

УДК 517.51:519.622.1

В. Пецко; О. Міца, канд. техн. наук

Ужгородський національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОСМУГОВИХ ФІЛЬТРІВ

Резюме. На даний час не вирішеною залишається проблема модельного представлення неоднорідностей в частково неоднорідних плівках при неперервній зміні показника заломлення на межах розділу. В роботі наведено узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатопшарових інтерференційних структур (БІС) широкосмугових оптичних фільтрів залежно від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні. Розроблено модель та досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики широкосмугових фільтрів залежно від кута.

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

V. Petsko; O. Mitsa

MODELING OF SPACE-POLARIZATION PARAMETERS AND HETEROGENEITY EFFECT ON THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WIDEBAND FILTERS

Summary. At present time there are still unsolved the problem of model representation of heterogeneity in slightly inhomogeneous films with continuous change of the refractive index at the interfaces. There are studies in frame of inhomogeneous layered model which does not reflect the angular and polarization dependences of the spectral characteristics of broadband filters. In this work generalized change of parameters of multilayer interference structures were obtained from the analysis of light transmission spectra. The angular and polarization dependences of transmission of multilayer interference structures (broadband interference filters, BIS) with inhomogeneities on interfaces have been investigated. There were shown changes in the parameters of transmission spectra are depending on polarization and angle of incidence parallel beams of radiation relative to the normal to the surface. The effect of the working wavelength change on the spectral characteristics of broadband optical filters was investigated. For calculation available working wavelength at 480, 630, 750, 1000 and 3000 nm are used.

In the submitted paper the inhomogeneous model of the refractive index profile was developed, which includes transition region in high refractive index layer on interfaces. The spectral characteristics of broadband filters and its dependence on the incident angle and polarization of light, influence of transition layer on the interfaces between layers have been investigated. The basic parameters which are influenced on changing of transmission spectra of multilayer interference structures were found. The influence of operating wavelength changes on the spectral characteristics of broadband optical filters with the transition regions was investigated. The results are particularly relevant for determining the effectiveness of the use of convergence or divergence of the radiation beams in optical systems with such filters. The features of the spectral characteristics of the slightly inhomogeneous films with different types of refractive index distribution on interfaces and mathematical modeling can broaden the applicability of non-crystalline films during manufacturing of BIS.

Key words: characteristic matrix, the spectral characteristics of the transmission spectrum, inhomogeneities of the refractive index.

Вступ. Синтез багатопшарових оптичних систем за останні роки набув чималого розвитку, успіхи цих досліджень впливають на розвиток оптики та інших галузей науки й 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 широкосмугових фільтрів, оскільки галузь застосування дуже широка – астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [1–4].

Аналіз відомих досліджень і публікацій. На сьогодні не вирішеною залишається проблема модельного представлення неоднорідностей в частково неоднорідних плівках при неперервній зміні показника заломлення на межах розділу [1,2]. В роботі [5] наведено модель частково неоднорідної плівки з високим показником заломлення, яка базується на експериментальних даних. Відомі дослідження шарувато-неоднорідних моделей з частковою неоднорідністю [6,7] не відображають кутових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик широкосмугових фільтрів. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів проведено в [8].

Метою дослідження було вирішення таких задач: 1) дослідження кутових та поляризаційних залежностей пропускання світла широкосмуговими оптичними фільтрами; 2) розроблення моделі та дослідження впливу перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на їх спектральні характеристики залежно від кута й поляризації.

Дослідження кутових та поляризаційних параметрів широкосмугових фільтрів. Узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатшарових інтерференційних структур (БІС) отримано з аналізу спектрів пропускання широкосмугових оптичних фільтрів, для яких ці зміни є найбільш вразливими, залежно від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні.

Аналіз проведено для структур 17-шарових інтерференційних фільтрів типу S- $[2xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH2(1-x)V]^4$, де S – підкладинка з показником заломлення (n_S); 2B і H – відповідно шари з високим (n_B) та низьким (n_H) показниками заломлення й оптичними товщинами, що дорівнюють $nd = \frac{\lambda_0}{2}$ та $nd = \frac{\lambda_0}{4}$ відповідно, де λ_0 робоча довжина хвилі при падінні світла вздовж нормалі до їх поверхонь.

На рис.1 наведено типовий спектр пропускання широкосмугових БІС та їх основні параметри: середній коефіцієнт пропускання $T_{сер}$, який визначається в діапазоні довжин хвиль від $\lambda_{к0,5}$ до $\lambda_{о0,5}$ – короткохвильова та довгохвильова границі спектрального діапазону на рівні $T=0,5$; ширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,5}$ – на рівні $T=0,5$ і ширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,1}$ – на рівні $T=0,1$, які визначаються в діапазоні довжин хвиль від $\lambda_{к0,5}$ до $\lambda_{о0,5}$ та від $\lambda_{к0,1}$ до $\lambda_{о0,1}$ – відповідно короткохвильові та довгохвильові границі спектрального діапазону;

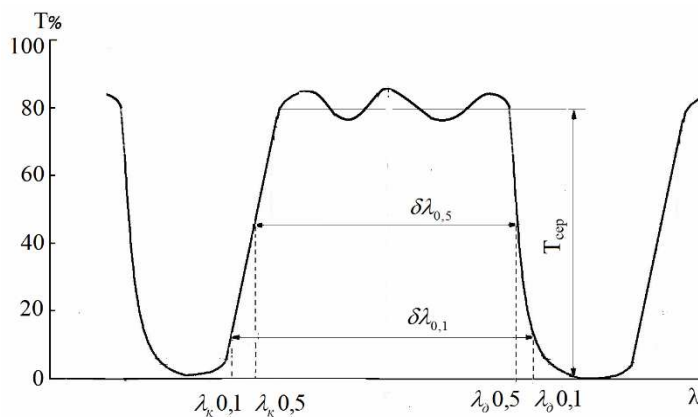


Рисунок 1. Форма та основні параметри спектрів пропускання широкосмугових фільтрів

Figure 1. Shape and basic parameters of transmission spectra of broadband filters

Для розрахунку спектральних характеристик широкопasmового фільтра використовувався матричний метод Абеле [9]. Для встановлення основних закономірностей змін кутових та поляризаційних залежностей параметрів пропускання світла широкопasmовими оптичними фільтрами розроблено відповідне програмне забезпечення мовою програмування Delphi 7.

Дослідження проведені для фільтрів, що знаходяться в зовнішньому середовищі із ($n_0 = 1$) та утворені БІС чергуванням шарів В із високим ($n_B = 2,3$) і Н низьким ($n_H = 1,35$) показниками заломлення, осадженими на підкладинки зі скла К-8 з $n_s = 1,51$. В якості робочих довжин хвиль використовувалися значення для найбільш вживаних потоків випромінювання – 480, 630, 750, 1000 та 3000 нм.

Типовий характер зміни спектрів пропускання широкопasmових інтерференційних фільтрів зі зміною кута падіння θ_0 для s- та р-поляризацій світлових потоків з довжиною хвилі 630 нм наведено на рис.2, а відповідні значення основних параметрів зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Основні параметри спектрів пропускання широкопasmового фільтра з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм

θ_0	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s-поляризація						
$\delta\lambda_{0,5}$	302,31	281,36	259,34	241,32	236,11	217,92
$\partial\lambda_{0,1}$	319,21	295,58	270,99	250,96	245,15	224,47
$T_{сер}$	0,9173907	0,9028779	0,8763371	0,8323270	0,8108416	0,6237177
р-поляризація						
$\delta\lambda_{0,5}$	302,31	301,68	302,2	303,43	303,78	299,97
$\partial\lambda_{0,1}$	319,21	321,05	326,16	335,16	339,5	-
$T_{сер}$	0,917390	0,9314721	0,946363	0,952816	0,9507581	0,856377

З табл.1 бачимо, що для s-поляризації при збільшенні кута падіння світла середнє значення пропускання $T_{сер}$ поступово зменшується від 0,9173907 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,6237177 при $\theta_0 = 75^\circ$. Для р-поляризації середнє пропускання зростає від 0,9173907 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,9528160 при $\theta_0 = 56^\circ 29'$, що пояснюється законом Брюстера ($\theta_0 = 56^\circ 29'$ – кут Брюстера при показнику заломлення зовнішнього середовища $n_0 = 1$ та показнику заломлення підкладинки $n_s = 1,51$ при проходженні світла із зовнішнього середовища в підкладинку), а потім зменшується до 0,8563779. Як бачимо, середній коефіцієнт пропускання для р-поляризації завжди більший, ніж для s-поляризації.

Ширина смуги пропускання на рівні $T=0,1$ для s-поляризації зменшується з 319,21 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 224,47 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а для р-поляризації дана ширина смуги пропускання збільшується з 319,21 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 339,5 нм при $\theta_0 = 60^\circ$, а при $\theta_0 = 75^\circ$ розширюється на весь спектральний діапазон.

Ширина смуги пропускання на рівні $T=0,5$ для s-поляризації зменшується з 302,31 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 217,92 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а для р-поляризації дана ширина смуги пропускання збільшується з 302,31 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 299,97 нм при $\theta_0 = 75^\circ$.

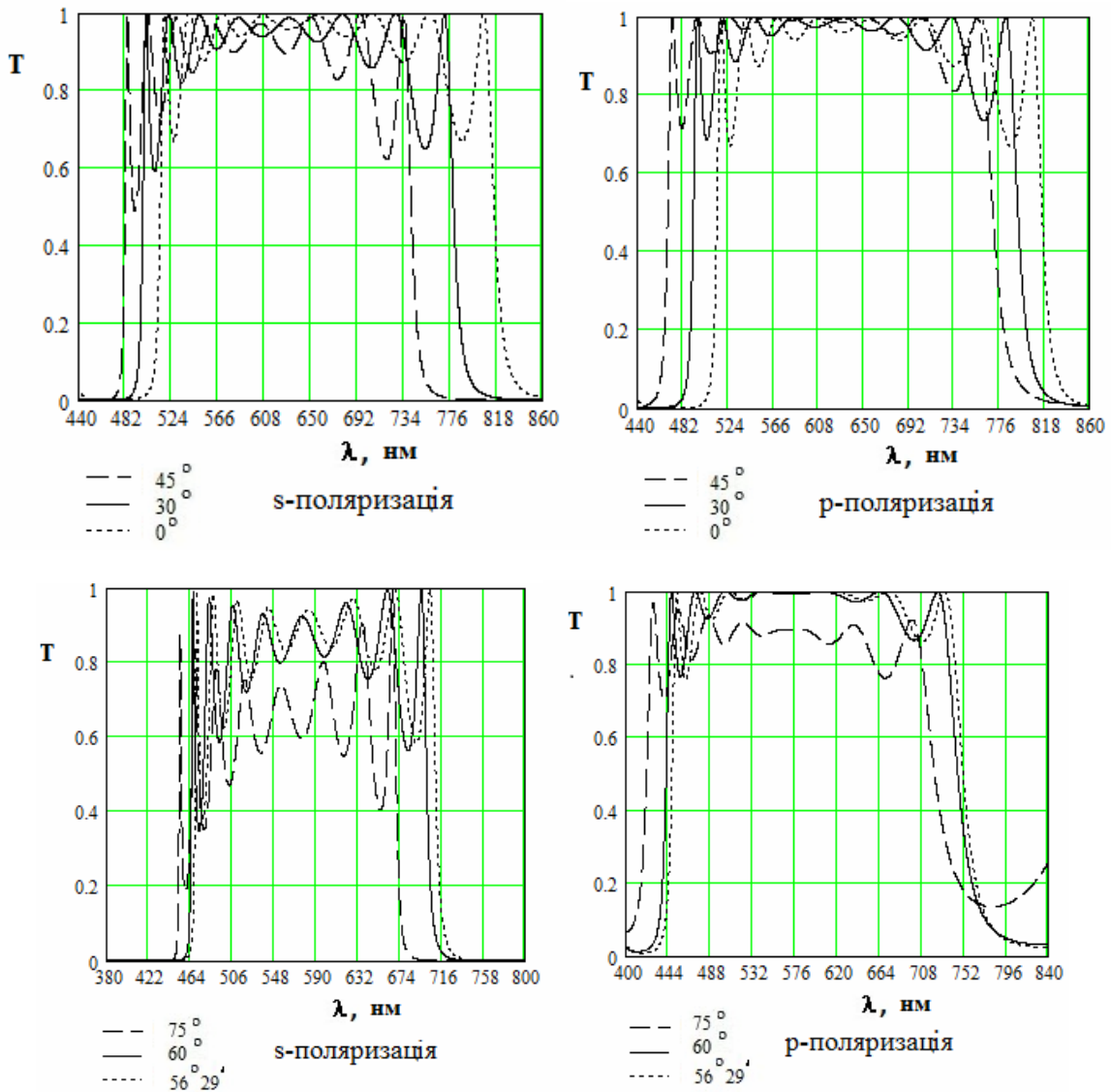


Рисунок 2. Трансформація спектрів пропускання широкосмугового фільтра з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм зі зміною кутів падіння

Figure 2. Transmission of broadband filter spectra with changing angles of incidence and working wavelength $\lambda_0 = 630$ nm

Зі збільшенням робочої довжини хвилі для широкосмугових фільтрів середній коефіцієнт пропускання – $T_{сер}$ практично не змінюються для всіх кутів, ширини смуг пропускання на рівні $T=0,1$ та на рівні $T=0,5$ зростають зі зростом λ_0 незалежно від їх змін зі зростанням кутів падіння θ_0 .

Вплив неоднорідностей на спектральні характеристики відрізаючих фільтрів. Розглянемо наступну шарувато-неоднорідну модель профілю показника заломлення плівок, яка містить основну та перехідну області (рис.3). При розрахунках спектральних характеристик багат шарового 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 30 нм.



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

Figure 3. Refractive index distributions of Slightly inhomogeneous film: 1 – staircase; 2 – line; 3 – quadratic; 4 – logarithmic; 5 – exponential)

Задавання неоднорідності показника заломлення з розподілом $n(z)$ по товщині в перехідному шарі здійснюється таким чином. Перехідний шар розбивається на m_p (в дослідженні вибрано 10) рівних по товщині зон і значення j -ої зони перехідної області показника заломлення залежно 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

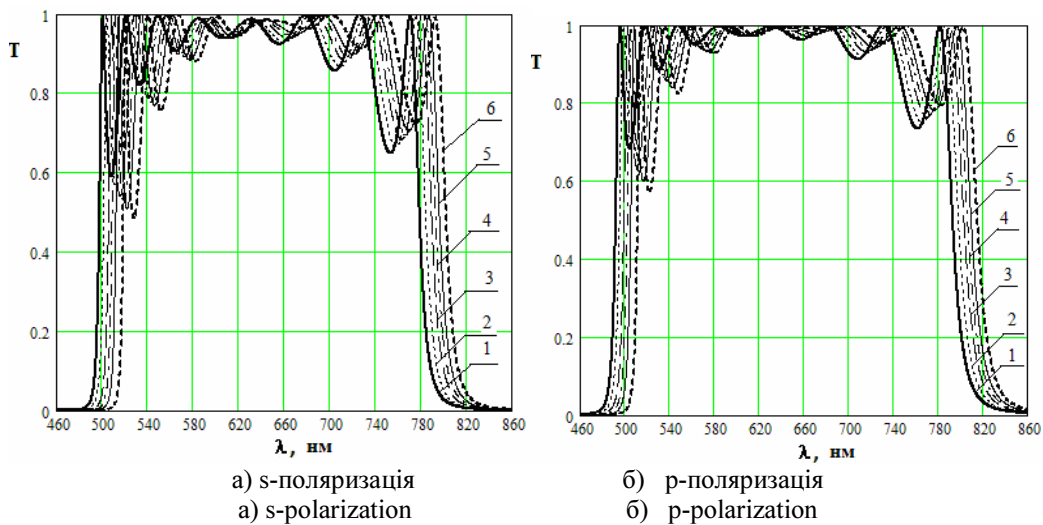


Рисунок 4. Спектральні характеристики 17-шарового фільтра при $\theta_0 = 30^\circ$ ($\lambda_0=630$ нм) в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення:

- 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

Figure 4. Spectral characteristics ($\lambda_0=630$ нм) at incident angle 30 degree of the 17 – layered filter in ideal case and with different distributions of refractive index in the transition region:
 1 – the ideal case;
 2 – with an exponential distribution of the refractive index;
 3 – with a quadratic distribution of the refractive index; 4 – with a linear distribution of the refractive index;
 5 – with logarithmic distribution of the refractive index; 6 – with stepped refractive index distribution

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

де n_{sp} – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно; m_p – кількість розбиттів перехідного шару; $k=2$ – коли розглядається напівхвильовий шар; $k=4$ – коли 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 Абеде [9]. 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 дорівнюватиме:

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

Розглянемо ширококутовий фільтр конструкції $S-[2xB(1-x)H]^k 2(1-x)V[xH2(1-x)V]^k$. Будемо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця дорівнюватиме:

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

де n_B – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю, що дорівнюватиме:

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

де n_H – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Характеристичну матрицю $(4k+1)$ -шарової структури типу $S-[2xB(1-x)H]^k 2(1-x)V[xH2(1-x)V]^k$ можемо задати 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 знаходимо 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 падає на шарувату структуру;

θ_s – кут, під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення;

n_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища й підкладки відповідно; $m_{11},$

m_{12}, m_{21}, m_{22} – елементи характеристичної матриці M .

Вплив перехідної області на спектральні характеристики широкосмугових фільтрів розглянемо на прикладі 17-шарового широкосмугового фільтра $S-[2xB(1-x)H]^4 2(1-x)B[xH2(1-x)B]^4$ (рис.4), 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 $\lambda_0 = 630$.

З таблиці 2 бачимо, що при наявності перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення середній коефіцієнт пропускання при $\theta_0 = 0^\circ$ зменшується на $\Delta T = 0,0070555$, з логарифмічним – на $\Delta T = 0,0046143$, з лінійним – на $\Delta T = 0,0034600$, з квадратичним – на $\Delta T = 0,0022866$, з експоненціальним – на $\Delta T = 0,0008895$. Отже, на середній коефіцієнт пропускання найбільше впливає ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області, що характерне для всіх кутів. Далі йдуть логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний.

Для ступінчастого розподілу для *s*-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ середній коефіцієнт пропускання збільшується на $\Delta T = 0,0081847$, при $\theta_0 = 45^\circ$ – на $\Delta T = 0,0096345$, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta T = 0,0112350$, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta T = 0,0117816$, при $\theta_0 = 75^\circ$ – на $\Delta T = 0,0145897$. При *p*-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ середній коефіцієнт пропускання збільшується на $\Delta T = 0,0029595$, а при $\theta_0 = 45^\circ$ зменшується на $\Delta T = 0,0022036$, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta T = 0,0071805$, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta T = 0,0087468$, при $\theta_0 = 75^\circ$ – на $\Delta T = 0,0143293$. Звідси випливає, що для *s*-поляризації зі збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в бік збільшення середнього коефіцієнта пропускання, а для *p*-поляризації зменшуються відхилення від ідеального випадку в бік зменшення середнього коефіцієнта пропускання.

Таблиця 2

Коефіцієнт середнього пропускання $T_{\text{сер}}$

Розподіл/кут	0°	30°	45°	56°29	60°	75°
Ідеальний	0,9173907	0,9028779	0,8763371	0,8323270	0,8108416	0,6237177
Експоненціальний	0,9182802	0,9035438	0,8765857	0,8320123	0,8103388	0,6225568
Квадратичний	0,9196773	0,9049897	0,8780282	0,8334732	0,8117596	0,6240245
Лінійний	0,9208507	0,9063406	0,8796400	0,8353242	0,8137464	0,6264258
Логарифмічний	0,9220050	0,9077771	0,8814260	0,8375222	0,8160635	0,6294152
Ступінчастий	0,9244462	0,9110626	0,8859716	0,8435620	0,8226232	0,6383074
Ідеальний	0,9173907	0,9314721	0,9463634	0,9528160	0,9507581	0,8563779
Експоненціальний	0,9182802	0,9318838	0,9463080	0,9525193	0,9504547	0,8569399
Квадратичний	0,9196773	0,9325320	0,9460477	0,9515118	0,9492665	0,8554419
Лінійний	0,9208507	0,9330718	0,9457828	0,9504615	0,9479512	0,8532972
Логарифмічний	0,9220050	0,9335472	0,9453755	0,9491429	0,9463313	0,8504999
Ступінчастий	0,9244462	0,9344316	0,9441598	0,9456355	0,9420113	0,8420486

При наявності перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення ширина смуги пропускання на рівні $T=0,1$ при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 1,36$, з логарифмічним – на $\Delta\lambda = 2,40$, з лінійним – на $\Delta\lambda = 2,44$, з квадратичним – на $\Delta\lambda = 2,31$, з експоненціальним – на $\Delta\lambda = 1,55$. Наявність перехідної області мало впливає на ширину смуги пропускання на рівні $T=0,1$. При $\theta_0 = 0^\circ$ найбільше впливає лінійний розподіл показника заломлення, при $\theta_0 = 30^\circ$, $\theta_0 = 45^\circ$, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$, $\theta_0 = 60^\circ$ – логарифмічний, при $\theta_0 = 75^\circ$ – ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області. Для логарифмічного розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ ширина смуги пропускання на рівні $T=0,1$ збільшується на $\Delta\lambda = 3,05$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ – на $\Delta\lambda = 3,80$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta\lambda = 4,46$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta\lambda = 4,66$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ – на $\Delta\lambda = 5,39$ нм. Для р-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ ширина смуги пропускання на рівні $T=0,1$ збільшується на $\Delta\lambda = 3,26$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ – на $\Delta\lambda = 4,31$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta\lambda = 5,41$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta\lambda = 5,84$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ дана смуга пропускання розширюється на весь діапазон. З огляду на сказане, для обох поляризацій при наявності перехідної області зі збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в бік збільшення ширини смуги пропускання.

При наявності перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення ширина смуги пропускання на рівні $T=0,5$ при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 1,53$, з логарифмічним – на $\Delta\lambda = 2,31$, з лінійним – на $\Delta\lambda = 2,29$, з квадратичним – на $\Delta\lambda = 2,12$, з експоненціальним – на $\Delta\lambda = 1,40$. Наявність перехідної області мало впливає на ширину смуги пропускання на рівні $T=0,5$; при $\theta_0 = 0^\circ$, $\theta_0 = 30^\circ$, $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_0 = 56^\circ 29'$, $\theta_0 = 60^\circ$ найбільше впливає логарифмічний розподіл показника заломлення, при $\theta_0 = 75^\circ$ – ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області.

Для логарифмічного розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ ширина смуги пропускання на рівні $T=0,5$ збільшується на $\Delta\lambda = 2,80$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ – на $\Delta\lambda = 3,42$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta\lambda = 4,02$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta\lambda = 4,22$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ – на $\Delta\lambda = 5,03$ нм, а для р-поляризації – при $\theta_0 = 30^\circ$ ширина смуги пропускання на рівні $T=0,5$ збільшується на $\Delta\lambda = 3,00$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ – на $\Delta\lambda = 3,77$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ – на $\Delta\lambda = 4,39$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ – на $\Delta\lambda = 4,56$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ – на $\Delta\lambda = 4,92$ нм. Для обох поляризацій при наявності перехідної області зі збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в бік збільшення ширини смуги пропускання.

При наявності перехідної області зі збільшенням робочої довжини хвилі, ширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,1}$ на рівні $T=0,1$ та ширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,5}$ на рівні $T=0,5$ збільшується ширина відповідних смуг пропускання $\delta\lambda_{0,1}$ та $\delta\lambda_{0,5}$ у порівнянні з ідеальним випадком, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Збільшення шарів зменшує різницю між ідеальним випадком різких меж між плівками та при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті для досліджуваних спектральних характеристик. Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль.

Висновки. Встановлено, що незалежно від робочої довжини хвиль ширококугових фільтрів при зростанні кута падіння паралельного пучка світла на багат шарову інтерференційну систему:

- значення середнього коефіцієнта пропускання $T_{сер}$ зменшуються для s-поляризованого світла, а для р-поляризованого зростають до кута Брюстера, а потім спадають, середній коефіцієнт пропускання для р-поляризації завжди більший, ніж для s-поляризації;

- ширина смуг пропускання на рівні $T=0,5$ та на рівні $T=0,1$ зменшується для s-поляризованого світла, а для р-поляризованого – збільшується.

Для s-поляризації зі збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в бік збільшення середнього коефіцієнта пропускання $T_{сер}$, а для р-поляризації зі збільшенням кута при наявності перехідної області зменшуються відхилення від ідеального випадку в бік зменшення середнього коефіцієнта пропускання $T_{сер}$. Для обох поляризацій при наявності перехідної області для всіх кутів збільшується ширина смуг пропускання на рівні $T=0,1$ та на рівні $T=0,5$ в порівнянні з ідеальним випадком.

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 у практиці конструювання та виготовлення ширококугових оптичних фільтрів.

Conclusions. It was found that the bandwidth of filters with increasing of incident angle of parallel beam regardless of operating wavelength:

- the value of the average transmittance T_{avg} decreases for s-polarized light and grows for p-polarized up to the Brewster angle value, after that both dependences are decreased; the average transmittance for p- polarization is always greater than for s- polarization;

– bandwidth of transmittance on level $T=0,5$ and on level $T=0,1$ are decreased for s- polarized and increases for p- polarization.

In the presence of transition region with the increasing of incident angle for s- polarization was found an increasing deviation transmittance from T average T_{avg} in higher side as compared with the T_{avg} for ideal case and deviation in opposite side for p-polarization. For both polarizations and for all angles in the presence of transition region the bandwidth at the level of $T=0,1$ and $T=0,5$ is increased as compared with bandwidth for the ideal case without transition region.

The features of the spectral characteristics of the slightly inhomogeneous films with different types of refractive index distribution on interfaces and mathematical modeling of their structure can extend the applicability of non-crystalline films of materials in the practice for designing and manufacturing broadband optical filters.

Список використаної літератури

1. Путилин, Э.С. Оптические покрытия [Текст] / Э.С. Путилин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
2. McLeod, H.A. Thin-Film Optical filters [Text] / H.A. McLeod. – Adam Hilger. London. 1985. – 386 p.
3. Крылова, Т.Н. Интерференционные покрытия [Текст] / Т.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. Яковлев, П.П. Проектирование интерференционных покрытий [Текст] / П.П. Яковлев, Б.Б. Мешков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
5. Mitsa, A. Mathematical modeling of spectral characteristics of optical coatings with slightly inhomogeneous chalcogenide films [Text] / A.Mitsa, V.Mitsa, A.Ugrin // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2005. – Vol.7, №2, April. – P.955.
6. Holovacs, J. Computer modelling of characteristics of structures with short periods: proc. 4th inter. conf. [Text] / J. Holovacs, A. Mitsa, V. Mitsa // Applied Informatics. – Eger-Noszvaj (Hungary), 1999. – P.51–57.
7. Pervak, Y. Influence of transition film-substrate layers on optical properties of multilayer structure: proc. of SPIE [Text] / Y. Pervak, A. Mitsa, J. Holovach // The International Society for Optical Engineering. – 2000. – Vol.4425. – P.321–325.
8. 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. – С. 37–45.
9. Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman, A.V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.

Отримано 29.06.2014