

Пецько Василь Іванович, аспірант

Міца Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент
кафедра 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 матеріала 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).

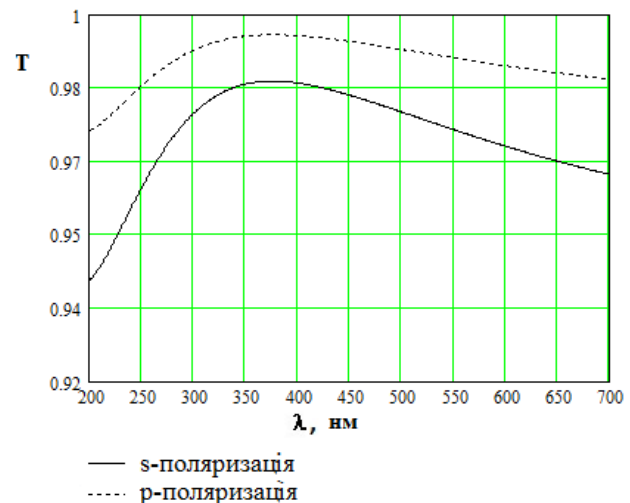


Рис. 1. Криві коефіцієнтів пропускання для одношарового покриття при кутові $\theta_0 = 30^\circ$.

Для p-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).

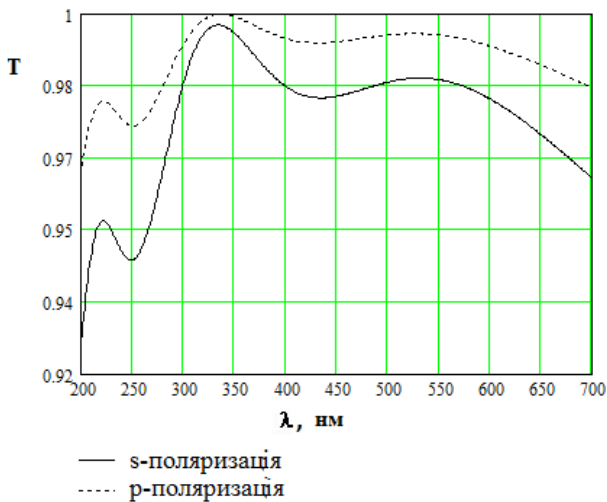


Рис. 2. Криві коефіцієнтів пропускання для двошарового покриття при кутові.

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).

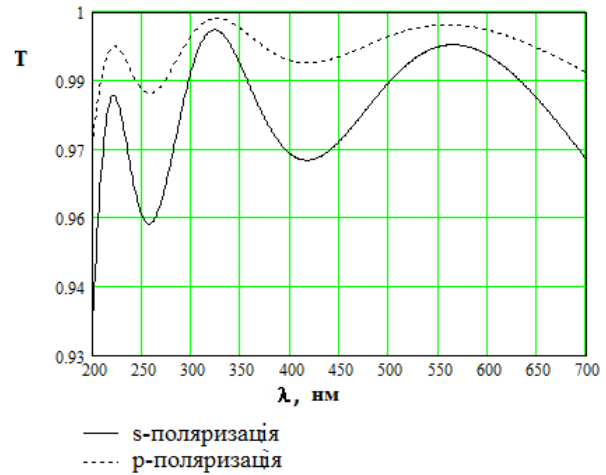


Рис. 3. Криві коефіцієнтів пропускання для тришарового покриття при кутові $\theta_0 = 30^\circ$.

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).

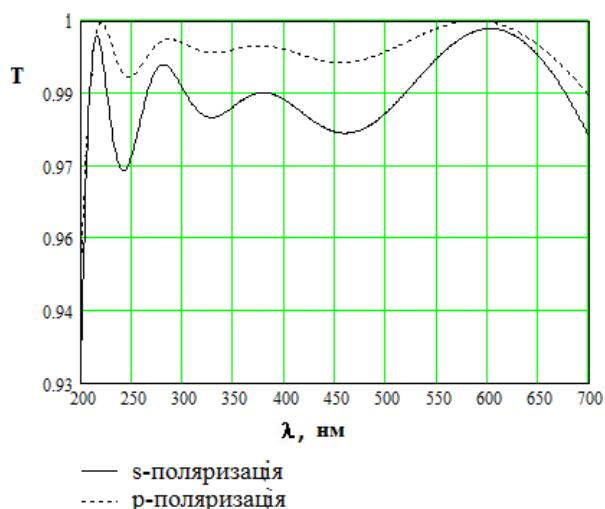


Рис. 4. Криві коефіцієнтів пропускання для чотиришарового покриття при кутові $\theta_0 = 30^\circ$.

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)

- 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.
- 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.
- Furman, Sh., Tikhonravov, A. Basics of Optics of Multilayer Systems, Atlantica Séguier Frontières, 1992, 242 p.
- 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 шаров при падении света под углом

Аннотация. Рассчитаны оптимальные параметры одно-, двух-, трех- и четырехслойных 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-, three- and four layered antireflective structure and comparison of their characteristics was done.

Keywords: antireflective coatings, optimization of structure, matrix method