta \lambda = 3,74$ нм при експоненціальному. Отже найбільше впливає на спектральні характеристики ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області. Далі йдуть логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний.

Таблиця 2

Робоча довжина хвилі

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	630,00	604,32	577,87	556,70	550,66	530,29
Експоненціальний	633,74	608,23	581,96	560,94	554,95	534,73
Квадратичний	638,05	612,75	586,72	565,90	559,97	539,97
Лінійний	641,18	616,03	590,18	569,51	563,63	543,78
Логарифмічний	644,40	619,41	593,74	573,23	567,39	547,70
Ступінчастий	650,84	626,15	600,81	580,59	574,84	555,45

p-поляризація						
Ідеальний	630,00	603,68	574,88	550,13	542,73	516,35
Експоненціальний	633,74	607,34	578,46	553,63	546,2	519,36
Квадратичний	638,05	611,61	582,68	557,81	550,35	523,08
Лінійний	641,18	614,73	585,8	560,92	553,46	525,96
Логарифмічний	644,40	617,96	589,04	564,15	556,68	529,03
Ступінчастий	650,84	624,49	595,66	570,85	563,40	535,72

Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ коефіцієнт пропускання збільшується на $\Delta T = 0,0283281$, робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 21,83$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta T = 0,0383796$ і $\Delta\lambda = 22,94$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta T = 0,0505867$ і $\Delta\lambda = 23,89$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta T = 0,0543263$ і $\Delta\lambda = 24,18$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta T = 0,0662354$ і $\Delta\lambda = 25,16$ нм. Звідси випливає, що для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

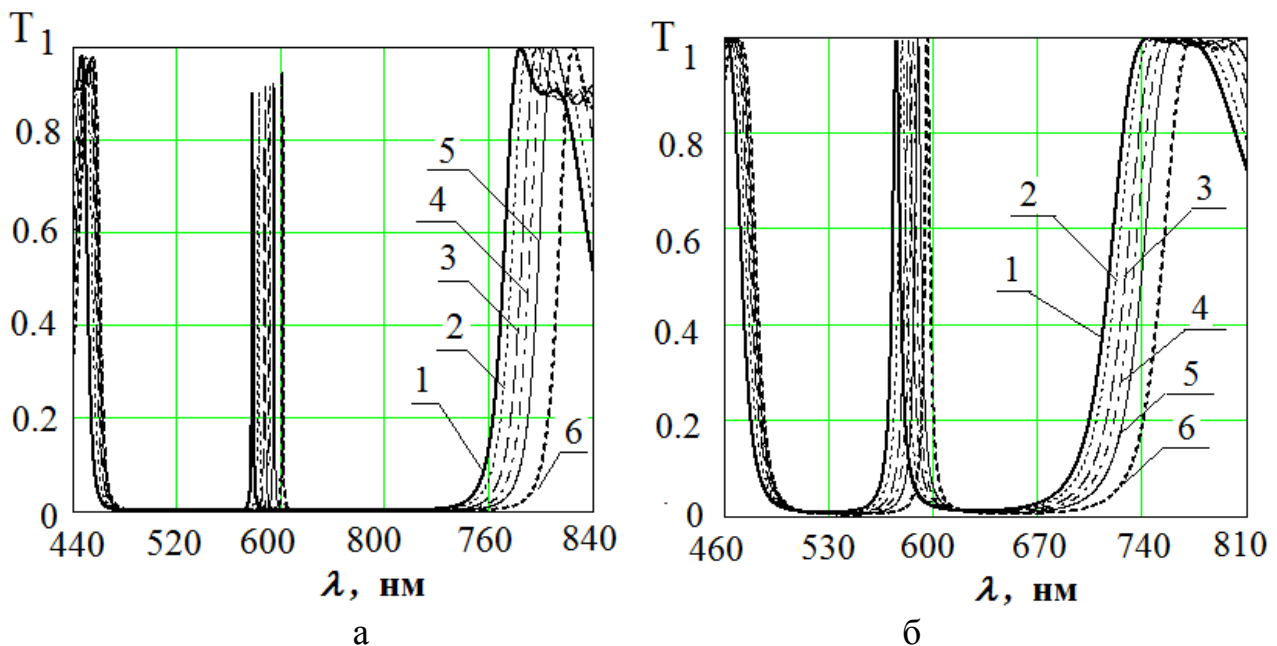


Рис. 2 . Спектральні характеристики 17-шарового фільтра при $\theta_0 = 45^\circ$ ($\lambda_0 = 630$ нм) в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення : 1 – ідеальний випадок; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення; а – s-поляризація; б – p-поляризація.

Для ступінчастого розподілу для р-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ коефіцієнт пропускання збільшується на $\Delta T = 0,0166218$, робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 20,81$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta T = 0,008025$ і $\Delta\lambda = 20,78$ нм. При $\theta_0 = 56^\circ 29'$ ($\theta_0 = 56^\circ 29'$ – кут Брюстера при показнику заломлення зовнішнього середовища $n_0 = 1$, та показнику заломлення підкладки $n_s = 1,51$ при проходженні світла із зовнішнього середовища в підкладку) коефіцієнт пропускання зменшується на $\Delta T = 0,0041252$ і робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 20,72$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta T = 0,0091683$ і $\Delta\lambda = 20,67$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta T = 0,0253787$ і $\Delta\lambda = 19,37$ нм. Отже для р-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області спочатку зменшуються відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а починаючи з кута $\theta_0 = 56^\circ 29'$ відхилення збільшується в сторону зменшення коефіцієнта пропускання. При цьому зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом напівширина $\delta\lambda_{0,5}$ при $\theta_0 = 0^\circ$ зменшується на $\Delta\lambda = 0,81$ нм, при логарифмічному на $\Delta\lambda = 0,46$ нм, при лінійному на $\Delta\lambda = 0,30$ нм, при квадратичному на $\Delta\lambda = 0,17$ нм, при експоненціальному на $\Delta\lambda = 0,03$ нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ напівширина зменшується на $\Delta\lambda = 0,53$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,3$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 0,16$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,13$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,02$ нм. Для р-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ напівширина зменшується на $\Delta\lambda = 1,12$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 1,69$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 2,67$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 3,24$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 9,17$ нм. Звідси випливає, що при наявності перехідної області напівширина зменшується для всіх кутів обох поляризацій.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом на десятична ширина $\delta\lambda_{0,1}$ при $\theta_0 = 0^\circ$ зменшується на $\Delta\lambda = 2,55$ нм, при логарифмічному на $\Delta\lambda = 1,45$ нм, при лінійному на $\Delta\lambda = 1,03$ нм, при квадратичному на $\Delta\lambda = 0,53$ нм, при експоненціальному на $\Delta\lambda = 0,09$ нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ на десятична ширина зменшується на $\Delta\lambda = 1,67$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,98$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 0,56$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,47$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 0,2$ нм. Для р-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ десятична ширина зменшується на $\Delta\lambda = 3,49$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 5,32$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 8,84$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 11,00$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ повністю розширюється на спектральний діапазон. Отже при наявності перехідної області на десятична ширина зменшується для всіх кутів обох поляризацій.

Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання $\Delta\lambda_K$, всередині якого пропускання менше 0,1 для області менш короткохвильової чим λ_{\max} при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 14,8$ нм, при логарифмічному на $\Delta\lambda = 8,77$ нм, при лінійному на $\Delta\lambda = 6,15$ нм, при квадратичному на $\Delta\lambda = 3,79$ нм, при експоненціальному на $\Delta\lambda = 1,20$ нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ даний інтервал збільшується на $\Delta\lambda = 14,54$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 14,37$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 14,19$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 14,14$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 13,77$ нм. Для p-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ даний спектральний інтервал $\Delta\lambda_K$ збільшується на $\Delta\lambda = 14,49$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 14,80$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 16,46$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 17,62$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 44,1$ нм. Звідси випливає, що при наявності перехідної області ширина спектрального інтервала $\Delta\lambda_K$ збільшується для всіх кутів обох поляризацій.

Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання $\Delta\lambda_D$, всередині якого пропускання менше 0,1 для області більш довгохвильової чим λ_{\max} при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 21,04$ нм, при логарифмічному на $\Delta\lambda = 11,51$ нм, при лінійному на $\Delta\lambda = 7,88$ нм, при квадратичному на $\Delta\lambda = 4,73$ нм, при експоненціальному на $\Delta\lambda = 1,50$ нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ даний інтервал збільшується на $\Delta\lambda = 20,66$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 20,46$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 20,43$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 20,45$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta\lambda = 20,23$ нм. Для p-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ даний спектральний інтервал $\Delta\lambda_D$ збільшується на $\Delta\lambda = 19,81$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta\lambda = 19,33$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta\lambda = 21,15$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta\lambda = 23,07$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ такий інтервал вироджується. Отже при наявності перехідної області ширина спектрального інтервала $\Delta\lambda_D$ збільшується для всіх кутів обох поляризацій.

Наявність перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення у високозаломлюючій компоненті для 17-шарового вузькосмугового фільтру S-ВНВ.. 2В..ВНВ 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 фільтра 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 та при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті. Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль і довільних кутах падіння світла.

5. Висновки

Типи розподілів показника заломлення перехідної області впливають на спектральні характеристики в наступному порядку: ступінчастий, логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний. .

Для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. Для р-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області спочатку збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а починаючи з кута $\theta_0 = 56^\circ 29'$ (кут Брюстера) відхилення збільшується в сторону зменшення коефіцієнта пропускання. При цьому зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. При наявності перехідної області на півширина $\delta\lambda_{0,5}$ та десятична ширина $\delta\lambda_{0,1}$ зменшується, а ширина спектральних інтервалів $\Delta\lambda_K$ та $\Delta\lambda_D$ збільшується для всіх кутів для обох поляризацій.

Література

1. Яковлев, П. П. Проектирование интерференционных покрытий [Текст] / П. П. Яковлев, Б. Б. Мешков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. Путилин, Э. С. Оптические покрытия [Текст]: уч. пос. / Э. С. Путилин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
3. McLeod, H. A. Thin-Film Optical filters [Text] / H. A. McLeod. – Adam Hilger. London. 1985. – 386 p.
4. Крылова, Т. Н. Интерференционные покрытия [Текст] / Т. Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
5. Tikhonravov, A. V. Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single thin films [Text] / A. V., Tikhonravov, M. K. Trubetskov, B. T. Sullivan. – Applied optics. – 1997. – Vol. 36, № 28. – P. 71–88.
6. Holovach, J. Modeling spectral characteristics of structures with the layers based on dissociative materials [Text] / J. Holovach, O. Mitsa // Book of Abstract 40th. Hungarian conference on Spectrochemistry. Debrecen. Hungary, 1997. – M25 p.

7. Pervak, Y. Influence of transition film-substrate layers on optical properties of multilayer structure [Text] : proc. of SPIE / Y. Pervak, A. Mitsa, J. Holovach // The International Society for Optical Engineering. – 2000. – Vol. 4425. – P. 321–325.
8. Holovacs J. Computer modelling of characteristics of structures with short periods [Text] : proc. 4th inter. conf. / J. Holovacs, A. Mitsa, V. Mitsa // Applied Informatics. – Eger-Noszvaj (Hungary), 1999. – P. 51–57.
9. Abeles F. Matrix method [Text] / F. Abeles // Ann.de Physique. – 1950. – Vol. 5. – P. 596–640.
10. Furman Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A. V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.
11. Пецко, В. І. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів [Текст] / В. І. Пецко, О. В. Міца, І. В. Фекешгазі // Комп'ютерна математика. – 2014. – №1. – ст. 37- 45.

References

1. Yakovlev, P. P., Meshkov, B. B. (1987). Designing interference coatings. Mechanical Engineering, 192.
2. Putilin, E. S. (2010). Optical coatings. St. Petersburg State University of Information Technologies, 227.
3. McLeod, H. A. (1985). Thin-Film Optical filters. AdaM Hilger. London, 386.
4. Krylova, T. N. (1973). Interference coatings. Mechanical Engineering, 224.
5. Tikhonravov, A. V., Trubetskov, M. K., Sullivan, B. T. (1997). Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single thin films. Applied optics, Vol. 36, № 28, 71–88.
6. Golovach, J., Mitsa, O. (1997). Modeling spectral characteristics of structures with the layers based on dissociative materials. Book of Abstract 40th. Hungarian conference on Spectrochemistry. Debrecen. Hungary, M25.
7. Pervak, Y., Mitsa, A., Holovach, J. (2000). Influence of transition film-substrate layers on optical properties of multilayer structure. Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering). Vinnytsia, Vol. 4425, 321–325.
8. Holovacs, J., Mitsa, A., Mitsa, V. (1999). Computer modelling of characteristics of structures with short periods. Applied Informatics. Eger-Noszvaj (Hungary), 51–57.
9. Abeles, F. (1950). Matrix method. Ann.de Physique. Vol. 5, 596–640.
10. Furman, Sh. (1992). Basics of optics of multiplayer systems. Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 242.
11. Petsko, V. I., Mitsa O. V., Fekeshtazi I. V. (2014)/ Modeling spatial-polarization parameter spectral chara characteristic of interference optikal.// Computer Mathematics. – №1. – ст. 37- 45.

В роботі розроблено шарувато-неоднорідну модель профілю показника заломлення, яка включає основну і перехідну область, досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на

спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від кута та поляризації. Наведено основні залежності зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур вузькосмугових оптичних фільтрів в залежності від поляризації та кута падіння при наявності перехідної області. Отримані результати особливо актуальні для визначення ефективності використання збіжності або розбіжності потоків випромінювання в оптичних системах. 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 вузькосмугових оптичних фільтрів.

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

Пецко Василь Іванович,
Аспірант
Кафедра кібернетики та прикладної математики
Ужгородський національний університет
вул. Підгірна, 46, м. Ужгород, Україна, 88000
E-mail: petsko.vi@gmail.com
Контактний телефон: (095) 627-58-29

Мица Олександр Володимирович,
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра інформаційних управляючих систем і технологій
Ужгородський національний університет
вул. Підгірна, 46, м. Ужгород, Україна, 88000
E-mail: alex.mitsa@gmail.com
Контактний телефон: (050) 768-35-60

Пецко Василий Иванович
Аспирант
Кафедра кибернетики и прикладной математики
Ужгородский национальный университет
ул. Подгорная, 46, г. Ужгород, Украина, 88000
E-mail: petsko.vi@gmail.com
Контактный телефон: (095) 627-58-29

Мица Александр Владимирович,
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра информационных управляющих систем и технологий
Ужгородский национальный университет
ул. Подгорная, 46, г. Ужгород, Украина, 88000



mail: alex.mitsa@gmail.com

Контактний телефон: (050) 768-35-60

Petsko Vasil

A graduate student

Department of Applied Mathematics and Cybernetics

Uzhgorod National University

Str. Pidhirna 46, Uzhgorod, Ukraine, 88000

E-mail: petsko.vi@gmail.com

Phone: (095) 627-58-29

Mitsa Alexander,

Ph.D., Associate Professor

Department of Information Control Systems and Technologies

Uzhgorod National University

Str. Pidhirna 46, Uzhgorod, Ukraine, 88000

E-mail: alex.mitsa@gmail.com

Phone: (050) 768-35-60