

О.П. Овчаренко<sup>1</sup>, В.І. Білозерцева<sup>2</sup>, Д.О. Гаман<sup>2</sup>

## Оптичні характеристики вузькосмугових фільтрів порушеного повного внутрішнього відбивання з нерозщепленою смугою пропускання

<sup>1</sup>Харківський Національний Університет ім. В.Н. Каразіна, пл. Свободи 4, 61022, Харків, Україна,  
e-mail: [apovcharenko@karazin.ua](mailto:apovcharenko@karazin.ua)

<sup>2</sup>Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків,  
Україна, e-mail: [biloz@mail.ru](mailto:biloz@mail.ru)

В цій роботі розглянуто оптичні характеристики вузькосмугових п'ятишарових фільтрів порушеного повного внутрішнього відбивання з нерозщепленою смугою пропускання. Показано, що усунення розщеплення смуги пропускання досягається зміною товщини середнього шару.

**Ключові слова:** оптичний вузькосмуговий фільтр, порушене повне внутрішнє відбивання.

Стаття постуила до редакції 01.04.2013; прийнята до друку 15.06.2013.

### Вступ

Існує маловідома, практично така, що не увійшла до підручників і монографій особливість поведінки амплітудного коефіцієнта пропускання межі двох середовищ при куті падіння, що перевищує критичний. А саме той факт, що при куті падіння  $q_0$ , що відповідає максимальній різниці фаз для відбитих  $S$ - і  $P$ - компонент поляризації, модулі амплітудних коефіцієнтів пропускання (визначених як відношення відповідних складових електричних векторів) однакові [1 - 3].

Наслідком цієї особливості є існування "особливого" кута  $q_0$ , при якому для шару з показником заломлення  $n$ , поміщеного між призми з показниками заломлення  $n_0 > n$ , виявляються тотожно рівними енергетичні коефіцієнти відбивання  $R_S \equiv R_P$  і пропускання  $T_0 = T_S \equiv T_P$  незалежно від товщини шару і довжини хвилі. При кутах падіння з призми, менших  $q_0$ , як і зазвичай,  $T_S < T_P$ , а при кутах падіння, більших  $q_0$ , це співвідношення стає зворотним,  $T_S > T_P$ . Кут  $q_0$  дорівнює

$$q_0 = \arccos \left( \sqrt{\frac{n_0^2 - n^2}{n_0^2 + n^2}} \right) \quad (1)$$

при цьому пропускання шару дорівнює

$$T_0 = \frac{1}{1 + \frac{(n_0^2 + n^2)^2}{4(n_0 n)^2} \operatorname{sh}^2 \left( \frac{2pnt \cos q_0}{l} \right)} \quad (2)$$

де  $t$  - геометрична товщина шару,  $\lambda$  - довжина хвилі.

Точний розрахунок матричним методом [4]

демонструє сказане.

### I. Результати моделювання та їх обговорення

На рис.1 показана спектральна залежність коефіцієнтів відбивання шару повітря з  $n = 1$  між призми з  $n_0 = 1,652$  при куті падіння на шар  $q = q_0 = 47^\circ$  і  $nt = 0,25\lambda_0$  (криві 1),  $nt = 0,75\lambda_0$  (криві 3). При цьому куті падіння  $R_S \equiv R_P$ . При  $nt = 0,75\lambda_0$  і падінні світла на шар під кутом  $q = 37^\circ < q_0$  (криві 2) -  $R_S > R_P$ , а під кутом  $q = 60^\circ > q_0$  (криві 4) -  $R_S < R_P$ .

У спектроскопії і інших розділах оптики такі фільтри можуть бути використані в якості неполяризуючого спектроподільвача. Також відмітимо, що із зростанням товщини шару росте й коефіцієнт відбивання. Якщо оптичну товщину шару записати як  $nt = 0,25d\lambda_0$ , то залежності рис. 1 можна розглядати як  $R(d)$  при  $\lambda_0/\lambda = 1$ .

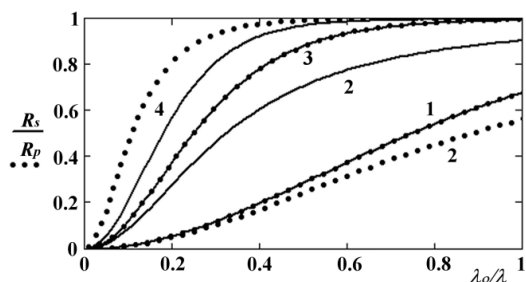
Звичайний вузькосмуговий фільтр порушеного повного внутрішнього відбивання (ППВВ) містить усього лише три шари [5 - 7], але при цьому має істотно розщеплену на  $S$ - і  $P$ - компоненти смугу пропускання. На рис. 2 показано будову такого фільтру.

Розрахована матричним методом [4] спектральна залежність смуг пропускання тришарового фільтру ППВВ виду  $PLHLP$  представлено на рис. 3. Тут  $P$  - призми,  $H$  - шар з високим показником заломлення  $n_H = n_P = 2$ ,  $L$  - шари ППВВ з низьким показником заломлення  $n_L = 1,35$ .  $T = 0,5(T_S + T_P)$ .

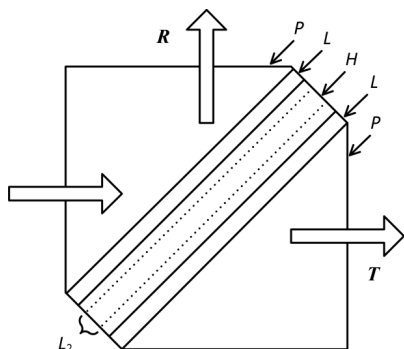
Проблема синтезу вузькосмугових фільтрів ППВВ з нерозщепленою на  $S$ - і  $P$ - компоненти смугою пропускання пов'язана з принциповою відмінністю фазових зсувів при повному внутрішньому відбиванні для альтернативних поляризацій.

Отримати нерозщеплену смугу пропускання фільтру вдалося, додавши в центр тришарового фільтру ще один шар ППВВ і отримавши фільтр виду  $PL_1HL_2HL_1P$ .

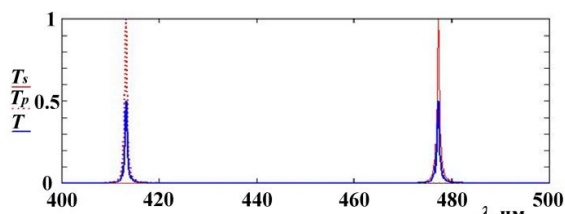
Нижче розглянутий п'ятишаровий фільтр з розподілом показників заломлення призми і шарів рівному  $2,0 - 1,35 - 2,0 - 1,35 - 2,0 - 1,35 - 2,0$ . Кут падіння світла з призми на фільтр дорівнює  $45^\circ$



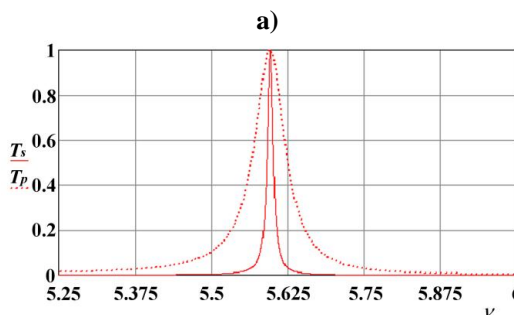
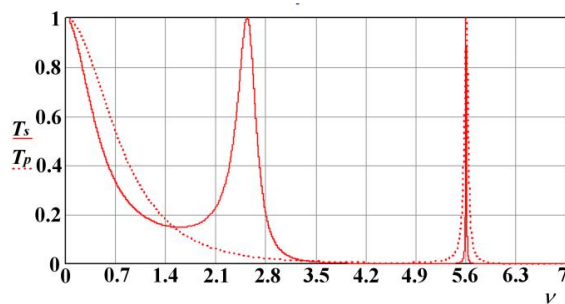
**Рис. 1.** Спектральна залежність коефіцієнтів відбивання шару повітря з  $n=1$  між призми з  $n_0=1.652$  при різних кутах падіння на шар: криві 1 –  $q=q_0=47^\circ$ ,  $nt=0.25\lambda_0$ ,  $R_S=R_P$ ; криві 2 –  $q=37^\circ < q_0$ ,  $nt=0.75\lambda_0$ ,  $R_S > R_P$ ; криві 3 –  $q=q_0=47^\circ$ ,  $nt=0.75\lambda_0$ ,  $R_S=R_P$ ; криві 4 –  $q=60^\circ > q_0$ ,  $nt=0.75\lambda_0$ ,  $R_S < R_P$ .



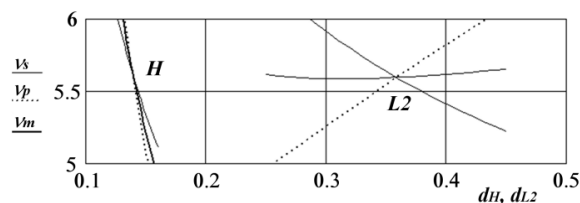
**Рис. 2.** Конструкція фільтру з використанням порушеного повного внутрішнього відбивання:  $P$ -призми,  $H$ - шар з високим показником заломлення,  $L$ - шари ППВВ з низьким показником заломлення.



**Рис. 3.** Розрахункова спектральна залежність енергетичних коефіцієнтів пропускання тришарового вузькосмугового світлофільтру при куті падіння світла  $\theta = 45^\circ$ .



**Рис. 4.** Оптичне пропускання фільтру з нерозщепленою смугою пропускання і розподілом оптичної товщини шарів  $1 - 0.14 - 0.35871 - 0.14 - 1$  (а). Те ж у розтягнутому масштабі (б).



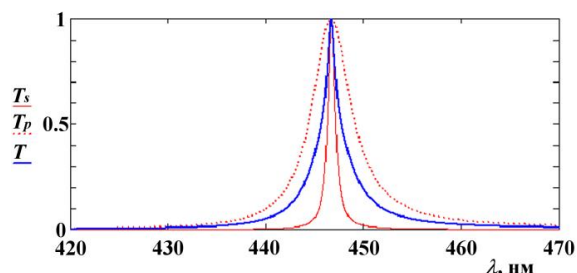
**Рис. 5.** Залежність положення смуг пропускання  $\nu_s$ ,  $\nu_p$  та  $\nu_m$  від оптичних товщин шарів  $H$  та  $L_2$ .

градусів.

На рис. 4 приведена спектральна залежність пропускання  $S$ - і  $P$ - складових для фільтру з розподілом відносних оптичних товщин шарів  $d$  в одиницях чверті деякої довжини хвилі  $\lambda_0$ , рівному  $1 - 0,14 - 0,35871 - 0,14 - 1$ . Для розширення досліджуваного спектрального діапазону в якості спектральної координати вибрана величина  $\nu = \lambda_0/\lambda$ , де  $\lambda$  - поточна довжина хвилі. Збіг положень  $\nu_s$ ,  $\nu_p$  смуг пропускання  $S$ - і  $P$ - компоненти досягнуто вибором товщини середнього шару.

Шари  $L_1$  слугують дзеркалами і їх коефіцієнт відбивання залежить від товщини (рис. 1). Зменшення товщини крайніх шарів призводить до значного зростання пропускання фону і напівширини смуг, але майже не впливає на їх положення.

Залежність положення смуг пропускання  $\nu_s$ ,  $\nu_p$  та  $\nu_m = 0.5(\nu_s + \nu_p)$  від оптичних товщин (в одиницях чверті деякої довжини хвилі  $\lambda_0$ ) шарів  $H$  ( $d_H$ ) та  $L_2$  ( $d_{L2}$ ) додається на рис. 5.



**Рис. 6.** Оптичне пропускання фільтру з нерозщепленою смугою пропускання і розподілом оптичної товщини шарів  $1 - 0.14 - 0.35871 - 0.14 - 1$  при  $\lambda_0 = 2500$  нм.

Зміна товщини шарів  $H$  призводить до значного зміщення по спектру одночасно обох складових смуг пропускання. При зміні товщини центрального шару, смуги пропускання  $S$  - і  $P$  - складових різних порядків зміщуються назустріч один одному при майже незмінній  $\nu_m$ . Момент збігу їх положення і дає

нерозщеплену смугу пропускання для фільтру ППВВ. При  $\lambda_0 = 2500$  нм ці смуги приведені на рис. 6.

## Висновок

Таким чином, в розглянутій конструкції фільтру ППВВ з нерозщепленою смугою пропускання, крайні шари  $L_1$  служать високовідбиваючими дзеркалами і визначають, в основному, пропускання фону і напівширину. Шари  $H$ , в основному, впливають на положення обох смуг пропускання, а центральний шар  $L_2$  є як би "підстроювальним" і зміна його товщини чинить основний вплив на взаємне розташування  $S$  - і  $P$  - смуг пропускання.

Розглянута особливість поведінки смуг пропускання характерна для усіх подібних досліджених нами п'ятишарових фільтрів ППВВ незалежно від набору показників заломлення і кутів падіння.

- [1] E.E. Hall, Phys. Rev. 15(2), 73 (1902).
- [2] V.A. Moskalev, I.M. Nagibina, N.A. Polushkina, V.L. Rudin, Prikladnaja fizicheskaja optika. pod obshh. red. V. A. Moskaleva (SPb., Politehnika, 1995).
- [3] L. Li, J.A. Dobrowolski, Optics Express 18(4), 3784 (2010).
- [4] M. Born, Je. Vol'f, Osnovy optiki (Nauka, Moskva, 1973).
- [5] A.F. Turner, J. Phys. Rad. 11(7), 444 (1950).
- [6] G.V. Rozenberg, UFN 47(2), 173 (1952).
- [7] A.A. Korobko-Stefanov, UFN 42(3), 433 (1950).

О.Р. Ovcharenko<sup>1</sup>, V.I. Bilozertseva<sup>2</sup>, D.O. Gaman<sup>2</sup>

## Optical Characteristics of Nonsplit Narrowband Frustrated Total Internal Reflection Filter

<sup>1</sup>V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, 61022, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [apovcharenko@karazin.ua](mailto:apovcharenko@karazin.ua)

<sup>2</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21 Frunze str., 61002 Kharkiv, Ukraine, e-mail: [biloz@mail.ru](mailto:biloz@mail.ru)

In this paper the five-layer narrowband frustrated total reflection filter having identical positions of  $S$ - and  $P$ -component pass bands have been considered. It was shown, that such filter properties are achieved by a special selection of middle frustrated total reflection filter layer thickness.

**Keywords:** optical narrowband filter, frustrated total internal reflection.