

# МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРІДНИХ ПЛІВОК ПРИ ЛІНІЙНОМУ РОЗПОДІЛІ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ

О.В. Міца

Ужгородський національний університет,  
вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000  
e-mail: mitsa@univ.uzhgorod.ua

Проведено оптимізацію спектральних характеристик неоднорідних плівок з лінійним розподілом показника заломлення на підкладках з показниками заломлення 1.51 та 4. Встановлено, що ефект просвітлення підкладки будь-яким неоднорідним шаром менший, ніж у випадку нанесення однорідного шару з показником заломлення 1.35. Протилежна ситуація спостерігається для високозаломлюючих підкладок з  $n_s=4$ . Шляхом співставлення результатів розрахунків на основі використання великого числа методів багатовимірної оптимізації, виходячи з критерію тривалості розрахунків, одержаного середньоквадратичного значення пропускання, рекомендовано кращі методи оптимізації параметрів неоднорідних плівок. Результати розрахунків параметрів неоднорідних плівок, одержаних на основі методів багатовимірної оптимізації, співставлено з даними розрахунків на основі математичної системи MatCAD 8.0.

Використання неоднорідних плівок для створення оптичних і інтегрально-оптичних елементів є актуальним прикладним завданням в оптичному приладобудуванні і інтегральній оптиці [1, 2]. Однак теоретичні основи розрахунків характеристик плівок в області оптики неоднорідних покриттів розроблено недостатньо [2]. Використовуючи методи багатовимірної оптимізації, можна визначити оптимальні параметри для плівок різного типу неоднорідності і дати оцінку даній структурі з точки зору ефективності просвітлення в різних спектральних ділянках і на різних підкладках. Метою даної роботи було моделювання впливу лінійного розподілу показника заломлення в неоднорідній плівці на низько- і високозаломлюючій підкладці на спектральні характеристики структури.

Спектральні характеристики структури будемо розраховувати використовуючи матричний метод [2–5]. Лінійна неоднорідність реалізовується розбиттям шару на  $m$  рівних частин [3], показники заломлення в яких змінюються за лінійним законом  $n - \frac{z}{m-1} \cdot (i-1)$ , де  $n$  – значення показника заломлення першого розбитого шару,  $z$  – значення, на яке зміниться показник заломлення на межі з підкладкою,  $i$  – номер розбитого шару.

Характеристична матриця неоднорідної плівки [1] буде рівною

$$M_{\text{неодн.}}(n, d, \lambda) = \prod_{i=1}^m M\left(n - \frac{z}{m-1} \cdot (i-1), \frac{d}{m}, \lambda\right),$$

де  $M$  – характеристична матриця одного шару;  $d$  – геометрична товщина неоднорідної плівки;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Функціонал, який ми будемо оптимізувати, буде рівний

$$F(n, d) = \left( \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1 + 1} \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} T^2(n, d, \lambda) \right)^{1/2},$$

де  $(\lambda_1, \lambda_2)$  – розглядуваний спектральний інтервал.

При розв’язанні цієї задачі ми брали  $m=10$ ,  $d \in (1000 \text{ \AA}, 7500 \text{ \AA})$ ,  $z = -1, -0.9, \dots, 1$ ,  $\lambda \in (10000 \text{ \AA}, 30000 \text{ \AA})$ ,

$$n = \begin{cases} \text{від } (1.35 + z) \text{ до } (3.6 + z), & \text{якщо } z > 0 \\ \text{від } 1.35 \text{ до } (3.6 - z), & \text{якщо } z < 0 \end{cases}$$

$$F(n, d) = \left( \frac{1}{201} \sum_{i=0}^{200} T^2(n, d, 10000 + 100 \cdot i) \right)^{1/2}.$$

Для знаходження оптимальних параметрів неоднорідної плівки було випробувано 11 методів багатовимірної оптимізації, серед яких методи найскорішого спуску, конфігурації (Хука–Дживса), Розенброка, Девідона–Флетчера–Пауелла, Гольдфарба, Фіакко–Мак–Кормика, Грінстадта, випадкового пошуку [2, 6]. Для знаходження оптимальних параметрів також використовувалась математична система MatCAD 8.0.

Виходячи з критерію часу розрахунків і величини середньоквадратичного значення пропускання структури (функціоналу) в максимумі, найефективнішим виявився метод конфігурацій (Хука–Дживса) [2, 6]. Для знаходження оптимальних параметрів в залежності від початкових значень та значень  $n_0, n_s, z$  він затратує до 17 секунд. В таблиці 1 наведено порівняльну характеристику за часом знаходження оптимальних параметрів різними методами, а також дані розрахунків на основі використання матема-

тичної системи MatCAD 8.0. За початкові дані вибирались значення  $n=1.87$ ,  $d=2494$ , коефіцієнт  $z$  рівний 0.5. Точність, з якою обчислювались результати становила для показника заломлення  $10^{-4}$  та для геометричної товщини  $10^{-1}$ .

Таблиця 1. Час знаходження різними методами оптимальних параметрів неоднорідного шару.

Метод	Час знаходження
Конфігурацій (Хука–Дживса)	12 секунд
Фіакко – Мак–Кормика	15 секунд
Девідона–Флетчера–Пауелла	27 секунд
Гольдфарба	35 секунд
Грінстадта	36 секунд
Математична система MatCAD 8.0	більше 55 хвилин

Серед методів багатовимірної оптимізації другого порядку найкращу збіжність показує метод Фіакко–Мак–Кормика, який при вказаних початкових даних знаходить оптимальні значення за 15 секунд.

Як бачимо, запрограмовані на мові Турбо Паскаль 7.0 методи багатовимірної оптимізації знаходять розв’язок більш ніж в 100 разів швидше, ніж математична система MatCAD 8.0. Слід також визначити, що MatCAD знаходить оптимальні значення рівними (2.145, 1995) і значення функціоналу в ньому рівне  $F=0.896$ . Методи багатовимірного пошуку знаходять значення (2.248, 1973) і  $F \approx 0.901$ . Отже, методи, реалізовані на мові програмування Турбо Паскаль, знаходять оптимальні значення не тільки набагато швидше, але й точніше і краще. Після перевірки цього на багатьох прикладах встановлено, що запрограмовані методи багатовимірного пошуку дають краще значення функціоналу на 0.003–0.005, ніж математична

система MatCAD 8.0. Це пов'язано з похибкою, яка виникає при дуже великій кількості обчислень і яка приводить до деякої

неточності у визначенні значення функціоналу  $F(n,d)$  математичною системою MatCAD 8.0 при різних значеннях  $n$  і  $d$ .

Таблиця 2. Оптимальні значення функціоналу  $F(n,d)$  при  $n_0=1.0$  та  $n_s=1.51$ .

Коефіцієнт ( $z$ )	Геометрична товщина ( $d$ ), Å	Показник заломлення ( $n$ )	Значення функціоналу $F(n,d)$
-1.0	6808	1.35	0.9432472
-0.9	6918	1.35	0.9513040
-0.8	7031	1.35	0.9588239
-0.7	7148	1.35	0.9656387
-0.6	7269	1.35	0.9715415
-0.5	7394	1.35	0.9762816
-0.4	7500	1.35	0.9795584
-0.3	7500	1.35	0.9810001
-0.2	7500	1.35	0.9803207
-0.1	4330	1.35	0.9798711
0	3149	1.35	0.9844710
0.1	2589	1.45	0.9777041
0.2	2085	1.55	0.9704531
0.3	1557	1.65	0.9638296
0.4	1000	1.75	0.9593532
0.5	1000	1.85	0.9554237
0.6	1000	1.95	0.9504004
0.7	1000	2.05	0.9442386
0.8	1000	2.15	0.9369104
0.9	1000	2.25	0.9284052
1.0	1000	2.35	0.9187296

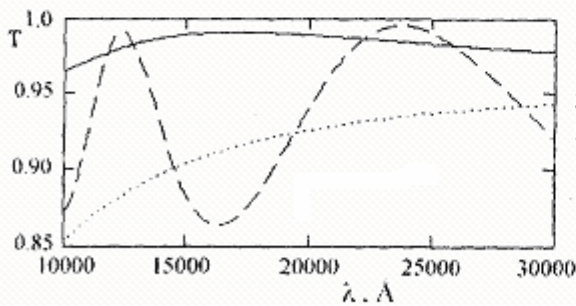


Рис.1. Спектральні характеристики одиничного шару на підкладці з показником заломлення  $n_s=1.51$ : 1 – однорідний шар з параметрами  $n=1.35$  та  $d=3149$  Å; 2 – неоднорідний шар з параметрами  $n=2.35$  і  $d=1000$  Å та коефіцієнтом  $z=1.0$ ; 3 – неоднорідний шар з параметрами  $n=1.35$  і  $d=6808$  Å та коефіцієнтом  $z=-1.0$ .

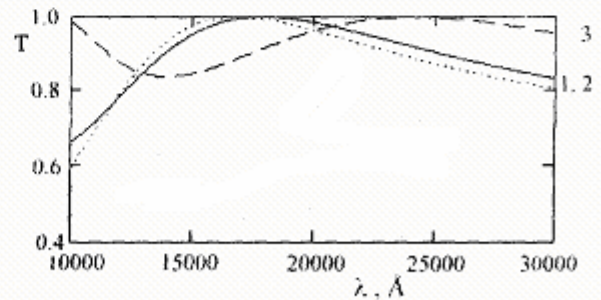


Рис.2. Спектральні характеристики одиничного шару на підкладці з показником заломлення  $n_s=4$ : 1 – однорідний шар з параметрами  $n=2$  та  $d=2236$  Å; 2 – неоднорідний шар з параметрами  $n=2.47$  і  $d=1795$  Å та коефіцієнтом  $z=1.0$ ; 3 – неоднорідний шар з параметрами  $n=1.37$  і  $d=4037$  Å та коефіцієнтом  $z=-1.0$ .

Результати обчислень для різних значень коефіцієнта  $z$  наведено в таблиці 2, при показнику заломлення підкладки  $n_s = 1.51$  та в таблиці 3, при  $n_s = 4$ . Як бачимо, при  $n_s = 1.51$  максимально можливим значенням функціоналу є  $F = 0.9844710$  при  $z=0$ . Отже, в даному випадку однорідним одиничним шаром з  $n=1.35$  та геометричною товщиною  $d=3149 \text{ \AA}$  скло ( $n_s = 1.51$ ) можна просвітлити краще (рис.1, крива 1), ніж будь-яким неоднорідним шаром (рис.1,

криві 2,3). Для високозаломлюючої підкладки  $n_s = 4$ , дані розрахунків вказують на протилежне. Чим менше значення коефіцієнта  $z$ , тим більше середньоквадратичне значення пропускання (функціонал  $F(n,d)$ ) (рис.2, крива 3). Найкращим варіантом для  $n_s = 4$  буде неоднорідна плівка з показником заломлення 1.35 на межі плівка-вакуум та показником заломлення 3.75 на межі плівка-підкладка, середньоквадратичне значення при цьому буде рівним  $F \approx 0.98$ .

Таблиця 3. Оптимальні значення функціоналу  $F(n,d)$  при  $n_0=1.0$  та  $n_s=4$ .

Коефіцієнт ( $z$ )	Геометрична товщина ( $d$ ), $\text{\AA}$	Показник заломлення ( $n$ )	Значення функціоналу $F(n,d)$
-1.0	4037	1.365	0.9406631
-0.9	3796	1.427	0.9352729
-0.8	3388	1.5	0.9300656
-0.7	3069	1.581	0.9257960
-0.6	2860	1.651	0.9222401
-0.5	2704	1.715	0.9191678
-0.4	2580	1.777	0.9164548
-0.3	2475	1.836	0.9140242
-0.2	2385	1.892	0.9118237
-0.1	2307	1.947	0.9098154
0	2236	2	0.9079705
0.1	2174	2.52	0.9062666
0.2	2117	2.103	0.9046859
0.3	2065	2.152	0.9032135
0.4	2017	2.201	0.9018375
0.5	1973	2.248	0.9005477
0.6	1932	2.295	0.8993355
0.7	1895	2.341	0.8981935
0.8	1859	2.386	0.8971594
0.9	1826	2.43	0.8960957
1.0	1795	2.474	0.8951295

### Література

1. А.Н.Сергеев, Л.А.Осадчий, М.Н.Фролова. *Однородные и неоднородные пленки оксидных систем* (М., 1989).
2. П.П.Яковлев, Б.Б.Мешков. *Проектирование интерференционных покрытий* (М., 1987).
3. О.В.Мица, Й.Г.Головач, Ю.О.Первак. *Наук. вісник Ужг. унів. Сер. Матем. та Інформ.* **5**, 75 (2000).
4. J.Holovacs, A.Mitsa, V.Mitsa. *4<sup>th</sup> International Conference on Applied*

- Informatics* (Eger-Noszvaj, Hungary, 1999), p.51–57.
5. Y.Pervak, A.Mitsa, J.Holovach, I.Fekeshgazi. *The International Society for Optical Engineering* (Vynnytsa, 2000), p.321-325.
6. Ф.Г.Ващук, О.Г.Лавер, Н.Я.Шумило. *Математичне програмування та елементи варіаційного числення: навчально-методичний посібник* (Ужгород, 2001).

## MODELLING OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF INHOMOGENEOUS LAYERS AT LINEAR DISTRIBUTION OF REFRACTIVE INDEX

O.V. Mitsa

Uzhhorod National University  
Pidhirna St. 46, Uzhhorod, 88000  
e-mail: mitsa@univ.uzhgorod.ua

Optimization of spectral characteristics of inhomogeneous thin films with linear distribution of refractive index on substrates with refractive index 1.51 and 4 was performed. It was found that antireflecting effect of substrate with  $n=1.51$  based on inhomogeneous coatings is smaller compared with the case of single homogeneous layer with the refractive index 1.35. The opposite situation was found for high-refractive substrates with  $n_i=4$ . By comparing the calculations on the basis of a large number of methods of multidimensional optimization and based on the criterion of the calculation duration and on the obtained mean-square transmission value, the best methods of optimization of inhomogeneous film parameters were found. The results of calculations of parameters of inhomogeneous films obtained on the basis of multidimensional optimization methods were compared with the data of calculations on the basis of MatCAD 8.0 software.