

3. Буджак, Я. С. Лабораторно-розрахунковий практикум з фізики напівпровідників та теорії твердого тіла [Текст] / Я. С. Буджак, П. І. Мельник, С. П. Новосядлий. – Альт, 2008. – 240 с.
4. Пека, Г. П. Варизонные полупроводники [Текст] / Г. П. Пека, В. Ф. Коваленко, А. Н. Смоляр; под ред. Г. П. Пека. – К.: Выща шк., 1989. – 251 с.
5. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно-легированных слоев GaAs [Текст] / А. В. Черилов. – Электронная техника, 1984. – С. 8–12.
6. TSANG, W. T. Extremely low threshold AlGaAs graded index wave guide separate confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy [Text] / W. T. TSANG. – Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40. – P. 217–219.
7. Горщев, Л. И. Влияние легирующей примеси на механические и рекомбинационные параметры варизонных твердых растворов AlGaAs [Текст] / Л. И. Горщев, В. Ф. Коваленко, Б. М. Масенко. // Укр-физ журнал. – 1982. – Т. 27. – С. 568–571.
8. Sassi, G. Theoretical analysis of solar cells based on graded band-gap structures [Text] / G. Sassi // Journal of Applied Physics – 1983. – Vol. 54. – P. 5421–5427.
9. Базбек, А. И. Быстродействующие светодиоды на основе варизонных твердых растворов AlGaAs(Si) [Текст] / А. И. Базбек, В. Ф. Коваленко, В. А. Краснов. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1986. – Т. 45. – С. 274–279.
10. Новосядлий, С. В. Високоєфективні структури сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого кремнію [Текст]: Матер. II Міжн.науково-прак. конф. / С. В. Новосядлий, Л. В. Мельник, Т. П. Кіндрат // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікації, нано-та мікроелектроніки. – 2012. – С. 172–173.
11. Новосядлий, С. В. Дослідження ефективності гетерних технологій в структурах GaAs [Текст] / С. П. Новосядлий, С. М. Марчук, Т. Р. Сорохтей, Ю. В. Возняк. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – С. 416–428.
12. Патент на корисну модель № 68203 МПК H01L21/20 від 26.03.12. Спосіб формування епітаксійних арсенід-галієвих шарів на монокристалічних кремнієвих підкладках [Текст] / Новосядлий С. П., Вівчарук В. М., Кіндрат Т. П. – Прикарпатський національний університет. – 7 с.

В роботі приведено узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур відрізаючих 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 відрізаючих фільтрів в залежності від кута

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

В работе приведены обобщенные изменения параметров спектров пропускания многослойных интерференционных структур отрезающих оптических фильтров в зависимости от поляризации и угла падения параллельных потоков излучения относительно нормали к их поверхности. Разработана модель и исследовано влияние переходной области с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики отрезающих фильтров в зависимости от угла

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

УДК 519.85

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО– ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДРІЗАЮЧИХ ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

В. І. Пецко

Аспірант

Кафедра кібернетики та
прикладної математикиУжгородський національний університет
вул. Підгірна, 46, м. Ужгород, Україна, 88000

E-mail: petsko.vi@gmail.com

1. Вступ

За останні роки набув чималого розвитку синтез багатошарових оптичних систем, помітно зріс інтерес до технічного застосування тонких плівок, що викли-

кало швидкий розвиток цієї галузі фізичної оптики, що стосується відбивання, пропускання і поглинання світла в багатошарових тонкоплівкових системах. Практична цінність таких систем, зокрема і фільтрів, полягає в тому, що за їх допомогою можна в широкому

інтервалі змінювати значення коефіцієнтів пропускання і відбиття. Дуже поширеними є відрізаючі [1–3] фільтри, які використовуються в багатьох галузях науки і техніки: астрофізика, хімія, медицина, приладобудування, сенсорика.

Сучасний стан розвитку техніки в галузі електроніки, оптоелектроніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеною хімічною стійкістю. Для отримання таких систем необхідно вирішити питання вибору матеріалів підкладки і шарів, з яких складається система; розрахунку товщини шарів і оптичних параметрів конструкції [3, 4]. Проте вимоги до оптичних інтерференційних покриттів часто можна задовольнити лише за допомогою покриттів з шарами неоднакової товщини. У зв'язку з цим необхідно контролювати товщини шарів таких покриттів, визначати вплив похибки напilenня на спектральні характеристики систем.

Актуальність цих досліджень має як практичне, так і теоретичне значення для розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем відрізаючих фільтрів з низькими втратами та підвищеною хімічною стійкістю.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

На даний час проблема моделювання спектральних характеристик оптичних покриттів з частковою неоднорідністю вирішена недостатньо. На першому етапі досліджень некристалічних частково неоднорідних плівок незалежно в [5, 6] була запропонована найпростіша шарувато-неоднорідна модель їх профілю показника заломлення. Однак ступінчастий характер опису часткової неоднорідності [5, 6] в плівках не є єдино можливим. 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 куткових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик відрізаючих фільтрів.

Тому метою дослідження було вирішення наступних задач:

- 1) дослідження куткових та поляризаційних залежностей пропускання світла відрізаючими 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.

3. Дослідження куткових та поляризаційних параметрів відрізаючих фільтрів

Узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур (БІС) отримано з аналізу спектрів пропускання 17-и шарових відрізаючих оптичних фільтрів типу $S-[xB(1-x)N]^4(1-x)B[xN(1-x)B]^4$, де S – підкладка з показником заломлення (n_s), B і N відповідно шари з високим (n_B) та низьким (n_N) показниками заломлення і оптичними

товщинами рівними $nd = \frac{\lambda_0}{4}$ та сумарною оптичною

товщиною пари шарів $xV+(1-x)N=\lambda_0/2$, тобто рівною половині робочої довжини хвилі λ_0 при падінні світла вздовж нормалі до їх поверхонь.

На рис. 1 приведено типовий спектр пропускання відрізаючих БІС та їх основні параметри: довжина хвилі мінімуму пропускання – $\lambda_{\min}=\lambda_0$; мінімальний коефіцієнт пропускання – T_{\min} ; ширина області мінімального пропускання $\delta\lambda_{0,5}$ на рівні $T=0,5$ і $\delta\lambda_{0,1}$ – на рівні $T=0,1$ та відповідні їм значення довжин хвиль $\lambda_{0,5}$ і $\lambda_{0,1}$; довжина хвилі максимуму пропускання – λ_{\max} , максимальний коефіцієнт пропускання – T_{\max} .

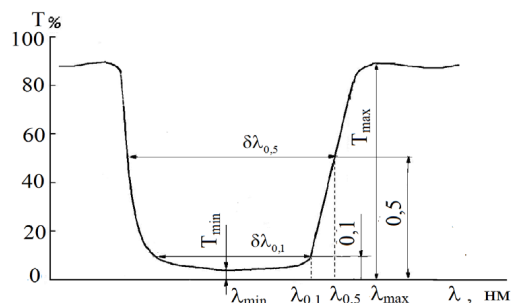


Рис. 1. Форма та основні параметри спектрів пропускання відрізаючих фільтрів

Для розрахунку спектральних характеристик відрізаючого фільтра використовувався матричний метод Абеде [9, 10]. Для встановлення основних закономірностей змін куткових та поляризаційних залежностей параметрів пропускання світла відрізаючими оптичними фільтрами розроблено 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 N низьким ($n_N=1,35$) показниками заломлення, осадженими на підкладці 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 відрізаючих інтерференційних фільтрів зі зміною кута падіння θ_0 для s- та p-поляризацій світлових потоків з довжиною хвилі 630 нм приведено на рис. 2, а–г для наглядності, а відповідні значення основних параметрів зведено в табл. 1.

З табл. 1 видно, що для s-поляризації при збільшенні кута падіння світла мінімальні значення пропускання T_{\min} поступово знижуються від 0,0002265 при $\theta_0=0^\circ$ до 0,00000109 при $\theta_0=75^\circ$, при цьому положення λ_{\min} зміщується в короткохвильову область від 630,00 до 509,06 нм (рис. 2.). Для p-поляризації мінімум пропускання зростає від 0,0002265 при $\theta_0=0^\circ$ до 0,0640361 при $\theta_0=75^\circ$, при цьому λ_{\min} значніше зміщується в короткохвильову область до 502,23 нм.

Ширина області мінімального пропускання на рівні $T=0,1$ для s-поляризації збільшується від 231,23 нм при $\theta_0=0^\circ$ до 277,32 нм при $\theta_0=75^\circ$, причому відповідна довжина хвилі в довгохвильовій області $\lambda_{0,1}$ зміщується в короткохвильову область від 766,17 нм до

681,91 нм. Для р-поляризації дана ширина мінімального пропускання зменшується від 231,23 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 58,93 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а відповідна довжина хвилі в довгохвильовій області $\lambda_{0,1}$ значніше зміщується в короткострокову область від 766,17 нм до 534,71 нм.

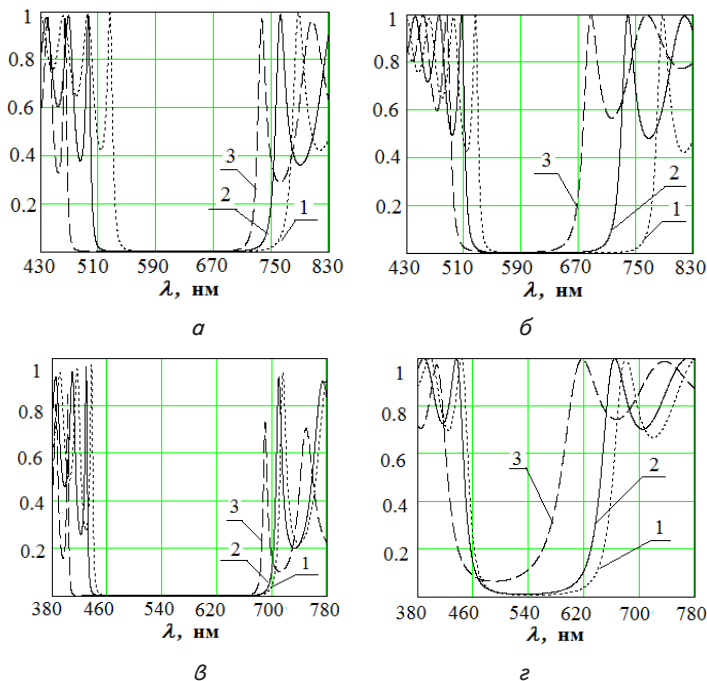


Рис. 2. Трансформація спектрів пропускання відрізаючого фільтру з робочою довжиною хвилі $\lambda_0=630$ нм зі зміною кутів падіння: а – s-поляризація для кутів: 1 – $\theta_0=0^\circ$, 2 – $\theta_0=30^\circ$, 3 – $\theta_0=45^\circ$; б – р-поляризація для кутів: 1 – $\theta_0=0^\circ$, 2 – $\theta_0=30^\circ$, 3 – $\theta_0=45^\circ$; в – s-поляризація для кутів 1 – $\theta_0=56^\circ29'$, 2 – $\theta_0=60^\circ$, 3 – $\theta_0=75^\circ$; г – р-поляризація для кутів: 1 – $\theta_0=56^\circ29'$, 2 – $\theta_0=60^\circ$, 3 – $\theta_0=75^\circ$

Ширина області мінімального пропускання на рівні $T=0,5$ для s-поляризації збільшується від 248,89 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 284,03 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, відповідна довжина хвилі в довгохвильовій області $\lambda_{0,1}$ зміщується в короткострокову область від 778,14 нм до 686,76 нм. Для р-поляризації дана ширина мінімального пропускання зменшується від 248,89 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 121,98 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а відповідна довжина хвилі в довгохвильовій області $\lambda_{0,1}$ значніше зміщується в короткострокову область від 778,14 нм до 573,93 нм.

Максимальний коефіцієнт пропускання T_{max} для s-поляризації знижуються від 0,9933168 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,7286869 при $\theta_0 = 75^\circ$, при цьому положення λ_{min} зміщується в короткохвильову область від 787,06 до 689,01 нм (також рис. 2). Для р-поляризації максимум пропускання зростає від 0,9933168 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,9999999 при $\theta_0 = 56^\circ29'$, що пояснюється законом Брюстера ($\theta_0 = 56^\circ29'$ – 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), а потім знижується до 0,9959381 при $\theta_0 = 75^\circ$, при цьому λ_{max} значніше зміщується в короткохвильову область до 578,00 нм.

Із збільшенням робочої довжини хвилі для відрізаючих фільтрів коефіцієнти мінімуму пропускання – T_{min} і максимуму пропускання – T_{max} практично не змінюються для всіх кутів; значення зміщень λ_{max} , $\lambda_{0,1}$, $\lambda_{0,5}$, $\lambda_{0,1}$ в короткохвильову область зростають з ростом λ_0 ; ширини смуг області мінімального 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 .

Таблиця 1

Основні параметри спектрів пропускання відрізаючого фільтру з робочою довжиною хвилі $\lambda_0=630$ нм

θ_0	0°	30°	45°	$56^\circ29'$	60°	75°
s- поляризація						
T_{min}	0,0002265	0,0000886	0,000027726	0,00000882	0,00000603	0,00000109
λ_{min}	630	600,42	569	542,96	535,36	509,06
$\partial\lambda_{0,1}$	231,23	241,33	252,57	262,48	265,51	277,32
$\delta\lambda_{0,5}$	248,89	256,05	264,47	272,21	274,62	284,03
$\lambda_{0,1}$	766,17	744,25	721,62	703,56	698,45	681,91
$\lambda_{0,5}$	778,14	754,38	729,94	710,45	704,92	686,76
λ_{max}	787,06	761,72	735,72	714,95	709,03	689,01
T_{max}	0,9933168	0,9869882	0,9712925	0,9377571	0,9191901	0,7286869
р поляризація						
T_{min}	0,0002265	0,0005874	0,0019827	0,0068076	0,0103097	0,0640361
λ_{min}	630	600,37	568,69	542,03	534,1	502,23
$\partial\lambda_{0,1}$	231,23	198,66	161,59	127,23	115,99	58,93
$\delta\lambda_{0,5}$	248,89	218,13	184,46	155,78	147,35	121,98
$\lambda_{0,1}$	766,17	715,57	660,51	612,79	598,14	534,71
$\lambda_{0,5}$	778,14	728,45	675,16	630,51	617,42	573,93
λ_{max}	787,06	738,22	686,53	644,51	632,68	578
T_{max}	0,9933168	0,9960466	0,9988652	0,9999999	0,9998967	0,9959381

4. 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 багатозарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлючій 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)

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; $k=4$ – розглядається четвертьхвильовий шар; n_f – показник заломлення основної частини плівки; λ_0 – робоча довжина хвилі.

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлючій компоненті на спектральні характеристики за допомогою матричного методу Абеде [5, 6]. Вибираючи за параметри показник заломлення n , геометричну товщину шару d і довжину хвилі λ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

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

де $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda}$, $i = \sqrt{-1}$, θ – кут між про-

менем і нормаллю до площини падіння. Значення $p = n \cos \theta$ для ТЕ хвилі (s -поляризація) і $p = \frac{n}{\cos \theta}$ для ТМ хвилі (p -поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару буде рівна:

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

Розглянемо $(4k+1)$ -шарову структуру конструкції $S-[xB(1-x)H]^k(1-x)B[xH(1-x)B]^k$. 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.

Беручи це до уваги, ми можемо задати характеристичну матрицю формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_s \left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{4} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda \right) \cdot \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)). \quad (6)$$

Знаючи характеристичну матрицю всієї структури, ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

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

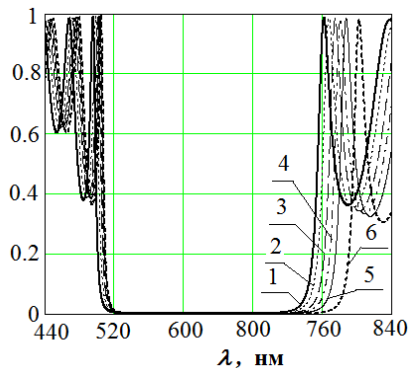
де $p_0 = N_0 \cos \theta_0$ і $p_s = N_s \cos \theta_s$ для ТЕ хвилі (s -поляризація); $p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$ і $p_s = \frac{N_s}{\cos \theta_s}$ для ТМ хвилі (p -поляризація); θ_0 – кут під яким промінь на шарувату структуру; θ_s – кут під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення; n_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки

відповідно, m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} – елементи характеристичної матриці M .

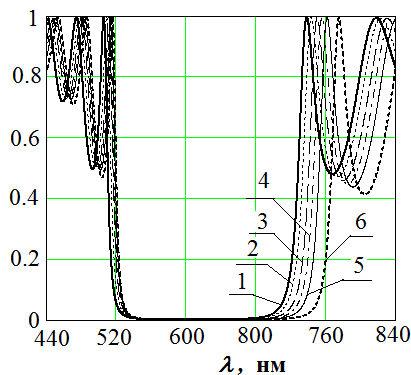
Вплив перехідної області на спектральні характеристики відрізаючих фільтрів розглянемо на прикладі 17-шарового відрізаючого фільтра конструкції $S-[xB(1-x)H]^4(1-x)V[xH(1-x)V]^4$. (рис. 4, а, б), для якого показник заломлення високого шару $n_B = 2,3$, та низького $n_H = 1,35$, показник заломлення перехідної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

З табл. 2. видно, що при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення мінімальний коефіцієнт пропускання при $\theta_0 = 0^\circ$ зменшується на $\Delta T = 0,0001471$, з логарифмічним на $\Delta T = 0,0000965$, з лінійним на $\Delta T = 0,0000692$, з квадратичним на $\Delta T = 0,0000413$, з експоненціальним на $\Delta T = 0,0000097$, при цьому робоча довжина хвилі при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 19,37$ нм (табл. 3.), на $\Delta\lambda = 13,66$ нм при логарифмічному, на $\Delta\lambda = 10,78$ нм при лінійному, на $\Delta\lambda = 7,96$ нм, при квадратичному, на $\Delta\lambda = 3,89$ нм при експоненціальному. Отже найбільше впливає на спектральні характеристики ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області що характерне для всіх кутів. Далі йдуть логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний. Це твердження поширюється на всі спектральні характеристики і всі розглядувані довжини хвилі при наявності перехідної області.

Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ мінімум коефіцієнта пропускання зменшується на $\Delta T = 0,0000584$, робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 19,98$ нм, при $\theta = 45^\circ$ на $\Delta T = 0,0000185$ і $\Delta\lambda = 20,72$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta T = 0,0000059$ і $\Delta\lambda = 21,42$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta T = 0,0000040$ і $\Delta\lambda = 21,65$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta T = 0,0000008$ і $\Delta\lambda = 22,52$ нм. Звідси впливає, що для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області зменшується відхилення від ідеального випадку в сторону зменшення мінімуму коефіцієнта пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.



а



б

Рис. 4. Спектральні характеристики 17-шарового відрізаючого фільтра при $\theta_0 = 30^\circ$ 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

Таблиця 2

Залежність мінімального коефіцієнта пропускання від кута падіння та розподілу неоднорідностей показника заломлення перехідної області

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	0,0002265	0,0000886	0,0000277	0,0000088	0,0000060	0,0000011
Експоненціальний	0,0002168	0,0000856	0,0000271	0,0000087	0,0000060	0,0000011
Квадратичний	0,0001852	0,0000730	0,0000232	0,0000075	0,0000052	0,0000009
Лінійний	0,0001573	0,0000617	0,0000195	0,0000063	0,0000043	0,0000008
Логарифмічний	0,0001300	0,0000506	0,0000159	0,0000051	0,0000035	0,0000006
Ступінчастий	0,0000794	0,0000302	0,0000092	0,0000029	0,0000020	0,0000003
p-поляризація						
Ідеальний	0,0002265	0,0005874	0,0019827	0,0068076	0,0103097	0,0640361
Експоненціальний	0,0002168	0,0005691	0,0019475	0,0067635	0,0102739	0,0634332
Квадратичний	0,0001852	0,0004923	0,0017079	0,0059946	0,0091291	0,0556556
Лінійний	0,0001573	0,0004216	0,0014756	0,0052122	0,0079482	0,0479352
Логарифмічний	0,0001300	0,0003514	0,0012396	0,0044022	0,0067193	0,0400246
Ступінчастий	0,0000794	0,0002177	0,0007793	0,0027930	0,0042697	0,0250107

Залежність робочої довжина хвилі від кута падіння та розподілу неоднорідностей показника заломлення перехідної області

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	630,00	600,42	569,00	542,96	535,36	509,06
Експоненціальний	633,89	604,52	573,36	547,58	540,07	514,08
Квадратичний	637,96	608,76	577,81	552,23	544,78	519,05
Лінійний	640,78	611,67	580,83	555,35	547,93	522,32
Логарифмічний	643,66	614,62	583,86	558,46	551,07	525,56
Ступінчастий	649,37	620,40	589,72	564,38	557,01	531,58
p-поляризація						
Ідеальний	630	600,37	568,69	542,03	534,10	502,23
Експоненціальний	633,89	604,25	572,54	545,8	537,82	504,77
Квадратичний	637,96	608,37	576,69	549,91	541,89	507,85
Лінійний	640,78	611,25	579,62	552,84	544,80	510,31
Логарифмічний	643,66	614,19	582,61	555,84	547,77	513,00
Ступінчастий	649,37	620,09	588,68	561,99	553,93	519,14

Для ступінчастого розподілу для р-поляризації при $\theta_0 = 30^\circ$ коефіцієнт мінімуму пропускання зменшується на $\Delta T = 0,0003697$, робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 19,72$ нм, при $\theta_0 = 45^\circ$ на $\Delta T = 0,0012034$ і $\Delta\lambda = 19,99$ нм, при $\theta_0 = 56^\circ 29'$ на $\Delta T = 0,0040146$ і $\Delta\lambda = 19,96$ нм, при $\theta_0 = 60^\circ$ на $\Delta T = 0,0060400$ і $\Delta\lambda = 19,83$ нм, при $\theta_0 = 75^\circ$ на $\Delta T = 0,0390254$ і $\Delta\lambda = 16,91$ нм. З огляду на вище сказане, для р-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшуються відхилення від ідеального випадку в сторону зменшення мінімуму коефіцієнта пропускання. При цьому збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль, а починаючи з кута $\theta_0 = 45^\circ$ зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення ширина смуги області мінімального пропускання на рівні $T=0,1$ при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 33,33$, з логарифмічним на $\Delta\lambda = 18,63$, з лінійним на $\Delta\lambda = 12,82$, з квадратичним на $\Delta\lambda = 7,73$, з експоненціальним на $\Delta\lambda = 2,41$. При цьому довжина хвилі $\lambda_{0,1}$, що відповідає рівню $T=0,1$ в довгохвильовій області при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 41,04$ нм, на $\Delta\lambda = 25,47$ нм при логарифмічному, на $\Delta\lambda = 18,78$ нм при лінійному, на $\Delta\lambda = 12,65$ нм, при квадратичному, на $\Delta\lambda = 5,23$ нм при експоненціальному. Для обох поляризацій при наявності перехідної області для всіх кутів збільшується ширина смуги області мінімального пропускання в порівнянні з ідеальним випадком, а також відбувається зсув відповідної довжини хвилі в область довгих хвиль.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення ширина смуги області мінімального пропускання на рівні $T=0,5$ при $\theta_0 = 0^\circ$ збільшується на $\Delta\lambda = 31,53$, з логарифмічним на $\Delta\lambda = 17,70$, з лінійним на $\Delta\lambda = 12,22$, з квадратичним на $\Delta\lambda = 7,44$, з експоненціальним на $\Delta\lambda = 2,39$. При цьому довжина хвилі $\lambda_{0,5}$, що відповідає рівню $T=0,5$ в довгохвильовій області при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 39,96$ нм, на $\Delta\lambda = 24,87$ нм при логарифмічному, на $\Delta\lambda = 18,37$ нм

при лінійному, на $\Delta\lambda = 12,42$ нм при квадратичному, на $\Delta\lambda = 5,18$ нм при експоненціальному. Для обох поляризацій при наявності перехідної області для всіх кутів збільшується ширина смуги області мінімального пропускання в порівнянні з ідеальним випадком, а також відбувається зсув відповідної довжини хвилі в область довгих хвиль.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення коефіцієнт максимуму пропускання T_{max} при $\theta_0 = 0^\circ$ зменшується на $\Delta T = 0,0025601$, з логарифмічним на $\Delta T = 0,0017589$, з лінійним на $\Delta T = 0,0013620$, з квадратичним на $\Delta T = 0,0009776$, з експоненціальним на $\Delta T = 0,0004510$, при цьому відповідна довжина хвилі λ_{max} при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на $\Delta\lambda = 38,96$ нм, на $\Delta\lambda = 24,27$ нм при логарифмічному, на $\Delta\lambda = 17,96$ нм при лінійному, на $\Delta\lambda = 12,17$ нм, при квадратичному, на $\Delta\lambda = 5,11$ нм при експоненціальному.

Для обох поляризацій із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшуються відхилення від ідеального випадку в сторону зменшення коефіцієнта максимуму пропускання, причому для s-поляризації збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль, а для р-поляризації із збільшенням кута спочатку збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль, а починаючи з кута $\theta_0 = 45^\circ$ зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

Із збільшенням робочої довжини хвилі, значення коефіцієнта пропускання в точці мінімуму менше відрізняється від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій, причому збільшується зсув точки мінімуму пропускання в область довгих хвиль, що характерне для всіх кутів обох поляризацій, причому для s-поляризації цей зсув більш помітний.

Із збільшенням робочої довжини хвилі, зменшується збільшення ширини смуги області мінімального пропускання $\delta\lambda_{0,1}$ та $\delta\lambda_{0,5}$ у порівнянні з ідеальним випадком, збільшується зсув точки, що відповідає рівню пропускання $T=0,1$ та $T=0,5$ в область довгих хвиль, що характерне для всіх кутів обох поляризацій, причому для s-поляризації цей зсув більш помітний.

Із збільшенням робочої довжини хвилі, значення коефіцієнта максимуму пропускання в точці мінімуму менше відрізняється від ідеального випадку, зменшується зсув точки максимуму пропускання в область довгих хвиль, що характерне для всіх кутів обох поляризацій, причому для s-поляризації цей зсув більш помітний.

Збільшення шарів зменшує різницю між ідеальним випадком різких меж між плівками та при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті для більшості спектральних характеристик (крім максимуму коефіцієнта пропускання, та відповідної довжини хвилі). Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль.

5. Висновки

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

– мінімальні значення T_{\min} пропускання зменшуються для s-поляризованого світла, а для р-поляризованого зростають, залишаючись завжди вищими

– положення мінімумів λ_{\min} пропускання завжди зміщуються в короткохвильову область, залишаючись завжди вищими для s-поляризованого світла

– ширина області мінімального пропускання на рівні $T=0,5$ та на рівні $T=0,1$ збільшується для s-поляризованого світла, а для р-поляризованого зменшується, причому відповідні довжини хвиль для обох поляризацій зміщуються у короткохвильову область.

– максимальні значення T_{\min} пропускання зменшуються для s-поляризованого світла, а для р-поляризованого зростають до кута Брюстера, а потім спадають.

– положення максимумів λ_{\max} пропускання завжди зміщуються в короткохвильову область, залишаючись завжди вищими для s-поляризованого світла

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

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 відрізаючих оптичних фільтрів.

Література

1. Путилин, Э. С. Оптические покрытия [Текст]: уч. пос. / 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. 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.
6. 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.
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 multilayer systems [Text] / Sh. Furman., A. V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.