

PHYSICS

Пецько В., Міца О., Боркач Є.

Проектування просвітлюючих покриттів з невеликого числа шарів при падінні світла під кутом

Пецько Василь Іванович, аспірант

Міца Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики та прикладної математики

Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Боркач Євгеній Ілліч, кандидат фізико-математичних наук, доцент, проректор Закарпатський угорський інститут імені Ференца Ракоці II, м. Берегово, Україна

Анотація. Розраховано оптимальні параметри одно-, два-, три- та чотиришарових однорідних просвітлюючих структур та проведено їх порівняльний аналіз.

Ключові слова: просвітлююче покриття, оптимізація структури, матричний метод

Вступ. Останнім часом помітно зріс інтерес до технічного застосування багат шарових інтерференційних систем і фільтрів оптичних структур, що викликало швидкий розвиток цієї галузі фізичної оптики, що стосується відбивання, пропускання і поглинання світла в одношарових або багат шарових тонкоплівкових системах. Оптичні багат шарові покриття використовуються в оптичних системах космічної техніки, оптичному приладобудуванні, інтегральній оптиці, рентгенівській та нейтронній спектроскопії, електродинаміці відкритих систем, при створенні генераторів і перетворювачів електромагнітного та інших випромінювань, в апаратурі контролю забруднення навколишнього середовища і т.д. Особливий інтерес викликають просвітлюючі оптичні покриття, зроблені з невеликого числа шарів [1-3].

Методи розрахунків. Для розрахунку спектральних характеристик оптичних багат шарових покриттів будемо використовувати матричний метод Абеде [3]. Цільову функцію багат шарового покриття представимо у вигляді [4]:

$$\Omega(\lambda_2 / \lambda_1) = \max_{\vec{n}, \vec{d}} F(\vec{n}, \vec{d}) = \max_{\vec{n}, \vec{d}} \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T^2(\vec{n}, \vec{d}, \lambda_{(i)}) \right)^{1/2}, \quad (1)$$

де T – коефіцієнт пропускання, залежний від вектора значень показників заломлення $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_k)$, вектора значень геометричної товщини $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_k)$ та довжини хвилі λ , L – число точок сітки спектрального інтервала від λ_1 до λ_2 , при рівномірному його розподілі з кроком $\Delta\lambda$:

$$L = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\lambda} + 1. \quad (2)$$

При дослідженні вибирались значення $1.35 \leq n_j \leq 2.6$,

$50 \text{ нм} \leq d_j \leq 750 \text{ нм}$ ($j = \overline{1, N}$), $N = 1, 2, 3, 4$.

Результати та їх обговорення. Оптимізуємо параметри одно-, дво-, три- та чотиришарового покриття

на спектральному інтервалі від 200 до 700 нм при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. В якості підкладки візьмемо скло з показником заломлення $n = 1,51$. За допомогою г-алгоритму [4], спочатку знаходимо оптимальні параметри функціоналу (1), а далі підбираємо показники заломлення реальних матеріалів, які найближче до отриманих теоретичних результатів. Після цього фіксуємо показники заломлення і оптимізуємо товщини шарів.

Розглянемо одношарове покриття, при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. Після проведення обчислень для s-поляризації отримаємо оптичне покриття, для якого шар товщиною $d_1 = 74.945$ нм складається з матеріалу Na_3AlF_6 , показник заломлення якого $n_1 = 1,35$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9740529. Причому при $\lambda = 376$ нм отримаємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9854454$, а при $\lambda = 200$ нм отримаємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9420194$ (рис. 1).

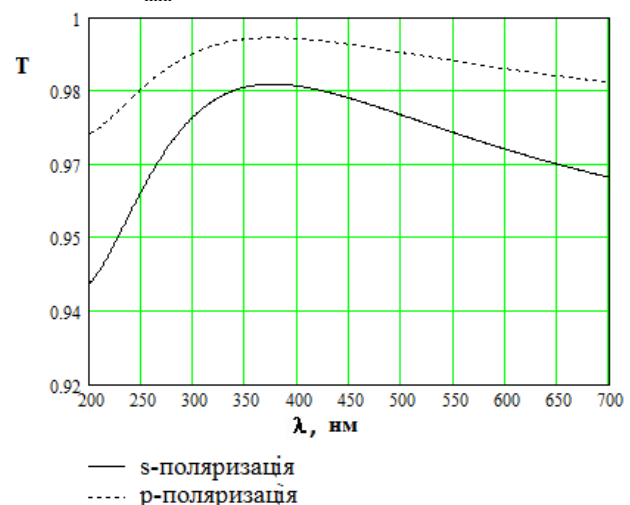


Рис. 1. Криві коефіцієнтів пропускання для одношарового покриття при кутові $\theta_0 = 30^\circ$.

Для р-поляризації при падінні світла була спроектована наступна одношарова оптична структура: для

шару взято Na_3AlF_6 з показником $n_1 = 1,35$ товщиною $d_1 = 74,645$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9901028. Причому при $\lambda = 374$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9955420$, а при $\lambda = 200$ отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9746879$. З рисунку 1 видно, що на всьому спектральному інтервалі для s-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів менше ніж для р-поляризації.

Розглянемо двошарове покриття, при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. Після проведення обчислень для s-поляризації отримуємо оптичне покриття з наступною структурою: перший шар товщиною $d_1 = 145,254$ нм з матеріала Al_2O_3 , показник заломлення якого $n_1 = 1,63$, другий – матеріал Na_3AlF_6 з показником заломлення $n_2 = 1,35$ та товщиною $d_2 = 73,413$ нм. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9773440. Причому при $\lambda = 334$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9974588$, а при $\lambda = 200$ нм отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9281729$ (рис. 2).

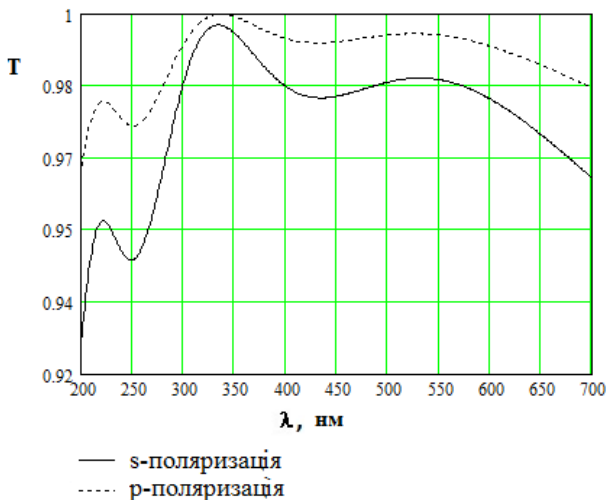


Рис. 2. Криві коефіцієнтів пропускання для двошарового покриття при кутові.

Для р-поляризації при падінні світла була спроектована наступна двошарова оптична структура. Для першого шару взято SiO_2 з показником заломлення $n_1 = 1,6$ товщиною $d_1 = 149,475$, для другого Na_3AlF_6 з показником $n_2 = 1,35$ товщиною $d_2 = 72,873$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,99105169. Причому при $\lambda = 336$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9994164$, а при $\lambda = 200$ отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9685197$. З рисунку 2 видно, що на всьому спектральному інтервалі для р-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів більше ніж для s-поляризації.

Розглянемо тришарове покриття, при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. Після проведення обчислень для s-поляризації отримуємо оптичне покриття з наступ-

ною структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1,7$ товщиною $d_1 = 95,703$ нм, другий – матеріал SiO_2 з показником заломлення $n_2 = 1,6$ та товщиною $d_2 = 50,000$ нм, третій – Na_3AlF_6 з показником $n_3 = 1,35$ товщиною $d_3 = 68,719$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9807555. Причому при $\lambda = 323$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9963507$, а при $\lambda = 200$ нм отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,93919162$ (рис. 3).

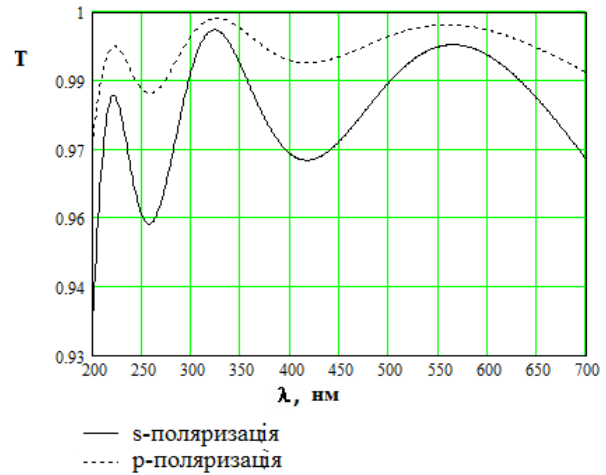


Рис. 3. Криві коефіцієнтів пропускання для тришарового покриття при кутові $\theta_0 = 30^\circ$.

Для р-поляризації при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$ була спроектована наступна тришарова оптична структура. Для першого шару взято Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1,65$ товщиною $d_1 = 100,410$, для другого PbTe з показником заломлення $n_2 = 1,57$ товщиною $d_2 = 50,000$, для третього Na_3AlF_6 з показником $n_3 = 1,35$ товщиною $d_3 = 68,788$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9927670. Графік коефіцієнта пропускання для р-поляризації показано на рис. 3. Причому при $\lambda = 325$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9987641$, а при $\lambda = 200$ отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9747135$. Так як і для одно- та двошарового покриття для тришарового на всьому спектральному інтервалі для s-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів менше ніж для р-поляризації.

Розглянемо чотиришарове покриття, при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. Після проведення обчислень для s-поляризації отримуємо оптичне покриття з наступною структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1,7$ товщиною $d_1 = 51,356$ нм, другий – матеріал HfO_2 з показником заломлення $n_2 = 1,98$ товщиною $d_2 = 80,122$ нм, третій – Al_2O_3 з показником заломлення $n_3 = 1,68$ товщиною $d_3 = 50,000$ нм, четвертий – Na_3AlF_6 з показником $n_4 = 1,35$ товщиною $d_4 = 65,022$. Значення цільової

функції (1) дорівнює 0,9861392. Причому при $\lambda = 602$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,9984755$, а при $\lambda = 200$ нм отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9382722$ (рис. 4).

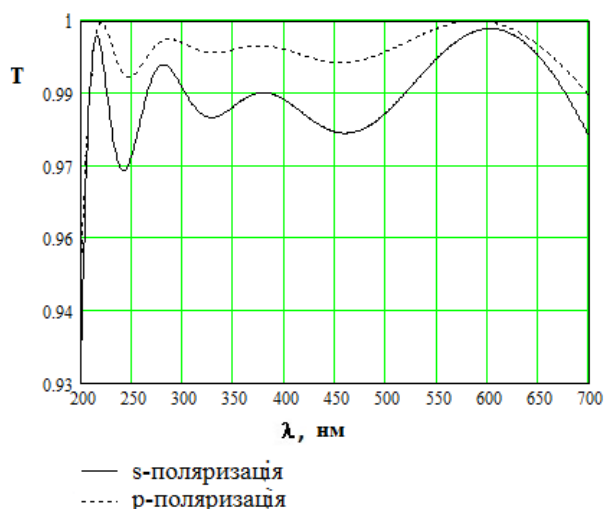


Рис. 4. Криві коефіцієнтів пропускання для чотиришарового покриття при куті $\theta_0 = 30^\circ$.

Розглянемо тришарове покриття, при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. Після проведення обчислень для s-поляризації отримуємо оптичне покриття з наступною структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1.7$ товщиною $d_1 = 95,703$ нм, другий – матеріал SiO_2 з показником заломлення $n_2 = 1.45$ товщиною $d_2 = 100,000$ нм, третій – матеріал Al_2O_3 з показником заломлення $n_3 = 1.7$ товщиною $d_3 = 95,703$ нм. Для р-поляризації при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$ була спроектована наступна чотиришарова оптична структура. Для першого шару взято Al_2O_3 з показником

заломлення $n_1 = 1.69$ товщиною $d_1 = 51,624$, для другого HfO_2 з показником заломлення $n_2 = 1,98$ товщиною $d_2 = 83,505$, для третього Al_2O_3 з показником заломлення $n_3 = 1.67$ товщиною $d_3 = 50,000$ для четвертого Na_3AlF_6 з показником $n_4 = 1,35$ товщиною $d_4 = 63,733$. Значення цільової функції (1) дорівнює 0,9943578. Графік коефіцієнта пропускання для р-поляризації показано на рис. 4. Причому при $\lambda = 587$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max} = 0,99999$, а при $\lambda = 200$ отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min} = 0,9551313$. Отже, на всьому спектральному інтервалі для р-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів більше ніж для s-поляризації незалежно від кількості шарів.

Таблиця 1. Значення цільової функції при проектуванні

Кількість шарів	s-поляризація	p-поляризація
1	0,9740529	0,9901028
2	0,9773440	0,9910516
3	0,9807555	0,9927670
4	0,9861392	0,9943578

Для s- і р-поляризацій значення цільової функції представлено в (табл. 1).

Висновки. Для s- і р-поляризацій значення цільової функції зростає із збільшенням кількості шарів. Криві коефіцієнтів пропускання при збільшенні кількості шарів поводитья більш рівномірніше для обох поляризацій. Отримані одно-, дво-, три- та чотиришарового покриття можна реалізувати і використовувати на практиці.

ЛІТЕРАТУРА (REFERENCES TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Яковлев П.П. Проектирование интерференционных покрытий / П.П Яковлев, Б.Б. Мешков – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
Yakovlev P.P. Proyektirovaniye interferentsionnykh pokrytiy [Designing interference coatings] / P.P Yakovlev, B.B. Meshkov – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 192 s.
2. Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
Putilin E.S. Opticheskiye pokrytiya. Uchebnoye posobiye. [Optical coatings. Textbook] – SPb: SPbGU ITMO, 2010. – 227 s.
3. Furman, Sh., Tikhonravov, A. Basics of Optics of Multilayer Systems, Atlantica Séguier Frontières, 1992, 242 p.
4. Шор Н.З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1979. – 199 с.
Shor N.Z. Metody minimizatsii nedifferentsiruyemykh funktsiy i ikh prilozheniya [Techniques to minimize the non-differentiable functions and their applications]. – Kiyev: Naukova dumka, 1979. – 199 s.

Пецко В., Мица А., Боркач Е. Проектирование просветляющих покрытий из небольшого числа шаривпры падении света под углом

Аннотация. Рассчитаны оптимальные параметры одно-, двух-, трех- и четырехслоевых однородных просветляющих структур и проведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: просветляющее покрытие, оптимизация структуры, матричный метод

Petsko V., Mica O., Borkach E. Design of antireflection coatings of a small number of layers at the incidence of light in angle
Annotation. There was designed optimal parameters of one-, two-, tree- and four layered antireflective structure and comparison of their characteristics was done.

Keywords: antireflective coatings, optimization of structure, matrix method