

Проектування просвітлюючих оптичних покриттів для широкого спектрального діапазону при падінні світла під кутом

О. Міца^{1*}, В. Пецко¹, Н. Боркач², О. Кондрат³, Д. Сорока¹

¹Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна,

²Закарпатський угорський інститут ім. Ференц Ракоці II, м. Берегово, Україна

³Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

Corresponding author. E-mail: alex.mitsa@gmail.com

Paper received 14.03.20; Accepted for publication 26.03.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-233VIII28-08>

Анотація. Спроековано двошарові та тришарові оптичні покриття, які просвітлюють підкладку з показником заломлення $n_s=1,51$ при падінні світла під кутом на широких спектральних діапазонах для s- та p-поляризацій. При проведенні розрахунків використовувався метод багатовимірної пошуку r-алгоритм.

Ключові слова: r-алгоритм, оптичні просвітлюючі покриття, оптимізація, падіння світла під кутом.

Вступ. Математичне моделювання є основою вивчення більшості сучасних технічних проблем і розвитку багатьох сучасних інноваційних технологій. Важливим об'єктом дослідження, що вимагає застосування методів математичного моделювання, є оптичні шаруваті структури. Такі структури, створювані шляхом напилення тонких діелектричних шарів, знаходять широке застосування в сучасних оптичних пристроях, пов'язаних з вивченням і формуванням оптичного випромінювання, а також в таких областях високих технологій, як лазерна техніка, оптоелектроніка, телекомунікації [1]. Відомо використання оптичних структур в різноманітних системах: у задачах екологічного контролю, модернізації температурних сенсорів, високочутливих пристроїв для отримання термічного зображення, наприклад зображення відбитків пальців людини тощо. Вони є практично незамінними в галузі телекомунікацій, оскільки ма-

ють унікальні у своєму роді якості, що відповідають чітким вимогам оптичних комунікаційних систем. Першочерговим завданням при конструюванні таких структур залишається забезпечення максимальної селективності та експлуатаційної надійності таких структур під час використання мінімальної кількості тонкоплівкових шарів у структурах [2].

Метою даної роботи є дослідити структури дво- та тришарових покриттів, які б ефективно просвітлювали підкладку-скло при падінні світла під кутом в широкому спектральному діапазоні.

Методика розрахунків. Для розрахунку спектральних характеристик оптичних багатошарових покриттів будемо використовувати матричний метод [3]. Цільову функцію для просвітлюючого покриття будемо задавати у вигляді [4]:

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

де T – коефіцієнт пропускання, залежний від вектора значень показників заломлення $\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k)$, вектора значень геометричної товщини $\bar{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_k)$ та довжини хвилі λ , L – число точок сітки спектрального інтервалу від λ_1 до λ_2 , при рівномірному його розподілі з кроком $\Delta\lambda$:

$$D = \{ \mathbf{x} \mid n_{j \min} \leq n_j \leq n_{j \max}, \quad d_{j \min} \leq d_j \leq d_{j \max}, \quad j = \overline{1, m} \}. \quad (3)$$

Обмеження на показники заломлення шарів пов'язані з наявністю плівкоутворюючих матеріалів, які використовуються при виготовленні покриття. Нижнє обмеження на товщину шарів може бути пов'язане з необхідністю отримання суцільних плівок на підкладках, що мають мікронерівності поверхні, або з обмеженнями за чутливістю використовуваної контрольної виміральної апаратури. Реально $d_{j \min}$ становить 50 нм. Верхнє обмеження зазвичай пов'язане з вимогами

механічної стійкості шарів. Як правило, оптичну товщину шару вибирають не більшою, ніж λ_0 . Таким чином, при машинному конструюванні покриттів на відміну від аналітичних методів обмеження на параметри шарів враховують уже на етапі формулювання задачі.

Обмеження (3) можна легко виключити використовуючи прийом [5], який полягає у використанні нової змінної \mathbf{Z} , що пов'язана з \mathbf{X} співвідношенням виду

$$x_j = x_{j \min} + (x_{j \max} - x_{j \min}) \sin^2 z_j \quad (4a)$$

або

$$x_j = \frac{x_{j \max} z_j^2 + x_{j \min}}{z_j^2 + 1}, \quad j = \overline{1, 2m}. \quad (4b)$$

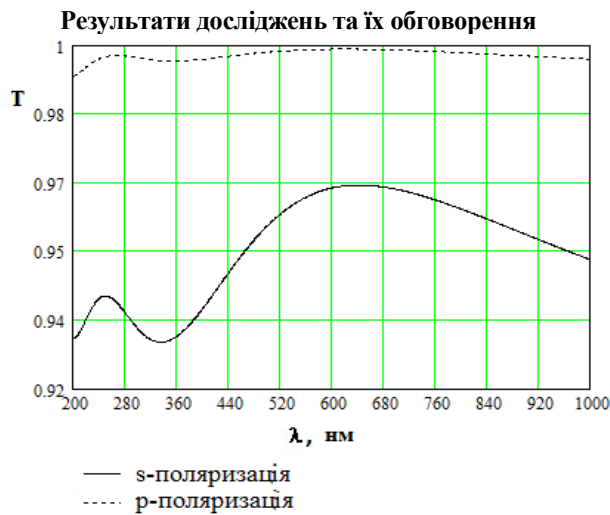


Рис. 1. Криві коефіцієнтів пропускання двошарового покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 45^\circ$

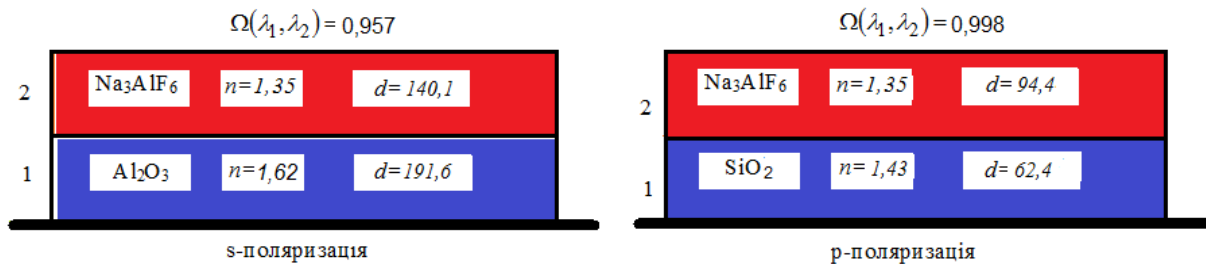


Рис. 2. Спроектвані двошарові оптичні покриття для просвітлення підкладки-скла при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$

Для р-поляризації при падінні світла оптимальною виявилась наступна двошарова оптична структура (рис. 2). Для першого шару взято матеріал SiO_2 , який має показник заломлення $n_1=1,43$ та наноситься плівка з геометричною товщиною $d_1=62,4$ нм, другий шар напильється з матеріалу Na_3AlF_6 з показником заломлення $n_2=1,35$ і повинен мати геометричну товщину $d_2=94,4$ нм. Значення цільової функції (1) рівне 0,998. Причому при $\lambda=618$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,999$, а при $\lambda=200$ нм отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min}=0,993$. Із рисунку 1 видно, що на всьому спектральному діапазоні коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів має більші значення для р-поляризації, ніж для s-поляризації.

Функціонал (1) для двошарової структури при падінні світла під кутом $\theta_0=55^\circ$, маючи праву границю в межах 850 до 1200 нм при s-поляризації після оптимізації показує практично незмінний результат в околі значення значення 0,930. При р-поляризації так само значення функціоналу практично не змінюється і тримається в околі значення 0,999. При падінні світла під кутом $\theta_0=60^\circ$ для правих границь в межах 850 до 1200 нм при s-поляризації від 850 до 1200 нм значення функціоналу практично не змінюється і тримається в околі значення 0,908, а при р-поляризації значення функціоналу тримається в околі значення 0,997. Відмітимо важливий факт: спроектовані двошарові оптичні покриття для просвітлення підкладки-скла при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$ показують також ефективні результати просвітлення і при падінні світла під кутами $\theta_0=50^\circ$ та $\theta_0=60^\circ$.

За допомогою метод багатовимірного пошуку г-алгоритму [6] спочатку знаходимо оптимальні параметри функціоналу (1), а далі підбираємо показники заломлення реальних матеріалів, які ближчі до отриманих теоретичних результатів. Після цього фіксуємо показники заломлення та оптимізуємо товщини шарів[7].

Розглянемо можливості просвітлення двошаровим покриттям підкладки-скла в широкому спектральному діапазоні при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$ (рис. 1). Після проведення обчислень для s-поляризації отримуємо оптичне покриття, яке має наступну структуру: перший шар товщиною $d_1=191,6$ нм з матеріалу Al_2O_3 , показник заломлення якого $n_1=1,62$, другий шар напильється з матеріалу Na_3AlF_6 , який має показник заломлення $n_2=1,35$ і геометрична товщина його становить $d_2=140,1$ нм. Значення цільової функції (1) рівне 0,957 (рис. 2). Причому при $\lambda=218$ нм отримуємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,993$, а при $\lambda=348$ нм отримуємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\min}=0,859$.

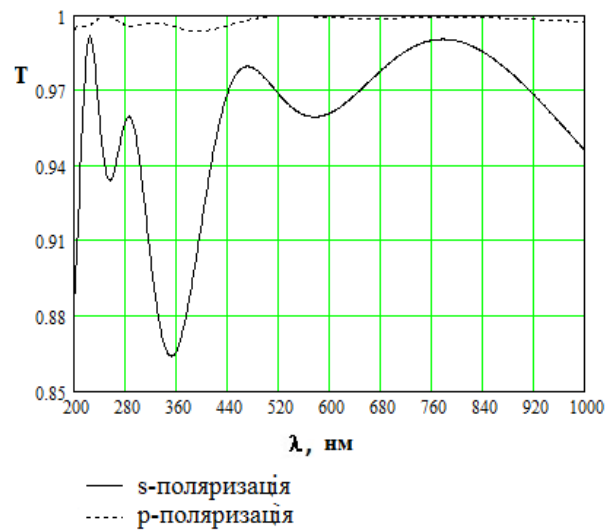


Рис. 3. Криві коефіцієнтів пропускання тришарового покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 45^\circ$

Розглянемо можливості просвітлення тришаровим покриттям підкладки-скла в широкому спектральному діапазоні при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$ (рис. 3). Після проведення обчислювального експерименту для s-поляризації отримуємо оптичне покриття з наступною структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1=1,7$ та геометричною товщиною $d_1=175,1$ нм, другий шар складатиметься з матеріалу SiO_2 , який має показник заломлення $n_2=1,43$ та потрібно напилити плівку з геометричною товщиною $d_2=59,7$ нм, третій шар напильється з матеріалу Na_3AlF_6 , який має показ-

ник заломлення $n_3=1,35$ та оптимальною для нього буде геометрична товщина $d_3=83,0$ нм. Значення цільової функції (1) рівне 0,959. Причому при $\lambda=224$ нм

отримаємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,991$, а при $\lambda=352$ нм отримаємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,864$.

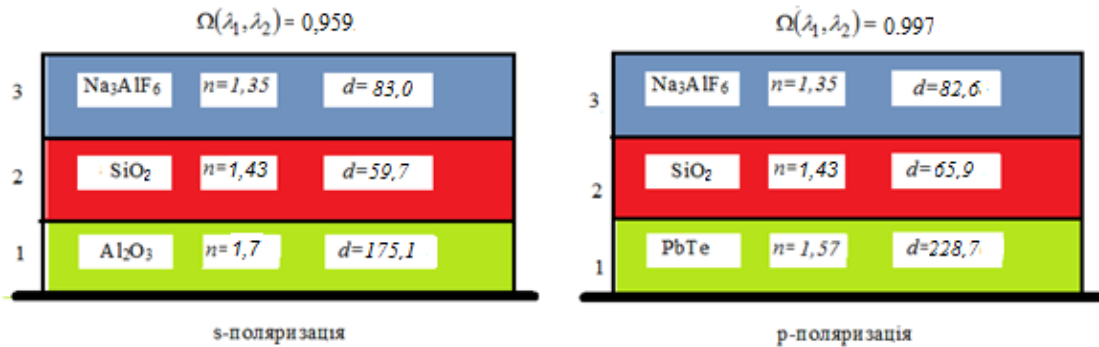


Рис. 4. Спроектвані тришарові оптичні покриття для просвітлення підкладки-скла при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$

Для р-поляризації, при падінні світла під кутом $\theta_0=45^\circ$ була спроектована наступна тришарова оптична структура (рис. 4). Для першого шару взято матеріал РbТе з показником заломлення $n_1=1,57$ та геометричною товщиною $d_1=228,7$ нм, для другого шару використовуємо матеріал SiO_2 з показником заломлення $n_2=1,43$ та геометричною товщиною $d_2=65,9$, для третього шару використаємо матеріал Na_3AlF_6 , який має показник заломлення $n_3=1,35$ та оптимальною для нього буде геометрична товщина $d_3=82,6$. Значення цільової функції (1) рівне 0,997. Причому при $\lambda=249$ нм отримаємо максимум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,999$, а при $\lambda=393$ нм отримаємо мінімум коефіцієнта пропускання $T_{\max}=0,993$. Із рисунку 3 видно, що як і для двошарової структури для трьохшарової структури на всьому спектральному діапазоні коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів має більші значення для s-поляризації, ніж для р-поляризації.

Розглянемо поведінку функціоналу (1) для інших кутів падіння. Для кута падіння $\theta_0=50^\circ$ при збільшенні правої границі λ_2 від 400 до 600 нм для s-поляризації значення функціоналу спадає стрімкіше від 0,987 до 0,961, ніж при збільшенні правої границі λ_2 від 600 до 1200 нм – від 0,961 до 0,948. Для р-поляризації графік функціоналу наближається до прямої, значення функціоналу при збільшенні правої границі λ_2 від 400 до

1200 нм становить 0,999. Для кута $\theta_0=55^\circ$ при s-поляризації функціонал при збільшенні правої границі λ_2 від 400 до 600 нм стрімко спадає від 0,984 до 0,950, а при збільшенні правої границі λ_2 від 600 до 1200 нм значення функціоналу спадає повільніше – від 0,950 до 0,933. Для р-поляризації графік функціоналу наближається до прямої так само, як і при падінні світла під кутом $\theta_0=50^\circ$. При збільшенні правої границі λ_2 від 400 до 1200 нм значення функціоналу становить 0,999. При падінні світла під кутом $\theta_0=60^\circ$ при s-поляризації функціонал, при збільшенні правої границі λ_2 від 400 до 600 нм, спадає від 0,976 до 0,932, а при збільшенні правої границі λ_2 від 600 до 1200 нм, значення функціоналу спадає повільніше до 0,911. При р-поляризації простежується спадання функціоналу при збільшенні правої границі λ_2 від 400 до 500 нм від 0,999 до 0,997 відповідно. При подальшому збільшенні правої границі λ_2 до 1200 нм значення функціоналу спадає до 0,996.

Висновки. Спроектвані тришарові оптичні покриття є ефективним для просвітлення підкладки-скла при падінні світла під кутами $\theta_0=50^\circ$, $\theta_0=55^\circ$ та $\theta_0=60^\circ$.

Розраховані двошарові та тришарові оптичні покриття можна реалізувати та використовувати на практиці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яковлев, П. П., & Мешков, Б. Б. (1987). Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение. – 185 с.
2. Міца, В. М., Феєр, О., Голомб, Р. М., Ткач, В., Іванда, М., Міца, О. В., & Петрецький, С. В. (2019). Взаємозв'язок низькотемпературних аномалій теплопровідності та низькочастотних Раман спектрів широкозонних халькогенідних стекел для оптичних покриттів силової оптики. Ужгород: ТОВ «РІК-У». -152с.
3. Sh, Furman, & Tikhonravov, A. V. (1992). Basics of optics of multilayer systems. Editions Frontiers, Gif-sur Yvette. -242 p.
4. Stetsyuk, P. I., & Mitsa, A. V. (2005). Parameter Optimization Problems for Multilayer Optical Coatings. Cybernetics and Systems Analysis, 41(4), 564-571.
5. Мица А.В., Стецюк П.И. (2010).Использование г-алгоритма для оптимизации трех оптических многослойных покрытий // Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale. – Chisinau, – С. 100-108.
6. Шор, Н. Ц. (1979). Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. Наук. думка. - 200 с.
7. Міца О.В., Пецько В.І., Стецюк В.І. (2017) Двоетапний метод для синтезу багатошарових оптичних систем // Комп'ютерна математика. № 1. – С. 73-82.

Designing anti-reflective optical coatings for a wide spectral range at a different angle of light incidence

O. Mitsa, V. Petsko, N. Borkach, O. Kondrat, D. Soroka

Abstract. Two- and three-layers anti-reflective optical reducing the reflection of substrate with a refractive index of $n_s = 1.51$ were designed for the incident light angle variation on the wide spectral range for s- and p-polarizations. The method of multidimensional search r-algorithm is used for calculations.

Keywords: r-algorithm, optical anti-reflection coatings, optimization, light incidence at an angle.