

МОДЕЛЬ ІНФРАЧЕРВОНИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОГО ДЗЕРКАЛА

© Яремчук І.Я., Фітьо В.М., Бобицький Я.В., 2009

I.Ya. Yaremchuk, V.M. Fitio

MODEL OF INFRARED THIN-FILM FILTERS ON BASIS OF THE INTERFERENCE MIRRORS

© Yaremchuk I.Ya., Fitio V.M., Bobitski Ya.V., 2009

Запропоновано нову структуру інфрачервоних смугових інтерференційних фільтрів та наведено алгоритм їх аналізу. Аналітично отримані співвідношення, які пов'язують показники заломлення усіх шарів у фільтрах типу “шар з високим показником заломлення – інтерференційне дзеркало – шар з високим показником заломлення”. За допомогою отриманих залежностей визначено такі параметри, як товщина та показник заломлення шарів з високим показником заломлення, що обмежують інтерференційне дзеркало.

Design the new structure of interference band-pass infrared filter and new algorithm analysis is proposed. The analytic expressions for the analysis structure “layer with the high refractive index – interference mirror – layer with the high refractive index” are obtained. The refractive indices optimal and thicknesses of individual layers that limited interference mirror are obtained.

Вступ

Дослідження багатошарових інтерференційних систем і фільтрів на їх основі бере свій початок ще з середини минулого століття [1 – 3], проте жорсткіші вимоги щодо селективності фільтрів для сучасних оптичних систем спричинили поштовх до пошуку оптимальних рішень щодо конструкцій інтерференційних фільтрів [4–6], оскільки такі фільтри дають змогу виділяти певні довжини хвиль, а також використовуються для розділення чи групування окремих каналів по обидва боки оптичних ліній. Сьогодні особливої актуальності набуло розроблення нових типів оптичних тонкоплівкових фільтрів. Це зумовлено широким використанням цих пристроїв в різноманітних системах: у задачах екологічного контролю, модернізації температурних сенсорів, високочутливих пристроїв для отримання термічного зображення, наприклад, зображення відбитків пальців людини тощо [7]. Вони є практично незамінними в галузі телекомунікацій [8], оскільки мають унікальні у своєму роді якості, що відповідають чітким вимогам оптичних комунікаційних систем. Ці якості включають: стійкість до зовнішніх дій, термостійкість, добрі оптичні властивості, модульний принцип побудови та масштабність, серійний процес виробництва, експлуатаційну гнучкість. Першочерговим завданням розробників залишається забезпечення максимальної селективності та експлуатаційної надійності таких фільтрів під час використання мінімальної кількості тонкоплівкових шарів у структурах. Тому розробка нових моделей інтерференційних фільтрів з наперед заданими параметрами є вкрай актуальним завданням з точки зору виготовлення сучасних оптичних систем.

Синтез конструкції інтерференційного покриття та його реалізація є основними етапами створення тонкоплівкових систем з заданими характеристиками. Для синтезу смугових тонкоплівкових фільтрів найчастіше використовують структури, подібні до еталону Фабрі-Перо [9], однак, як відомо, можна використовувати як смуговий фільтр систему типу: діелектрик з високим показником заломлення – металева плівка – діелектрик з високим показником заломлення [10 – 11]. Високе пропускання у вузькій смузі досягається за рахунок того, що у структурі присутній шар, в якому показник заломлення є комплексним, має малу дійсну частину і значну уявну частину (металева плівка). Діелектричні ж шари з високим показником заломлення слугують ланками, що погоджують імпеданс металевої плівки з імпедансом навколишнього середовища. Можна знайти й інші структури, які мають ефективне значення показника заломлення чисто уявним. До таких структур можна віднести інтерференційне дзеркало у смузі високого відбивання [12].

Мета роботи – розроблення математичної моделі фільтра на основі інтерференційного дзеркала, обмеженого двома шарами з високим показником заломлення, що і є об’єктом дослідження, а предметом дослідження є алгоритм та спектральні характеристики фільтра.

Формулювання задачі, математична модель та алгоритм її дослідження

Запропоновано нову структуру смугового фільтра, що складається з інтерференційного дзеркала, обмеженого двома шарами з високим показником заломлення (рис. 1). Інтерференційне дзеркало складається з послідовності шарів з високим та низьким показниками заломлення відповідно, оптичні товщини яких дорівнюють чверті робочої довжини хвилі.

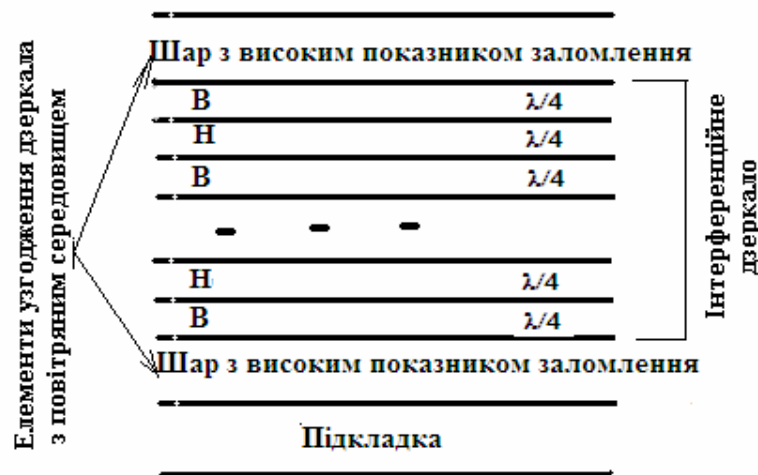


Рис. 1. Структура смугового фільтра на основі інтерференційного дзеркала

Очевидно, що оптимальна товщина шару з високим показником заломлення та й сама величина цього показника заломлення в певний спосіб залежать від значень показників заломлення та товщин шарів інтерференційного дзеркала.

Розглянуто випадок, коли товщини шарів дзеркала завжди дорівнюють чверті довжини робочої хвилі (λ_0), а показники заломлення діелектричних шарів відповідають співвідношенню $n_H > n_L$ для робочої довжини хвилі. Розглянуто тільки випадок нормального падіння плоскої хвилі на границю розділу середовища – шар з високим показником заломлення. Матриця передавання такого інтерференційного дзеркала матиме вигляд [13]:

$$M_{mir} = \begin{bmatrix} 0 & i \\ in_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i \\ in_L & 0 \end{bmatrix} \mathbf{L} \begin{bmatrix} 0 & i \\ in_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i \\ in_L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i \\ in_H & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{n_H} \left(-\frac{n_L}{n_H} \right)^m \\ in_H \left(-\frac{n_H}{n_L} \right)^m & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де n_H та n_L – показники заломлення діелектриків з високою та низькою оптичною густиною матеріалів відповідно; m – ціле число, яке описує кількість пар унітарних передатних матриць шарів з високим та низьким показниками заломлення, які перемножуються.

Для спрощення ведення розрахунків прийнято, що

$$a = n_H \left(-\frac{n_H}{n_L} \right)^m, \quad (2)$$

відповідно передатна матриця дзеркала (1) з врахуванням (2) запишеться як:

$$M_{mir} = \begin{bmatrix} 0 & i \\ ia & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

З врахуванням параметрів (показника заломлення n та товщини d) двох шарів, що обмежують інтерференційне дзеркало передатна, матриця набуває вигляду

$$M = \begin{bmatrix} \cos f & \frac{i}{n} \sin f \\ i n \sin f & \cos f \end{bmatrix} M_{mir} \begin{bmatrix} \cos f & \frac{i}{n} \sin f \\ i n \sin f & \cos f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{n} \sin f \cos f - \frac{n}{a} \sin f \cos f & -\frac{ia}{n^2} \sin^2 f + \frac{i}{a} \cos^2 f \\ ia \cos^2 f - \frac{in^2}{a} \sin^2 f & -\frac{a}{n} \sin f \cos f - \frac{n}{a} \sin f \cos f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $f = \frac{2\pi nd}{l_0}$ (f – фазова товщина).

Відповідно напруженості електричного E_0 та магнітного H_0 полів за врахування показника заломлення підкладки n_s дорівнюють:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{n} \sin f \cos f - \frac{n}{a} \sin f \cos f - \frac{ian_s}{n^2} \sin^2 f + \frac{in_s}{a} \cos^2 f \\ ia \cos^2 f - \frac{in^2}{a} \sin^2 f - \frac{an_s}{n} \sin f \cos f - \frac{nn_s}{a} \sin f \cos f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а коефіцієнти відбивання та пропускання залежать від амплітуд електричного та магнітного полів в такий спосіб [14]:

$$r = \frac{h_0 E_0 - H_0}{h_0 E_0 + H_0}; \quad (6)$$

$$t = \frac{2h_0}{h_0 E_0 - H_0}. \quad (7)$$

де $h_0 = \begin{cases} \frac{n_0}{\cos q} & p\text{-поляризація} \\ n_0 \cos q & s\text{-поляризація} \end{cases}$; h_0 – ефективний показник заломлення повітря (провід-

ність), за нормального падіння ($q = 0^\circ$) плоскої хвилі на границю розділу двох середовищ ефективний показник заломлення дорівнює показнику заломлення і 1; E_0 , H_0 – амплітуди напруженостей електричного та магнітного полів відповідно.

Амплітуда відбивання дорівнюватиме нулю тоді, коли дорівнює нулю чисельник формули (6). Пропускання буде максимальним тоді, коли відбивання дорівнює нулю. Отже, повинна виконуватись така умова:

$$-\frac{a}{n} \sin f \cos f - \frac{n}{a} \sin f \cos f - \frac{ian_s}{n^2} \sin^2 f + \frac{in_s}{a} \cos^2 f - ia \cos^2 f + \frac{in^2}{a} \sin^2 f + \frac{an_s}{n} \sin f \cos f + \frac{nn_s}{a} \sin f \cos f = 0. \quad (8)$$

Спростивши вираз (8), отримаємо

$$\sin^2 f \left[\frac{n^2}{a} - \frac{an_s}{n^2} \right] - i \sin f \cos f \left[(n_s - 1) \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \right] + \cos^2 f \left[\frac{n_s}{a} - a \right] = 0. \quad (9)$$

Звівши рівняння (9) до тангенсів, отримаємо квадратне рівняння (10) з двома розв'язками (11):

$$tg^2 f \left[\frac{n^2}{a} - \frac{an_s}{n^2} \right] - i tg f \left[(n_s - 1) \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \right] + \left[\frac{n_s}{a} - a \right] = 0; \quad (10)$$

$$tg j_1, tg j_2 = \frac{-i(n_s - 1) \cdot \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \pm \sqrt{\left(i(n_s - 1) \cdot \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{n^2}{a} - \frac{an_s}{n^2} \right) \cdot \left(\frac{n_s}{a} - a \right)}}{2 \cdot \left(\frac{n^2}{a} - \frac{an_s}{n^2} \right)}. \quad (11)$$

На основі рівнянь (11) будемо залежності $tg j_1, tg j_2$ від показника заломлення (див. рис. 2 і 3).

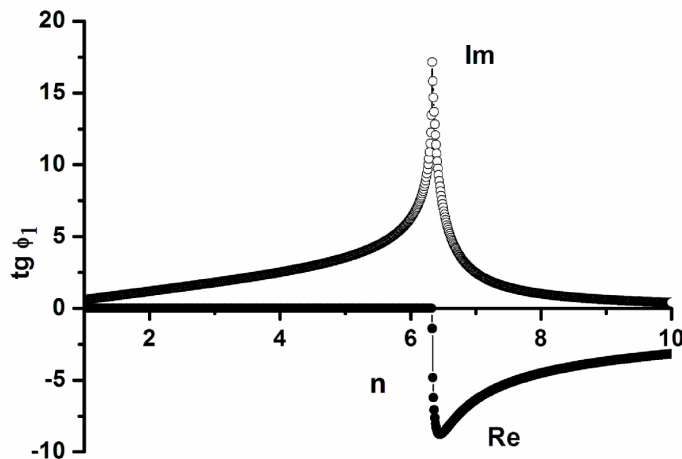


Рис. 2. Залежність $tg j_1$ від показника заломлення діелектричних шарів фільтра типу діелектрик – інтерференційне дзеркало – діелектрик

З залежності, зображеної на рис. 3, визначаємо оптимальне значення показника заломлення для шарів з високим показником заломлення (оптимальному значенню показника заломлення відповідає розрив $tg j_2$).

Для прикладу розглянемо випадок, коли показники заломлення шарів інтерференційного дзеркала відповідно дорівнюють 2,3 (6 шарів) та 1,38 (5 шарів), показник заломлення підкладки вибрано таким, що дорівнює 1,7. Товщини цих шарів розраховано для робочої довжини хвилі $I_0 = 5 \text{ мкм}$.

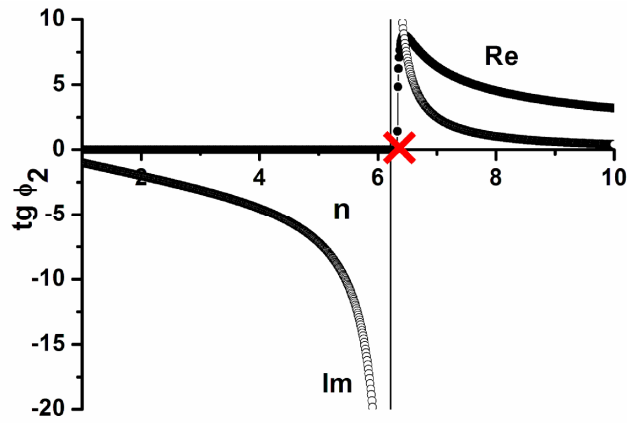


Рис. 3. Залежність $\operatorname{tg} j_2$ від показника заломлення діелектричних шарів фільтра типу діелектрик – інтерференційне дзеркало – діелектрик

Оскільки використовуються лише реальні значення $\operatorname{tg} j$, то показник заломлення обмежувальних шарів знайдено з рис. 3 (Re) і відповідно розраховано товщину цих шарів за формулою

$$d = \operatorname{Re} \left(\frac{I_0}{2 \cdot p \cdot n} \cdot \arctg \left(\frac{-i \cdot (n_s - 1) \cdot \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \pm \sqrt{\left[i \cdot (n_s - 1) \cdot \left(\frac{a}{n} + \frac{n}{a} \right) \right]^2 - 4 \cdot \left(\frac{n^2}{a} - \frac{a n_s}{n^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{a} - a \right)}}{2 \cdot \left(\frac{n^2}{a} - \frac{a n_s}{n^2} \right)} \right) + kp \right). \quad (12)$$

Скориставшись рис. 3, вибрано показник заломлення обмежувальних шарів, що дорівнюють 6,30. Товщини цих шарів згідно з формулою (12) дорівнюють 0,595 мкм. Коефіцієнт пропускання запропонованої структури фільтра з врахуванням формул (4), (5) та (7) розраховано за формулою

$$T = \frac{n_s}{n_0} |t|^2. \quad (13)$$

Спектр пропускання такого фільтра за $k=1$ зображено на рис. 4, а. Ширину смуги пропускання можна звужити, якщо у формулі (12) вибрати k більшим за 1, як показано на рис. 4, б ($k=5$, $d=2,183$ мкм).

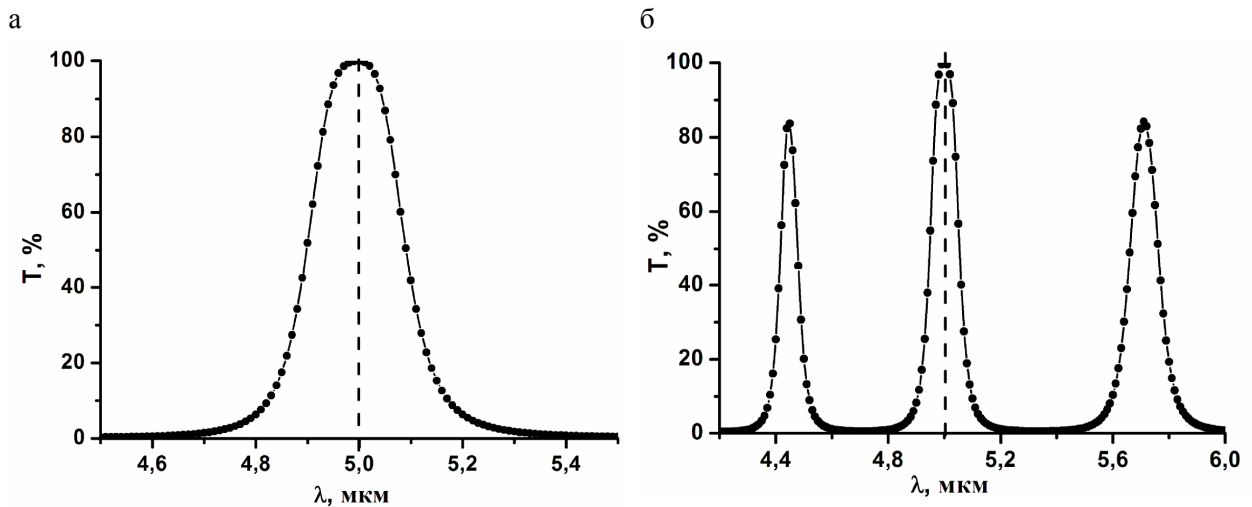


Рис. 4. Залежність коефіцієнта пропускання від довжини хвилі фільтра типу інтерференційне дзеркало, обмежене шарами діелектрика з високим показником заломлення: $n_H = 2.3$; $n_L = 1.38$; $n = 6.3$; $n_s = 1.7$

Спектральна крива коефіцієнта пропускання деформується, коли показник заломлення обмежувальних шарів не дорівнює оптимальному: більший за оптимальний $n = 7,2$, $d = 0,5039$ мкм (рис. 5 (крива 1)); $n = 5$, менший за оптимальний $d = 0,2498$ мкм (рис. 5 (крива 2)).

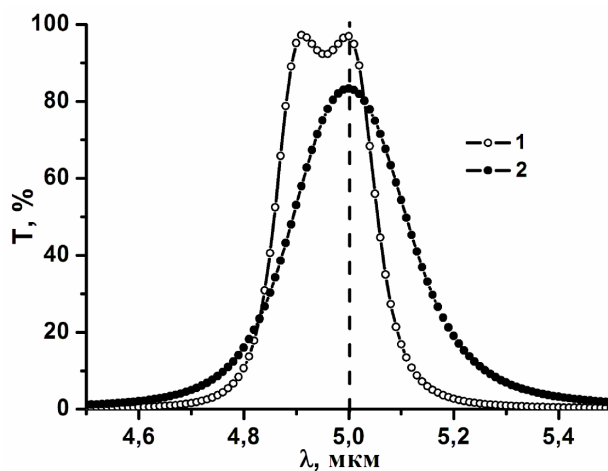


Рис. 5. Залежність коефіцієнта пропускання від довжини хвилі фільтра типу інтерференційне дзеркало, обмежене шарами діелектрика з високим показником заломлення: крива 1: $n_H = 2.3$; $n_L = 1.38$; $n = 7.2$; $n_S = 1.7$; крива 2: $n_H = 2.3$; $n_L = 1.38$; $n = 5.0$; $n_S = 1.7$

Спектр пропускання такої структури нагадує спектр пропускання класичного інтерферометра Фабрі-Перо, проте форма дещо відрізняється, вона стає більш прямокутною, а отже, більш енергетично вигідною.

Висновок

Запропоновано нову конструкцію інтерференційного фільтра структури: шар з високим показником заломлення – інтерференційне дзеркало-шар з високим показником заломлення та наведено алгоритм розрахунку її характеристичних параметрів. Аналітично отримані співвідношення, які пов'язують показники заломлення усіх шарів у фільтрах такого типу.

За допомогою отриманих залежностей визначено такі параметри, як товщина та показник заломлення шарів з високим показником заломлення, що обмежують інтерференційне дзеркало. Наведено приклад синтезу інтерференційного фільтра запропонованого типу для робочої довжини хвилі 5 мкм. Досягнення максимального коефіцієнта пропускання для робочої довжини хвилі отримано за рахунок вибору оптимального показника заломлення, розрахунку товщини шарів, що обмежують інтерференційне дзеркало для довільного вибору параметрів матеріалів дзеркала.

Виконання інтерференційного смугового фільтра за допомогою структури: підкладка – перший тонкоплівковий шар з високим показником заломлення – інтерференційне дзеркало – другий тонкоплівковий шар з високим показником заломлення дає змогу отримати максимальний коефіцієнт пропускання на заданій довжині хвилі за нескладної конструкції фільтра за порівняно невеликої кількості шарів.

1. Савостьянова М.В. *Современные интерференционные светофильтры и их применение*. – Л.: ОНТИ ГОИ, 1960. – 42 с. 2. Кард П.Г. *Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок*. – Таллин: Валгус, 1971. – 235 с. 3. Berning P.H. *Theory and Calculations of Optical Thin Films, Physics of Thin Films*. – 1963. – 1. – P. 69–121. 4. Furman S.A, Tikhonravov A.V. *Optics of multilayer systems*. – Gif-sur-Yvette, Editions Frontieres, 1992. – 242 p. 5. Chun B.J, Hwangbo C.K., Kim J.S. // *Optics Express*. – 2006. – 14 (6). – P. 2473–2479. 6. Dobrowolski J.A, Li L., Hilfiker J.H. // *Appl. Opt.* –

1999. – 38. – P. 4892–4903. 7. JDSU Режим доступу www.jdsu.com 8. Zhang X.X. *Thin film optical filter – an enabling technology for modern optical communication systems*. Режим доступу: www.auxora.com/u/applications/5.pdf. 9. Борисевич Н.А., Верецагин В.Г., Валидов М.А. *Инфракрасные фильтры*. – Минск: Наука и техника, 1971. – 221 с. 10. Яремчук І.Я., Фітьо В.М., Бобицький Я.В. // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 558: Електроніка. – С. 80–85. 11. Fitio V., Bobitski Ya. // Proc. SPIE. – 2005. – 5950. – P. 405–413. 12. Яремчук І.Я., Фітьо В.М., Бобицький Я.В. // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. – 2008. – 6. – С. 67–78. 13. Первак Ю.О. *Оптика багаточарових покриттів: Навч. посібник для студ. фіз. та радіофіз. факультетів*. – К.: Вид.-поліграф. центр “Київський університет”, 2005. – 247 с. 14. *Handbook of optics / sponsored by Optical Society of America: M. Bass in chief*. – 2nd ed. – 1995.