

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА МЕЖАХ РОЗДІЛУ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ФІЛЬТРІВ

Булина Ярослав Віталійович

аспірант факультету інформаційних технологій
ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Єрмаков Владислав Олександрович

аспірант факультету інформаційних технологій
ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Петрушин Андрій Євгенійович

аспірант факультету інформаційних технологій
ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Нерівномірності на межах розділу плівка-підкладка є небажаними, оскільки ускладнюють контроль геометричної товщини плівок під час їхнього виготовлення [1, 2]. Показники заломлення некристалічних плівок на основі некристалічних напівпровідників можуть плавно змінюватися від 2.1 до 5. Межі зміни показників заломлення некристалічних плівок є привабливими для доповнення існуючих стандартів новими високозаломлюючими матеріалами для оптичних покриттів. Експериментально встановлено, що на межах розділу високозаломлююча некристалічна плівка-підкладка та плівка-вакуум виникають неоднорідності складу і відповідно показника заломлення [3]. Особливості характеристик оптичних вузькосмугових фільтрів з частково неоднорідними плівками мало досліджені на відміну від широкосмугових фільтрів [4]. Тому метою роботи було моделювання спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів з частково неоднорідною високозаломлюючою компонентою для різних типів розподілів показника заломлення при падінні світла під кутом.

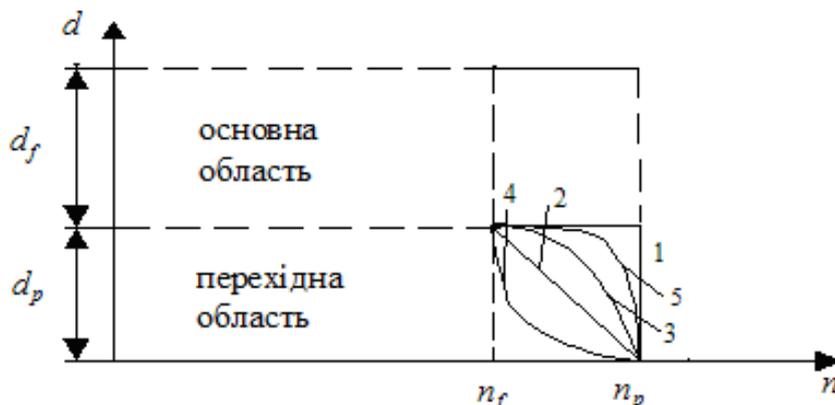


Рис. 1. Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчатий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

Розглянемо наступну шарувато-неоднорідну модель профілю показника заломлення плівок, яка включає в себе основну та перехідну області (рис.1). При

розрахунках спектральних характеристик багатозарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлюючій компоненті. Позначимо її товщину через d_p . Після проведеного експерименту було виявлено, що геометрична товщина перехідної області (d_p) може досягати до 30 нм.

Таблиця 1

Значення показника заломлення j -ої зони перехідної області в залежності від розподілу

Розподіли	Показник заломлення j -ої зони перехідної області, n_{pj}
Ступінчастий	n_p
Лінійний	$n_f + \frac{(n_p - n_f)}{m_p - 1} \cdot (j - 1)$
Квадратичний	$n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2$
Логарифмічний	$n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j)$
Експоненціальний	$n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{m_p - 1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1)$

Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом $n(z)$ по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на m_p (в дослідженні вибиралось 10) рівних по товщині зон і значення показника заломлення в залежності від типу розподілу рівне значенню наведеному в таблиці 1.

Значення показника заломлення в перехідному шарі за законом $n(z)$ буде змінюватись від n_f до n_p , де n_f – показник заломлення основної частини плівки, n_p – показник заломлення перехідної області, n_{pj} – показник заломлення j -тої зони при розбитті перехідної області.

Геометрична товщина центральної частини плівки (d_f) у цьому випадку:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left(\frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \text{ де } n_{sp} = \frac{1}{m_p} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}, \quad (1)$$

Змінні n_{sp} – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно; m_p – кількість розбиттів перехідного шару; $k=2$ – коли розглядається напівхвильовий шар і $k=4$ – коли розглядається четвертьхвильовий шар; n_f – показник заломлення основної частини плівки; n_{pj} – показники заломлення j -тої зони при розбитті перехідної області, λ_0 – робоча довжина хвилі. Для однозначного розуміння формули (1) будемо вважати $k=2$.

Промодельюємо [5] вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за допомогою матричного методу Абеле [6]. Вибираючи за параметри показник заломлення n , геометричну товщину шару d і довжину хвилі λ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

$$M_s(n, d, \lambda) = \begin{vmatrix} \cos \delta(n, d, \lambda) & -\frac{i}{p} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -ip \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{vmatrix}, \quad (2)$$

де $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda}$, $i = \sqrt{-1}$, θ – кут між променем і нормаллю до площини

падіння. Значення $p = n \cos \theta$ для ТЕ-хвилі (s -поляризація) і $p = \frac{n}{\cos \theta}$ для ТМ-хвилі (p -поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару буде рівна:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{mp-1} M_s(n_{pj}, d_p, \lambda), \quad (3)$$

Отже, якщо брати до уваги наявність перехідного шару, то використовуючи формули (3)-(4), можна записати характеристичну матрицю даної неоднорідної структури:

$$M(\lambda) = M_s(n_f, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (4)$$

де n_f – показник заломлення основної частини плівки. Як бачимо, вона рівна добутку характеристичних матриць основної частини і перехідного шару.

Розглянемо вузькосмуговий фільтр конструкції S-BНВ..2В..ВНВ конструкції. Будемо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця буде рівною:

$$M_B(\lambda) = M_s(n_B, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (5)$$

де n_B – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю рівною:

$$M_H(\lambda) = M_s(n_H, d_f(d_p), \lambda), \quad (6)$$

де n_H – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Беручи це до уваги, ми можемо записати характеристичну матрицю $(4k+1)$ -шарової структури типу S-BНВ..2В..ВНВ можемо задати формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_s\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda\right) \cdot \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)). \quad (7)$$

Знаючи характеристичну матрицю всієї структури, ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \frac{4}{\left(2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{P_0 P_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (8)$$

де $p_0 = N_0 \cos \theta_0$ і $p_s = N_s \cos \theta_s$ для ТЕ хвилі (s-поляризація);

$p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$ і $p_s = \frac{N_s}{\cos \theta_s}$ для ТМ хвилі (p-поляризація);

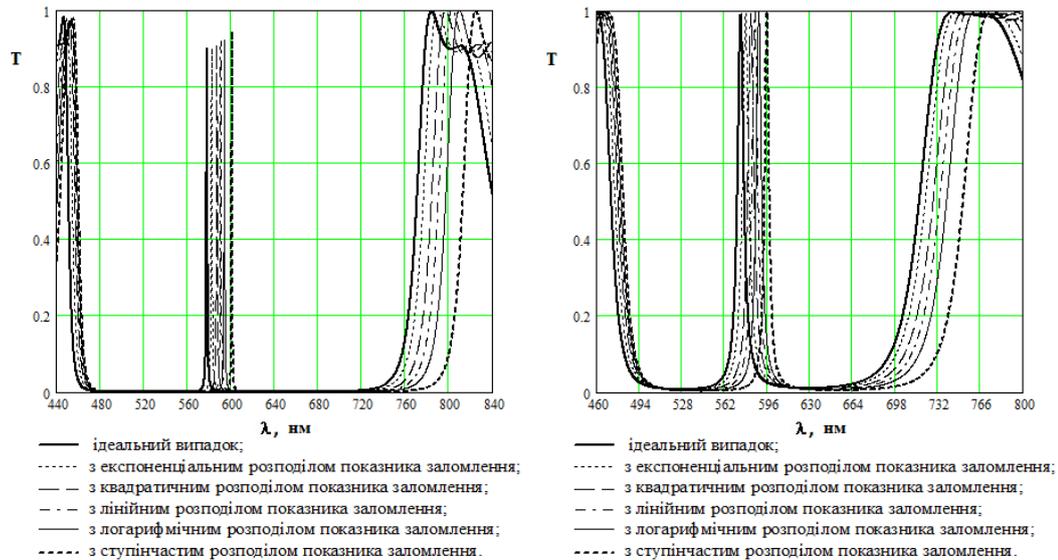
θ_0 – кут під яким промінь на шарувату структуру;

θ_s – кут під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення.

n_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладинки відповідно, $m_{11},$

m_{12}, m_{21}, m_{22} – елементи характеристичної матриці M .

Висновки. Типи розподілів показника заломлення перехідної області впливають на спектральні характеристики в наступному порядку: ступінчастий, логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний (рис. 2).



а) s- поляризація

б) p- поляризація

Рис. 2. Спектральні характеристики 17-шарової структури ВНВ..2В..ВНВ ($\lambda_0=630$ нм) в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення при $\theta_0 = 45^\circ$

Для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. Для p-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області спочатку збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а починаючи з кута $\theta_0 = 56^\circ 29'$ (кут Брюстера) відхилення збільшується в сторону зменшення коефіцієнта пропускання. При цьому зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. При наявності перехідної області на півширина $\delta\lambda_{0,5}$ та десятична ширина $\delta\lambda_{0,1}$ зменшується, а ширина спектральних інтервалів $\Delta\lambda_K$ та $\Delta\lambda_D$ збільшується для всіх кутів для обох поляризацій.

Список використаних джерел:

1. Mitsa A., Mitsa V., Ugrin A. Mathematical modeling of spectral characteristics of optical coatings with slightly inhomogeneous chalcogenide films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2005. Vol. 7, No. 2, April. P.955.
2. Mitsa A., Mitsa V., Ugrin A., Modelling of spectral characteristics on inhomogeneous (gradient) antireflective coatings based on chalcogenide glasses. *J. Chalcogenide Letters*. 2005. Vol.2.No1, January. P.5-7.
3. Roman Holomb, Paul Ihnatolia, Oleksandr Mitsa, Volodymyr Mitsa, László Himics, Miklós Veres Modeling and first-principles calculation of low-frequency quasi-localized vibrations of soft and rigid As-S nanoclusters. *Applied Nanoscience*, 2019. P. 1-12.
4. Mitsa A.V., Fekeshgazi I.V., Gomes M. Modelling of Spectral Characteristics of Short-period Structures with Slightly Inhomogeneous Films Based on Wide Bandgap Optical Materials. *Proc. 8 th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2004): Invited Session "Photonic Materials for Optical Computing"*, Orlando, USA, July 18-21,2004.
5. Міца О.В., Лавер В.О. Системний аналіз: навчальний посібник. Ужгород : ПП Аутодор-Шарк, 2021. 63 с.
6. Міца О.В. Оптимізація характеристик оптичних покриттів на основі неоднорідних плівок з різним типом розподілу показника заломлення. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. матем. і інф.* 2001. Вип. 6. С. 95-99.