

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-
ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ
ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРАЛЬНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ВУЗЬКОСМУГОВИХ ОПТИЧНИХ
ФІЛЬТРІВ**

В роботі приведено узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур (БІС) вузькосмугових оптичних фільтрів в залежності від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні. Отримані результати особливо актуальні для визначення ефективності використання збіжності або розбіжності потоків випромінювання в оптичних системах при наявності БІС.

Перспективи розвитку оптоелектроніки, лазерної техніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеної хімічної стійкості [1]. Практична цінність таких систем, зокрема і фільтрів, полягає в тому, що за їх допомогою можна в широкому спектральному інтервалі змінювати значення коефіцієнтів пропускання і відбиття. Серед фільтрів різних типів найпоширенішими є вузькосмугові фільтри [2-3], за допомогою яких можна виділяти спектральні смуги різної ширини, починаючи від декількох ангстремів і закінчуючи десятими мікрона. Галузь їх застосування дуже обширна: це і лазерні резонатори [2, 3], і модулятори світла [4], і оптичні телекомунікаційні елементи [5]. Вони можуть бути використані для аналізу газу, рідини, в системах пожежної безпеки та в інших оптичних давачах і приладах. Варто зазначити, що часто інтерференційні фільтри за оптичними характеристиками успішно конкурують зі спектральними приладами і водночас значно менші за габаритами.

Для отримання таких систем необхідно вирішити питання вибору матеріалів підкладки і шарів, з яких складається система; розрахунку товщини шарів і оптичних параметрів конструкції [1-4]. За останні роки набув чималого розвитку синтез багатошарових оптичних систем та суттєво розширилося їх технічне застосування для

формування різних за напрямком поширення, поляризацією та спектральним складом потоків випромінювання [6-9]. Проте при оцінці параметрів їх спектральних характеристик вважається, що паралельні світлові потоки поширюються вздовж нормалі до поверхонь тонких плівок. Нижче наведені основні закономірності кутових та поляризаційних залежностей пропускання світла вузькосмуговими оптичними фільтрами, що є особливо важливим для оптичних систем, що функціонують в збіжних або розбіжних потоках випромінювання.

Узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багат шарових інтерференційних структур (БІС) отримано з аналізу спектрів пропускання вузькосмугових 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 $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-x)B]^4$, де S – підкладинка з показником заломлення (n_s), B і H відповідно шари з високим (n_B) та низьким (n_H) показниками заломлення і оптичними товщинами рівними $nd = \frac{\lambda_0}{4}$ та сумарною оптичною товщиною пари шарів $xB+(1-x)H = \lambda_0/2$, тобто рівною половині робочої довжини хвилі λ_0 при падінні світла вздовж нормалі до їх поверхонь.

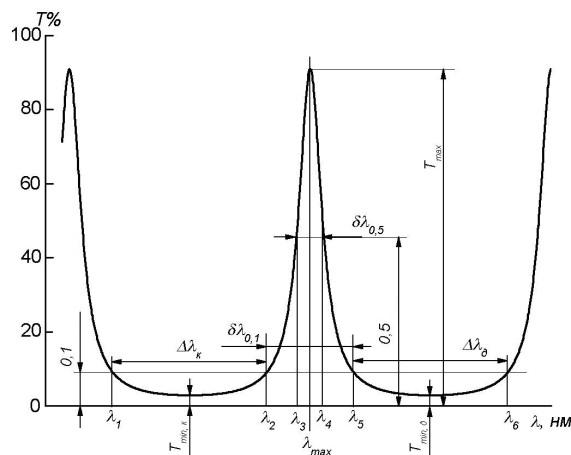


РИС. 1. Форма та основні параметри спектрів пропускання вузькосмугових фільтрів.

На рис. 1 приведено типовий спектр пропускання вузькосмугових БІС та його основні параметри: довжина хвилі максимуму пропускання – $\lambda_{\max} = \lambda_0$; коефіцієнт максимуму пропускання - T_{\max} ; півширини смуги пропускання $\delta\lambda_{0,5}$

на рівні 0,5 і $\delta\lambda_{0,1}$ - на рівні 0,1 та відповідні їм значення довжин хвиль λ_3 і λ_4 та λ_2 і λ_5 ; ширини спектральних інтервалів подавлення пропускання $\Delta\lambda_K$ і $\Delta\lambda_D$, в межах яких пропускання нижче 0,1 в більш коротко- $\Delta\lambda_K$ і довгохвильовій $\Delta\lambda_D$ областях з відповідними їм довжинами хвиль λ_1 - λ_2 і λ_6 - λ_5 .

Для розрахунку спектральних характеристик вузькосмугового фільтра використовувався матричний метод [10], в якому характеристична матриця одного шару задається у вигляді:

$$M_j(N_j, d_j, \lambda) = \begin{vmatrix} \cos \delta_j(N_j, d_j, \lambda) & -\frac{i}{p_j} \sin \delta_j(N_j, d_j, \lambda) \\ -ip_j \sin \delta_j(N_j, d_j, \lambda) & \cos \delta_j(N_j, d_j, \lambda) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де $\delta_j(N_j, d_j, \lambda) = \frac{2\pi N_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}$, $N_j = n_j(1 + ik_j)$, $i = \sqrt{-1}$, $n_j, k_j, d_j, \theta_j, \lambda$ -

показник заломлення, показник поглинання, геометрична товщина, кут між променем, що падає на $(j+1)$ -ий шар, і нормаллю до площини розділу j -го та $(j+1)$ -го шарів, довжина хвилі відповідно. Оскільки для зменшення світлових втрат в оптичних елементах при просвітленні їх поверхонь використовуються матеріали з незначним поглинанням, то будемо вважати для полегшення моделювання $k_j=0$ і, відповідно, $N_j=n_j$. При цьому значення $p_j = N_j \cos \theta_j$ для

ТЕ хвилі (s -поляризація) і $p_j = \frac{N_j}{\cos \theta_j}$ для ТМ хвилі (p -поляризація).

Характеристична матриця однорідної k -шарової структури буде рівною:

$$M(\bar{n}, \bar{d}, \lambda) = M_k(n_k, d_k, \lambda) \cdot M_{k-1}(n_{k-1}, d_{k-1}, \lambda) \cdots M_2(n_2, d_2, \lambda) \cdot M_1(n_1, d_1, \lambda), \quad (2)$$

де M_j - характеристична матриця j -ого шару;

$\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k)$ - вектор значень показників заломлення;

$\bar{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_k)$ - вектор значень геометричної товщини;

λ - довжина хвилі.

Звідси легко знайти коефіцієнт пропускання даної k -шарової структури при заданих значеннях \bar{n} , \bar{d} та λ :

$$T = \frac{p_s}{p_0} |t|^2 = \frac{4}{\left(2 + \frac{p_0}{p_s} m_{11}^2 + \frac{p_s}{p_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (3)$$

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 .

Для встановлення основних закономірностей змін кутів та поляризаційних залежностей параметрів пропускання світла вузькосмуговими оптичними фільтрами розроблено відповідне програмне забезпечення.

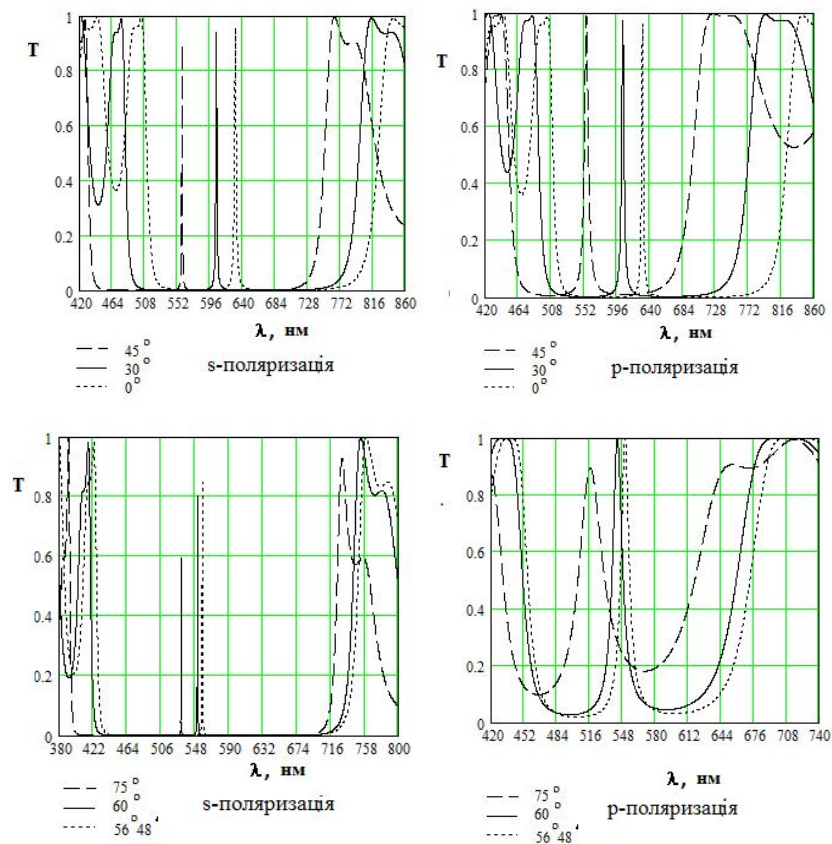


РИС. 2. Трансформація спектрів пропускання вузькосмугового фільтра з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм зі зміною кутів падіння.

Дослідження проведені для фільтрів, що знаходяться в зовнішньому середовищі із ($n_0 = 1$) та утворені БІС чередуванням шарів В з високим ($n_B = 2,3$) і Н 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 та 1000 нм.

Типовий характер зміни спектрів пропускання вузькосмугових 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 вузькосмугового фільтру з робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 630$ нм

Кути падіння, θ_0	Максимум пропускання T_{\max}	Положення максимуму пропускання λ_{\max} , нм	Півширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,5}$, нм	Десятична ширина смуги пропускання $\delta\lambda_{0,1}$, нм	Ширина короткохвильової області блокування $\Delta\lambda_K$, нм	Ширина довгохвильової області блокування $\Delta\lambda_D$, нм
0°	0,9587	630,00	2,47	7,57	108,30	170,16
s-поляризація						
30°	0,9404	604,32	1,56	4,83	114,13	174,12
45°	0,9056	577,87	0,88	2,78	120,56	177,67
56°29'	0,8475	556,70	0,49	1,61	126,29	180,32
60°	0,8198	550,66	0,40	1,34	128,05	181,10
75°	0,5960	530,29	0,12	0,58	134,75	184,74
р-поляризація						
30°	0,9738	603,68	3,60	10,98	98,27	142,20
45°	0,9910	574,88	5,82	17,77	84,24	109,87
56°29'	0,9999	550,13	9,51	29,82	67,57	76,87
60°	0,9983	542,73	11,24	36,18	60,99	64,11
75°	0,8938	516,35	26,32	-	8,66	-

З табл 1. видно, що для s-поляризації при збільшенні кута падіння світла максимальні значення пропускання T_{\max} поступово знижуються від 0,9587 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,5960 при $\theta_0 = 75^\circ$, при цьому положення λ_{\max} зміщується в короткохвильову область від 630,00 до 530,29 нм (див. також рис. 2.). Для р-поляризації максимум пропускання зростає від 0,9587 при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,9999 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 підкладки $n_s = 1,51$ при проходженні світла із зовнішнього середовища в підкладку), а потім знижується до 0,8938 при $\theta_0 = 75^\circ$, при цьому λ_{\max} значніше зміщується в короткохвильову область до 516,35 нм.

Півширина $\delta\lambda_{0,5}$ смуги пропускання для s-поляризації зменшується від 2,47 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,12 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а для р-поляризації вона зростає від 2,47 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 26,32 нм при $\theta_0 = 75^\circ$.

Десятична ширина $\delta\lambda_{0,1}$ для s-поляризації зменшується від 7,57 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 0,58 нм при $\theta_0 = 75^\circ$. Для р-поляризації вона зростає до 36,18 нм при $\theta_0 = 60^\circ$, а при $\theta_0 = 75^\circ$ повністю розширюється на спектральний діапазон. Крім того, майже при всіх кутах падіння світла півширина $\delta\lambda_{0,5}$ приблизно в три рази нижча за $\delta\lambda_{0,1}$ для обидвох поляризацій.

Ширина короткохвильової області блокування $\Delta\lambda_K$ пропускання світла для s-поляризації зростає від 108,30 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 134,75 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а для р-поляризації вона зменшується до 60,99 нм при $\theta_0 = 60^\circ$, а при $\theta_0 = 75^\circ$ такий інтервал складає лише 8.66 нм.

Ширина довгохвильової області блокування $\Delta\lambda_D$ пропускання світла для s-поляризації зростає від 170,16 нм при $\theta_0 = 0^\circ$ до 184,74 нм при $\theta_0 = 75^\circ$, а для р-поляризації вона зменшується до 64,11 нм при $\theta_0 = 60^\circ$, а при вищих кутах падіння пропускання стає вищим за 0,1. Крім того, для обох поляризацій та всіх кутів падіння $\Delta\lambda_D > \Delta\lambda_K$.

Табл.2. Трансформація максимумів та положень смуг пропускання вузькозонних інтерференційних фільтрів зі зміною робочої довжини хвилі.

θ_0	$\lambda_0 = 480$		$\lambda_0 = 630$		$\lambda_0 = 750$		$\lambda_0 = 1000$	
	T_{\max}	λ_{\max}	T_{\max}	λ_{\max}	T_{\max}	λ_{\max}	T_{\max}	λ_{\max}
0°	0,9587	480,00	0,9587	630,00	0,9587	750,00	0,9587	1000,00
s-поляризація								
30°	0,9404	460,43	0,9404	604,32	0,9404	719,43	0,9404	959,23
45°	0,9056	440,28	0,9056	577,87	0,9056	687,94	0,9056	917,25
$56^\circ 29'$	0,8476	424,15	0,8475	557,48	0,8475	662,73	0,8476	883,65
60°	0,8198	419,55	0,8198	550,66	0,8199	655,55	0,8199	874,07
75°	0,5959	404,03	0,5960	530,29	0,5963	631,30	0,5960	841,73
р-поляризація								
30°	0,9738	459,95	0,9738	603,68	0,9738	718,66	0,9738	958,22
45°	0,9910	438,01	0,9910	574,88	0,9910	684,39	0,9910	912,51
$56^\circ 29'$	0,9999	419,15	0,9999	550,13	0,9999	654,92	0,9999	873,23
60°	0,9983	413,51	0,9983	542,73	0,9983	646,11	0,9983	861,48
75°	0,8938	393,41	0,8938	516,35	0,8938	614,71	0,8938	819,61

Трансформацію параметрів смуг спектрів пропускання вузькозонних інтерференційних фільтрів зі зміною робочої довжини хвилі відображають результати, що приведені в таблицях 2-4.

Табл.3. Трансформація пів- та десятинної ширин смуг пропускання вузькозонних інтерференційних фільтрів зі зміною робочої довжини хвилі.

θ_0	$\lambda_0 = 480$		$\lambda_0 = 630$		$\lambda_0 = 750$		$\lambda_0 = 1000$	
	$\delta\lambda_{0,5}$	$\delta\lambda_{0,1}$	$\delta\lambda_{0,5}$	$\delta\lambda_{0,1}$	$\delta\lambda_{0,5}$	$\delta\lambda_{0,1}$	$\delta\lambda_{0,5}$	$\delta\lambda_{0,1}$
0°	1,88	5,77	2,47	7,57	2,94	9,02	3,92	12,02
s-поляризація								
30°	1,19	3,68	1,56	4,83	1,86	5,74	2,48	7,66
45°	0,67	2,11	0,88	2,78	1,05	3,30	1,39	4,40
56°29'	0,37	1,23	0,49	1,61	0,58	1,91	0,78	2,55
60°	0,30	1,02	0,40	1,34	0,47	1,60	0,63	2,13
75°	0,09	0,44	0,12	0,58	0,13	0,70	0,18	0,93
p-поляризація								
30°	2,74	8,36	3,60	10,98	4,40	13,06	5,71	17,42
45°	4,43	13,54	5,82	17,77	6,99	21,16	9,23	28,2
56°29'	7,24	22,72	9,51	29,82	11,32	35,5	15,09	47,33
60°	8,57	27,57	11,24	36,18	13,41	43,06	17,85	57,42
75°	20,06	-	26,32	-	35,61	-	41,79	-

Табл.4. Трансформація ширин смуг подавлення пропускання вузькозонних інтерференційних фільтрів зі зміною робочої довжини хвилі.

θ_0	$\lambda_0 = 480$		$\lambda_0 = 630$		$\lambda_0 = 750$		$\lambda_0 = 1000$	
	$\Delta\lambda_K$	$\Delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_K$	$\Delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_K$	$\Delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_K$	$\Delta\lambda_D$
0°	82,52	129,64	108,30	170,16	128,9	202,56	171,91	270,08
s-поляризація								
30°	86,96	132,66	114,13	174,12	135,8	207,28	181,16	276,3
45°	91,87	135,37	120,56	177,67	143,5	211,52	191,38	282,0
60°	96,21	137,39	126,29	180,32	150,3	214,67	200,46	286,2
56°29'	97,56	137,98	128,05	181,10	152,4	215,59	203,25	287,4
75°	102,67	140,77	134,75	184,74	160,4	219,94	213,88	293,2
p-поляризація								
30°	74,87	108,34	98,27	142,20	116,9	169,29	155,98	225,7
45°	64,18	83,71	84,24	109,87	100,2	130,79	133,72	174,4
56°29'	51,48	58,57	67,57	76,87	80,43	91,52	107,25	122,0
60°	46,47	48,84	60,99	64,11	72,62	76,32	96,81	101,7
75°	6,59	-	8,66	-	10,31	-	13,74	-

Із аналізу даних приведених в таблицях 1-4 результатів випливає, що: в області прозорості складових вузькосмугових інтерференційних фільтрів можливе досягнення максимуму пропускання вище за 95% для всіх робочих довжин хвиль; значення зміщень λ_{\max} в короткохвильову область зростають з ростом λ_0 ; пів- $\delta\lambda_{0,5}$ та десятична $\delta\lambda_{0,1}$ ширини смуг пропускання, а також ширини коротко- $\Delta\lambda_K$ та довгохвильових $\Delta\lambda_D$ областей блокування пропускання світла зростають з ростом λ_0 незалежно від їх змін з ростом кутів падіння θ_0 . Крім того, для обох поляризацій та всіх кутах падіння $\Delta\lambda_D > \Delta\lambda_K$.

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

- максимальні значення T_{\max} пропускання для s- поляризованого світла зменшуються, а для р-поляризованого – зростають до кута Брюстера, а потім зменшуються, причому залишаючись завжди вищими ніж для s- поляризованого світла;

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

- пів- $\delta\lambda_{0,5}$ та десятична $\delta\lambda_{0,1}$ ширини смуг пропускання для s- поляризованого світла зменшуються, а для р-поляризованого – зростають, залишаючись завжди вищими;

- ширини спектральних інтервалів $\Delta\lambda_K$ та $\Delta\lambda_D$ низького пропускання для s- поляризованого світла зростають, а для р-поляризованого – зменшуються.

Отримані залежності параметрів інтерференційних фільтрів є ідентичними для будь-яких використовуваних для їх виготовлення прозорих матеріалів підкладинок та високо- і низькозаломлюючих шарів.

1. *Путинин Э.С* Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СпбГУ, ИТМО, 2010. – 227с.
2. *McLeod H.A.* Thin-Film Optical filters. – AdaM Hilger. London 1985. – 386 p.
3. *Борисович Н.* Инфракрасные фильтры. – Минск: Наука и техника, 1971.
4. *Глебов В., Малютин А., Якунин В.* // ОМП. – 1992. – 4. – С. 56–58.
5. *Фирцак Ю., Довгошей Н., Шарков В. и др.* // ОМП. – 1983. – 8 – С. 48–52.
6. *Fekeshgazi I., Pervak V., Pervak Yu.* // Sem. Phys. Quant. Elect. Optoelect. – 2000. – 3. – P. 371–378.
7. *Яковлев П.П., Мешков Б.Б.* Проектирование интерференционных покрытий. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
8. *Крылова Т.Н.* Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
9. *Фурман Ш.А.* Тонкослойные оптические покрытия / Ш.А.Фурман. - Л.: Машиностроение, 1977. - 264с.

10. *Furman Sh.*. Basics of optics of multiplayer systems / Sh.Furman., A.V. Tikhonravov – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.

Отримано 04.03.2014

В.І. Пецко, А.В. Мица, І.В. Фекешгазі

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗКОПОЛОСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

В работе приведены обобщенные изменения параметров спектров пропускания многослойных интерференционных структур (БИС) узкополосных оптических фильтров в зависимости от поляризации и угла падения параллельных потоков излучения относительно нормали к их поверхности. Полученные результаты особенно актуальны для определения эффективности использования сходимости или расхождения потоков излучения в оптических системах при наличии БИС.

V.I. Petcko, O.V.Mitsa, I.V. Fekeshtazi

MODELING SPATIAL-POLARIZATION PARAMETER SPECTRAL CHARACTERISTIC OF INTERFERENCE OPTICAL FILTER

The paper presents the generalized change the transmission spectra of multilayer interference structures (MIS) narrow-band optical filters, depending on the angle of incidence and polarization of the radiation fluxes parallel to the normal to the surface. The obtained results are particularly relevant for determining the efficiency of convergence or divergence of the radiation fluxes in optical systems in the presence of BIS.

Про авторів:

Пецко Василь Іванович,

аспірант кафедри кібернетики та прикладної математики Ужгородського національного університету

E-mail: petsko.vi@gmail.com

Мица Олександр Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних управляючих систем і технологій Ужгородського національного університету

E-mail: alex.mitsa@gmail.com

Фекешгазі Іштван Вінцесвич,

доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу нелінійних оптичних систем Інституту фізики напівпровідників імені В. С. Лашкарьова НАН України

E-mail: fek_i@yahoo.com