

УДК 621.375.826

Г.А. Петровська, Т.А. Редько

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра лазерної техніки та оптоелектронних систем**МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ДИСПЕРСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТОНКОПЛІВКОВИХ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

© Петровська Г.А., Редько Т.А., 2002

G.A. Petrovska, T.A. Redjko

**METHOD OF OPTIMIZATION OF DISPERSED PERFORMANCES  
OF THIN-FILM OPTICAL MATERIALS**

© Petrovska G.A., Redjko T.A., 2002

**Розроблено програмне забезпечення для визначення дисперсій показників заломлення і поглинання тонкоплівкових оптичних матеріалів за експериментальною залежністю коефіцієнта пропускання чи відбивання тонкої плівки від довжини хвилі. Визначені оптичні константи деяких тонкоплівкових матеріалів на основі тугоплавких окислів, осаджених методом електронно-променевого розпилення у вакуумі. Досліджені залежності дисперсійних характеристик від умов осадження плівок та вибрані оптимальні технологічні режими.**

**The software for determination of dispersion of refraction index and absorption index of thin-film optical materials with experimental dependence of a transmission factor or reflection factor of a thin film from wave length is developed. The optical constants of some thin-film materials of refractory oxides deposited by a method of electron-beam evaporation in vacuum are determined. Dependencies of dispersing from conditions of a evaporation of thin-films are investigated and the optimum technological modes are selected .**

**Вступ.** У газових лазерах для забезпечення заданого спектрального складу випромінювання використовуються резонаторні дзеркала з високоселективними інтерференційними покриттями. Необхідних спектральних параметрів дзеркал досягають чергуванням певної кількості шарів з високим і низьким показниками заломлення та оптичними товщинами  $\lambda/4$ . Для потужних лазерів та лазерів, що генерують на слабких переходах, особливі вимоги висуваються до втрат на поглинання в дзеркальних покриттях. Використання в лазерах дзеркал з високими коефіцієнтами поглинання зменшує добротність резонаторів, що суттєво обмежує можливості отримання генерації на малоінтенсивних переходах. В потужних же лазерних системах тепло, яке виділяється при поглинанні, викликає виникнення теплових ефектів, що приводить до деформації поверхонь дзеркал, а отже, до зменшення стійкості резонаторів, зміни просторових параметрів пучка і навіть до руйнування дзеркальних покриттів.

Результуючі спектральні параметри інтерференційної структури, зокрема поглинання в ній, визначаються властивостями тонкоплівкових матеріалів, в першу чергу, їх диспер-

сійними характеристиками, тобто залежностями показника заломлення і показника поглинання від довжини хвилі. Ці властивості тонких плівок значною мірою залежать від технології їх осадження. Зокрема дисперсійні характеристики плівок, нанесених методом електронно-променевого розпилення у вакуумі, залежать від температури підкладки, швидкості осадження, тиску залишкових газів тощо. Крім того, плівки, напилені з різних партій плівкоутворюючого матеріалу, можуть відчутно відрізнятися за своїми спектральними характеристиками.

Отже, для виготовлення лазерних дзеркал із заданими спектральними параметрами та малим поглинанням, а також для здійснення вхідного контролю плівкоутворюючих матеріалів, існує потреба у розробці простого методу визначення їх дисперсійних характеристик та оптимізації за його допомогою технологічних режимів осадження тонких плівок.

**Дисперсійні співвідношення.** Як відомо, оптичні матеріали характеризуються комплексним показником заломлення:

$$n = \tilde{n} - ik,$$

де  $n$  і  $k$  мають дійсні значення. Для діелектричних покриттів справедливе співвідношення  $k/n < 10^{-3}$ .

В цій роботі для визначення значень  $n$  і  $k$  на різних довжинах хвиль використана модель Лоренца [1], за якою дисперсійні співвідношення виражаються через оптичні константи діелектриків:

$$n^2(\lambda) = A + k^2(\lambda) + \frac{B\lambda^2(\lambda^2 - C^2)}{(\lambda^2 - C^2) + D^2\lambda^2}; \quad (1)$$

$$k(\lambda) = \frac{1}{2n(\lambda)} \frac{BD\lambda^3}{(\lambda^2 - C^2) + D^2\lambda^2}, \quad (2)$$

де  $n$  – показник заломлення;  $k$  – показник поглинання;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  – оптичні константи, які залежать від структури матеріалу.

**Програма для визначення оптичних констант тонкоплівкових матеріалів.** Метод визначення дисперсійних характеристик базується на використанні підпрограми розрахунку спектральних характеристик  $R(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$ ,  $A(\lambda)$  багат шарових інтерференційних покриттів. В основу розрахунку цих характеристик покладений матричний метод [2], розрахунки проводяться з врахуванням дисперсії показника заломлення та поглинання плівкових матеріалів.

Для визначення дисперсій показника заломлення і показника поглинання досліджуваного матеріалу при певних технологічних режимах на скляну чи кварцову підкладку наноситься тонка плівка і за допомогою спектрофотометра записується її спектральна характеристика пропускання  $T_e = f(\lambda)$ . На характеристиці вибираються характерні точки (екстремуми, точки перегину) (рис. 1), цей масив даних вводиться у програму і є описом експериментальної кривої. В програму вводяться також початкові значення оптичних констант  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  та товщини плівки  $h$ . За початковими значеннями цих констант розраховуються дисперсійні характеристики матеріалу  $n(\lambda)$  і  $k(\lambda)$  та теоретична крива  $T_t = f(\lambda)$ . Теоретична крива порівнюється з експериментальною (рис. 2). За критерій якості

збігання використана функція  $M$  від різниць між розрахованими  $T_t$  та експериментально виміряними  $T_e$  значеннями з  $n$  фотометричних величин коефіцієнта пропускання:

$$M = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_t - T_e}{\varepsilon} \right)^2 \right\}^{1/2},$$

де  $\varepsilon$  – точність вимірювання фотометричної величини коефіцієнта пропускання  $T_e$ .

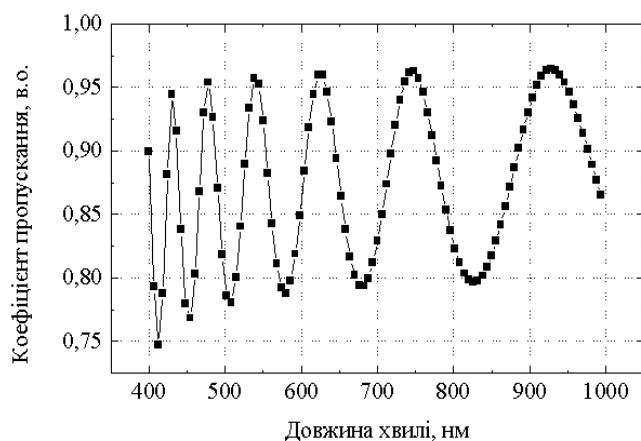


Рис. 1. Експериментальна крива спектрального коефіцієнта пропускання для плівки  $ZrO_2$ , нанесеної методом електронно-променевого розпилення у вакуумі на підкладку з плавленого кварцу

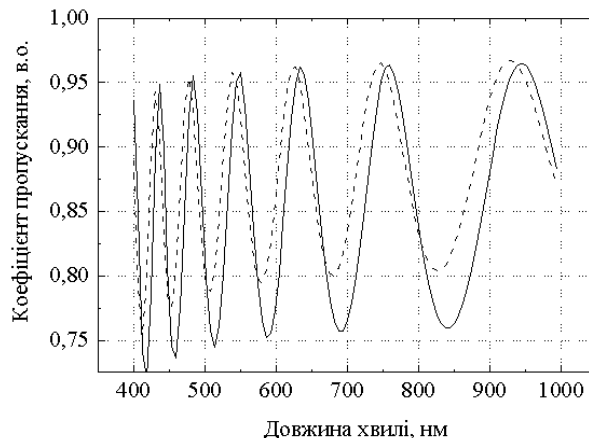


Рис. 2. Експериментальна і теоретична спектральна крива пропускання для плівки  $ZrO_2$  під час виконання алгоритму оптимізації:  
 - - - - - експериментальна крива;  
 — — — — — теоретична крива

Далі програма здійснює підбір таких значень  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  та  $h$ , при яких теоретична крива пропускання буде якнайточніше збігатися з експериментальною кривою. Така оптимізація методом багатомірного пошуку здійснюється за методом конфігурацій Хука – Дживса [3].

**Експериментальні результати.** За допомогою розробленого програмного забезпечення досліджувались тонкі плівки на основі тугоплавких окислів  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $SiO_2$ , які наносили на кварцову підкладку методом електронно-променевого розпилення у вакуумі. В таблиці наведені оптичні константи тонкоплівкових матеріалів, визначені за експериментальними кривими пропускання плівок  $T(\lambda)$  в діапазоні довжин хвиль 400–1000 нм. Плівки напилені при таких технологічних режимах: температура підкладки  $T = 170$  °C; швидкість осадження  $V = 10$  Å/c; тиск залишкових газів  $P = 2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.

На рис. 3 наведені розраховані за експериментально визначеними оптичними константами дисперсійні характеристики плівки  $ZrO_2$ .

Як свідчать результати досліджень, дисперсійні характеристики тонкоплівкових матеріалів значною мірою залежать від технологічних режимів напилення.

### Експериментальні значення оптичних констант тонкоплівкових матеріалів

Матеріал	A	B	C	D	Технологічні режими наплення
ZrO <sub>2</sub>	3,386	0,382	0,307	0,0007	T = 170°C; V = 10 Å/c; P = 2·10 <sup>-4</sup> мм рт. ст
HfO <sub>2</sub>	3,8531	0,0924	0,021	0,0002	—” —
SiO <sub>2</sub>	1,0642	0,012	0,017	0,00001	—” —

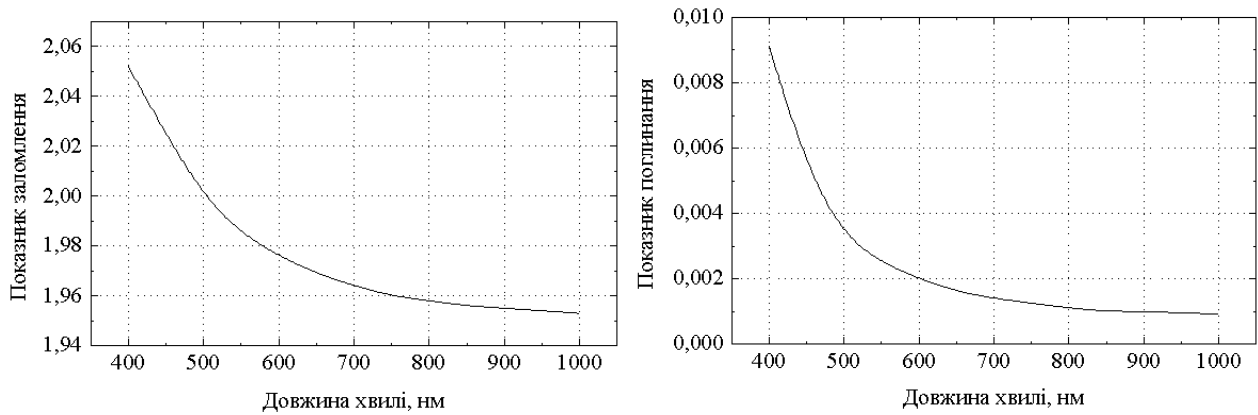


Рис. 3. Дисперсійні характеристики заломлення і поглинання плівки ZrO<sub>2</sub>, напленої при T = 170°C; V = 10 Å/c; P = 2·10<sup>-4</sup> мм рт. ст.

На рис. 4 зображена експериментальна залежність показника заломлення плівки ZrO<sub>2</sub> для  $\lambda = 500$  нм від температури підкладки під час осадження. З графіка видно, що при сталих швидкості осадження V = 10 Å/c і тиску P = 2·10<sup>-4</sup> мм рт. ст. показник заломлення плівки може змінюватись від 1,96 до 2,02 при зміні температури підкладки в межах 100–350 °C. Показник заломлення плівки зростає також при збільшенні швидкості осадження (рис. 5).

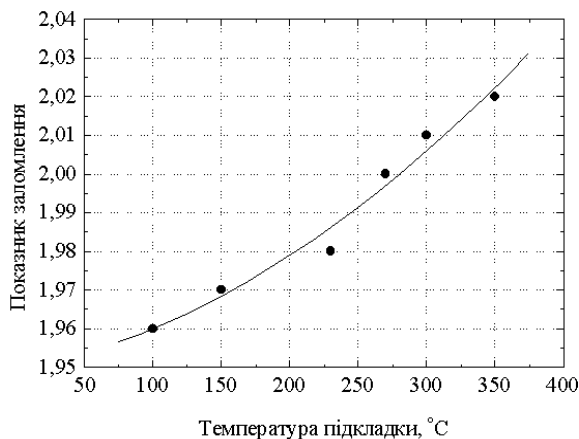


Рис. 4. Залежність показника заломлення плівки ZrO<sub>2</sub> для  $\lambda = 500$  нм від температури підкладки (V = 10 Å/c, P = 2·10<sup>-4</sup> мм рт. ст.)

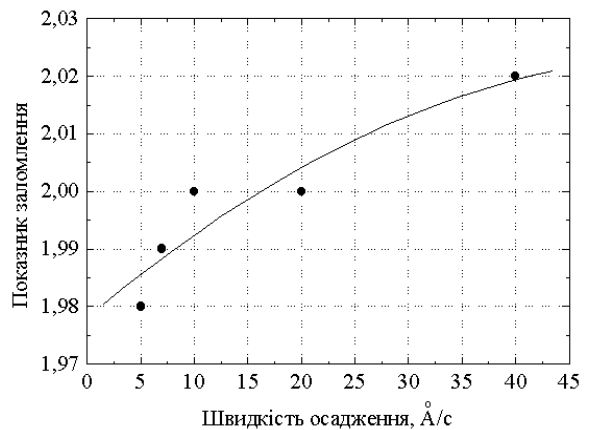


Рис. 5. Залежність показника заломлення плівки ZrO<sub>2</sub> для  $\lambda = 500$  нм від швидкості осадження (T = 270 °C, P = 2·10<sup>-4</sup> мм рт. ст.)

Технологічні режими наплення суттєво впливають на поглинаючу здатність тонких плівок. З рис. 6 видно, що при зміні температури підкладки під час осадження плівки змінюється хід дисперсійної кривої показника поглинання. При зростанні температури підкладки поглинання плівки зростає особливо для коротких довжин хвиль.

На рис. 7 наведені результати дослідження поглинаючої здатності плівок залежно від температури підкладки. З графіка видно, що при зростанні температури підкладки поглинання плівки збільшується, причому в межах температур від 100 до 250 °С ці зміни незначні.

Для плівок  $ZrO_2$  досліджено вплив швидкості осадження на показник поглинання (рис. 8). Встановлено, що незалежно від тиску залишкових газів можна встановити швидкість конденсації, при якій плівка буде мати мінімальне поглинання. Зменшення поглинання у плівках із зменшенням швидкості осадження більш відчутне для коротких довжин хвиль. Для  $ZrO_2$  оптимальна швидкість осадження знаходиться в межах 7–12 Å/с.

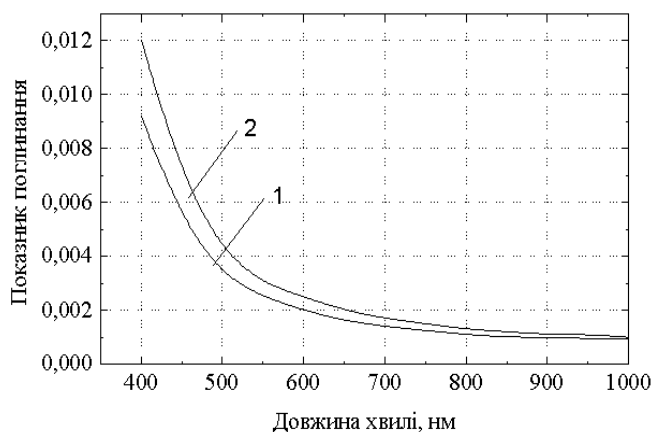


Рис. 6. Зміна дисперсії показника поглинання плівки  $ZrO_2$  при зміні температури підкладки:

1 –  $T = 170\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$   
( $V = 10\text{ Å/с}$ ;  $P = 2 \cdot 10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$ )

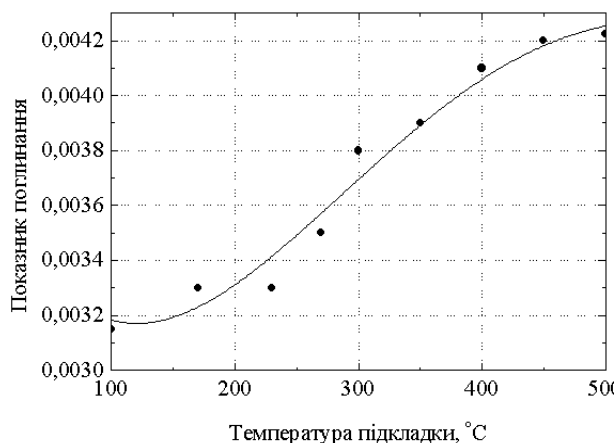


Рис. 7. Залежність показника поглинання плівки  $ZrO_2$  для  $\lambda = 500\text{ нм}$  від температури підкладки

( $V = 10\text{ Å/с}$ ;  $P = 2 \cdot 10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$ )

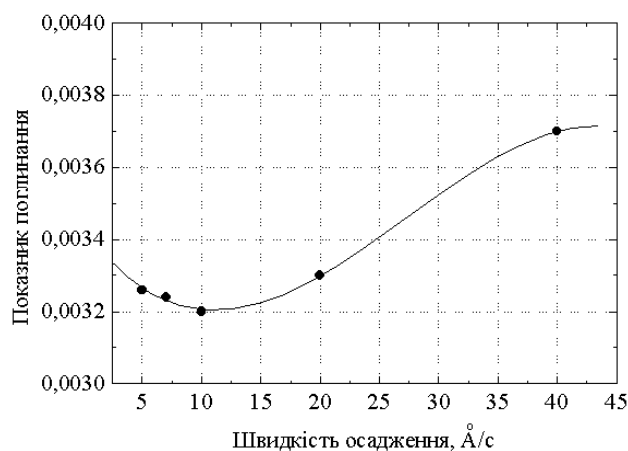


Рис. 8. Залежність показника поглинання плівки  $ZrO_2$  для  $\lambda = 500\text{ нм}$  від швидкості осадження

( $T = 270\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P = 2 \cdot 10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$ )

Отже, з погляду отримання мінімальної поглинаючої здатності тонких плівок  $ZrO_2$ , а також, враховуючи те, що отримані плівки повинні мати мінімальні напруження та бути

механічно міцними, оптимальними можна вважати такі режими напилення: при тиску залишкових газів  $P = 2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. температура підкладки повинна бути в межах 150–250 °С, а швидкість осадження повинна становити 7–12 Å/с.

**Висновки.** Розроблено програмне забезпечення для визначення дисперсій показників заломлення і поглинання тонкоплівкових оптичних матеріалів за експериментальною залежністю коефіцієнта пропускання тонкої плівки від довжини хвилі. Визначені оптичні константи деяких тонкоплівкових матеріалів на основі тугоплавких окислів, осаджених методом електронно-променевого розпилення у вакуумі. Досліджені залежності дисперсійних характеристик від умов осадження плівок  $ZrO_2$  та вибрані оптимальні технологічні режими. Для отримання плівок  $ZrO_2$  з мінімальним поглинанням оптимальними можна вважати такі режими напилення: при тиску залишкових газів  $P = 2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. температура підкладки повинна бути в межах 150–250 °С, а швидкість осадження повинна становити 7–12 Å/с.

Розроблене програмне забезпечення може бути використане для дослідження нових плівкоутворюючих матеріалів та відпрацювання технології їх осадження.

1. *Dobrowolski J.A., Ho F.C., Waldorf A. // Applied optics. – 1983. – 22, № 20. – P. 3191–3200.*
2. *Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М., 1970.*
3. *Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. – М., 1982.*