

В. Пецко; О. Міца, канд. техн. наук

Ужгородський національний університет

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

В роботі приведено узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багат шарових інтерференційних структур (БІС) широко смугових оптичних фільтрів в залежності 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 широко смугових фільтрів в залежності від кута.

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

V. Petsko; O. Mitsa

MODELING OF SPACE-POLARIZATION PARAMETERS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WIDEBAND FILTERS WITH INHOMOGENEOUS INTERFACES

In this work we have investigated the angular and polarization dependences of light transmission of multilayer interference structures (broadband interference filters, BIS) with inhomogeneities on interfaces. There was shown changes in the parameters of transmission spectra depending from polarization and angle of incidence parallel beams of radiation relative to the normal to the surface. The effect influence of changes in the working wavelength on the spectral characteristics of broadband optical filters was investigated. For calculation where used popular for application the working wavelength at 480, 630, 750, 1000 and 3000 nm.

In given work the layered-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 depending from the incident angle and polarization of light, influence of transition layer on the interfaces between layers have investigated. The basic parameters which are influenced on changing of transmission spectra of multilayer interference structures was 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 extend the applicability of non-crystalline films during manufacturing of BIS.

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

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 широко смугових фільтрів, оскільки галузь застосування дуже широка – це астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [1–4]. На даний час 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 [5, 6] не відображають кутових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик

ширококутових фільтрів. Тому метою дослідження було вирішення наступних задач: 1) дослідження кутових та поляризаційних залежностей пропускання світла ширококутовими оптичними фільтрами; 2) розроблення моделі та дослідження впливу перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на їх спектральні характеристики в залежності від кута та поляризації.

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

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

На рис. 1 приведено типовий спектр пропускання ширококутових БІС та їх основні параметри: середній коефіцієнт пропускання $T_{сер}$, який визначається в діапазоні довжин хвиль від $\lambda_{к,0,5}$ до $\lambda_{о,0,5}$ - 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 $\lambda_{к,0,5}$ до $\lambda_{о,0,5}$ та від $\lambda_{к,0,1}$ до $\lambda_{о,0,1}$ - відповідно короткохвильові, та довгохвильові границі спектрального діапазону;

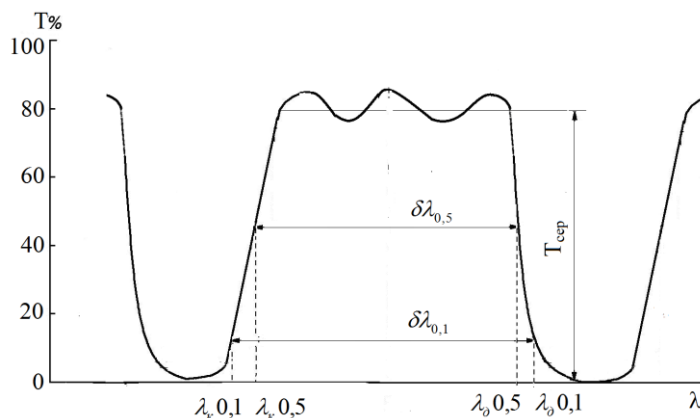


Рис. 1. Форма та основні параметри спектрів пропускання ширококутових фільтрів
Fig. 1. Shape and basic parameters of transmission spectra of broadband filters

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

Дослідження проведені для фільтрів, що знаходяться в зовнішньому середовищі із ($n_0 = 1$) та утворені БІС чередуванням шарів B з високим ($n_B = 2,3$) і H низьким ($n_H = 1,35$) показниками заломлення, осадженими на підкладки із 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 широкосмугових інтерференційних фільтрів зі зміною кута падіння θ_0 для s- та р-поляризацій світлових потоків з довжиною хвилі 630 нм приведено на рис.2 для наглядності, а відповідні значення основних параметрів зведено в таблицю 1.

Таблиця 1. Основні параметри спектрів пропускання широкосмугового фільтру з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм
 Table 1. Basic parameters of the transmission spectra of a broadband filter at working wavelength $\lambda_0 = 630$ nm

θ_0	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s- поляризація						
$\delta\lambda_{0,5}$	302,	281,3	259,	241,	236,1	217,
$\partial\lambda_{0,1}$	319,	295,5	270,	250,	245,1	224,
$T_{сеп}$	0,91	0,902	0,87	0,83	0,810	0,62
р поляризація						
$\delta\lambda_{0,5}$	302,	301,6	302,	303,	303,7	299,
$\partial\lambda_{0,1}$	319,	321,0	326,	335,	339,5	-
$T_{сеп}$	0,91	0,931	0,94	0,95	0,950	0,85

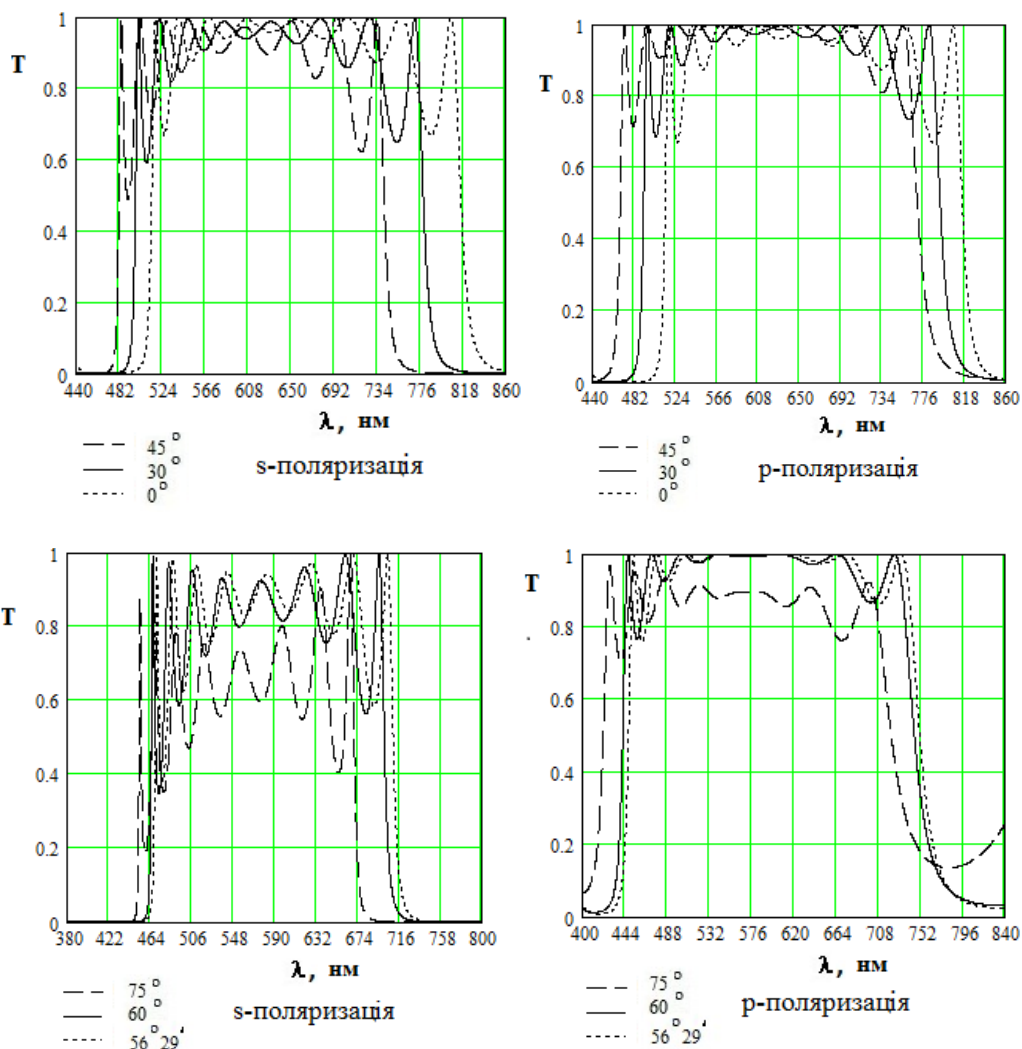


Рис. 2. Трансформація спектрів пропускання широкосмугового фільтру з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм зі зміною кутів падіння
 Fig. 2. Transmission spectra of broadband filter with changing angles of incidence and working wavelength $\lambda_0 = 630$ nm

З табл 1. видно, що для s-поляризації при збільшенні кута падіння світла середнє значення пропускання $T_{сер}$ поступово зменшуються 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 $\theta_0 = 75^\circ$.

Із збільшенням робочої довжини хвилі для ширококугових 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 з ростом λ_0 незалежно від їх змін з ростом кутів падіння θ_0 .

Вплив неоднорідностей на спектральні характеристики відрізаючих фільтрів.

Розглянемо наступну шарувато-неоднорідну модель профілю показника заломлення плівок, яка включає в себе 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 до 30 нм.



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

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

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

$$3) \text{ квадратичний : } n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2;$$

$$4) \text{ логарифмічний : } n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j);$$

$$5) \text{ експоненціальний: } n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{mp-1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1);$$

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:

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

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.

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за допомогою матричного методу Абеде [7]. 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 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 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.

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:

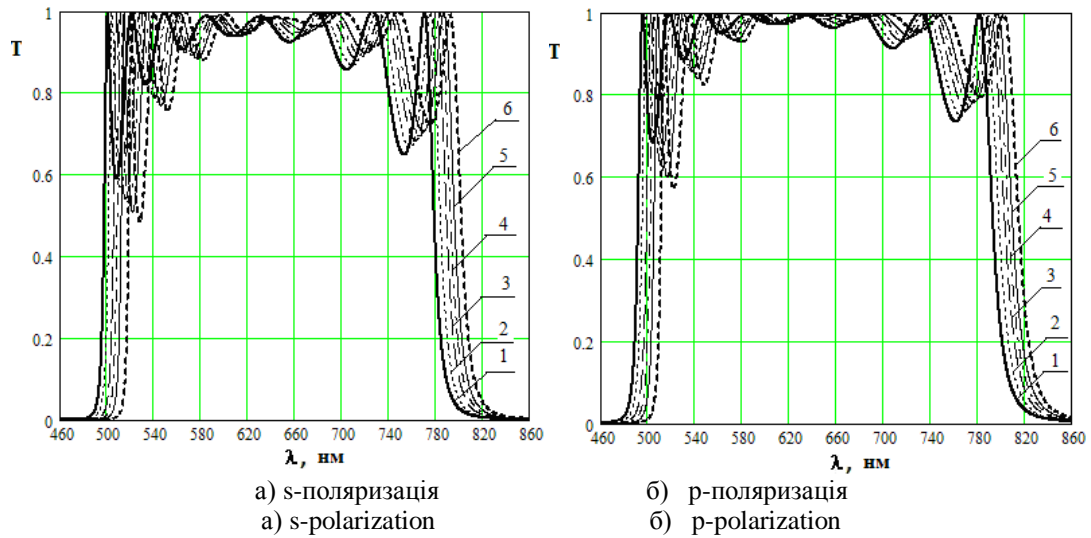


Рис. 4 . Спектральні характеристики 17-шарового фільтра при $\theta_0 = 30^\circ$ ($\lambda_0=630$ нм) в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення: 1 – ідеальний випадок; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення;

Fig. 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

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \frac{4}{\left(2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (7)$$

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 .

Вплив перехідної області на спектральні характеристики широкосмугових фільтрів розглянемо на прикладі 17-шарового широкосмугового фільтра $S-[2xV(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH2(1-x)V]^4$ (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 видно, що при наявності перехідної області з 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 найбільше впливає на середній коефіцієнт пропускання 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 р-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 із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення середнього коефіцієнта пропускання, а для р-поляризації зменшуються відхилення від ідеального випадку в сторону зменшення середнього коефіцієнта пропускання.

Табл 2. Коефіцієнт середнього пропускання $T_{сер}$
Table 2. Coefficient of average transmission T_{avg}

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s-поляризація						
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
р-поляризація						
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 з 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 вище сказане, для обох поляризацій при наявності перехідної області із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення ширини смуги пропускання.

При наявності перехідної області з 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 із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення ширини смуги пропускання

При наявності перехідної області із збільшенням робочої довжини хвилі, значення середнього коефіцієнта пропускання менше відрізняється від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

При наявності перехідної області із 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 із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення середнього коефіцієнта пропускання $T_{сер}$, а для р-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області зменшуються відхилення від ідеального випадку в сторону 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 в практиці конструювання та виготовлення широкопasmових оптичних фільтрів.

Conclusions. 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 to grows for p- polarized up to value Brewster angle, 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_{avg} average T_{avg} in higher side in compare to the T_{avg} for ideal case and deviate 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 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.

Література

1. Путилин, Э. С. Оптические покрытия: уч. пос. / Э. С. Путилин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
2. McLeod, H. A. Thin-Film Optical filters / H. A. McLeod. – Adam Hilger. London. 1985. – 386 p.
3. Крылова, Т. Н. Интерференционные покрытия / Т. Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. Яковлев, П. П. Проектирование интерференционных покрытий / П. П. Яковлев, Б. Б. Мешков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
5. Pervak, Y. Influence of transition film-substrate layers on optical properties of multilayer structure: proc. of SPIE / Y. Pervak, A. Mitsa, J. Holovach // The International Society for Optical Engineering. – 2000. – Vol. 4425. – P. 321–325.
6. Holovacs J. Computer modelling of characteristics of structures with short periods: proc. 4th inter. conf. / J. Holovacs, A. Mitsa, V. Mitsa // Applied Informatics. – Eger-Noszvaj (Hungary), 1999. – P. 51–57.
7. Furman Sh. Basics of optics of multiplayer systems / Sh. Furman., A. V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.