

О.П. Овчаренко¹, В.І. Білозерцева², Д.О. Гаман²

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

¹Харківський Національний Університет ім. В.Н. Каразіна, пл. Свободи 4, 61022, Харків, Україна,
e-mail: apovcharenko@karazin.ua

²Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків,
Україна, e-mail: 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, λ - 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°

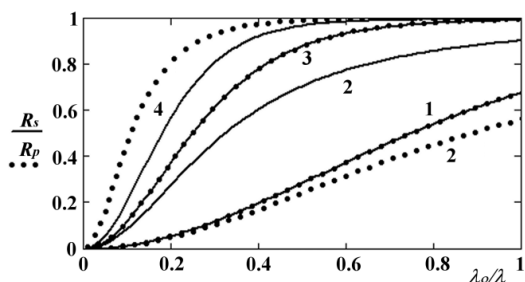


Рис. 1. Спектральна залежність коефіцієнтів відбивання шару повітря з $n=1$ між призмами з $n_0=1.652$ при різних кутах падіння на шар: криві 1 – $q=q_0=47^\circ$, $nt=0.25\lambda_0$, $R_s=R_p$; криві 2 – $q=37^\circ < q_0$, $nt=0.75\lambda_0$, $R_s > R_p$; криві 3 – $q=q_0=47^\circ$, $nt=0.75\lambda_0$,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

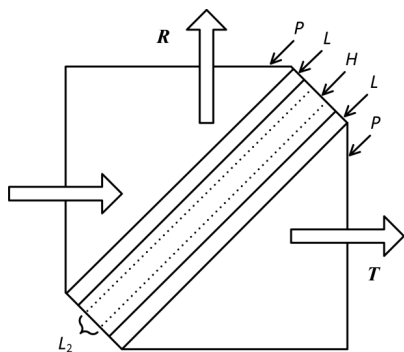


Рис. 2. Конструкція фільтру з використанням порушеного повного внутрішнього відбивання: P -призми, H - шар з високим показником заломлення, L - шари ППВВ з низьким показником заломлення.

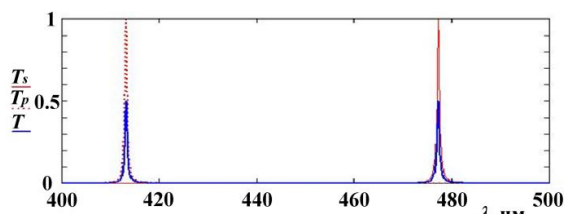


Рис. 3. Розрахункова спектральна залежність енергетичних коефіцієнтів пропускання тришарового вузькосмугового світлофільтру при куті падіння світла $\theta = 45^\circ$.

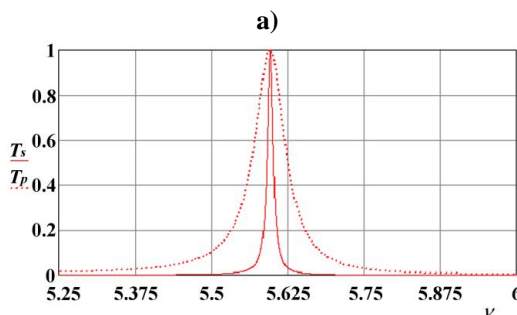
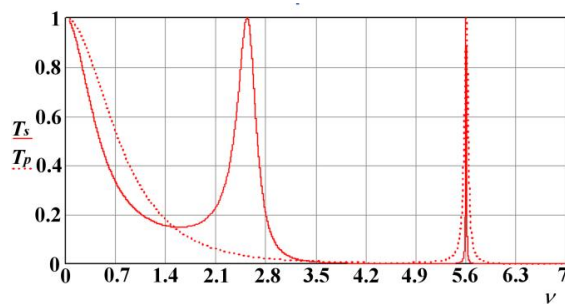


Рис. 4. Оптичне пропускання фільтру з нерозщепленою смугою пропускання і розподілом оптичної товщини шарів $1 - 0.14 - 0.35871 - 0.14 - 1$ (а). Те ж у розтягнутому масштабі (б).

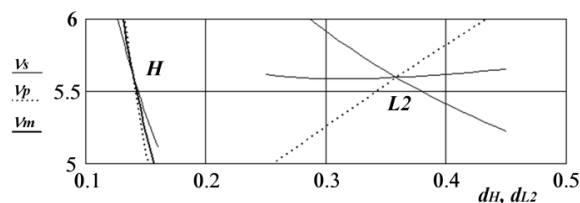


Рис. 5. Залежність положення смуг пропускання ν_s , ν_p та ν_m від оптичних товщин шарів H та L_2 .

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 λ_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 λ - поточна довжина хвилі. Збіг положень ν_s , ν_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 ν_s , ν_p та $\nu_m = 0.5(\nu_s + \nu_p)$ від оптичних товщин (в одиницях чверті деякої довжини хвилі λ_0) шарів H (d_H) та L_2 (d_{L2}) додається на рис. 5.

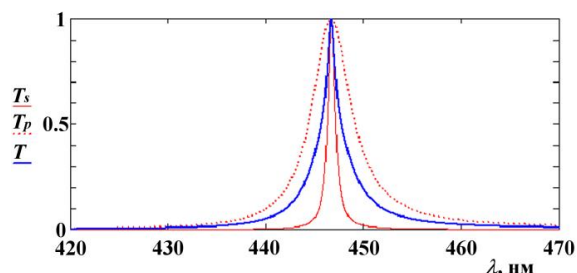


Рис. 6. Оптичне пропускання фільтру з нерозщепленою смугою пропускання і розподілом оптичної товщини шарів 1 - 0.14 - 0.35871 - 0.14 - 1 при $\lambda_0 = 2500$ нм.

Зміна товщини шарів H призводить до значного зміщення по спектру одночасно обох складових смуги пропускання. При зміні товщини центрального шару, смуги пропускання S - і P - складових різних порядків зміщуються назустріч один одному при майже незмінній ν_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] В.А. Москалев, И.М. Нагибина, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин, Прикладная физическая оптика. под общ. ред. В. А. Москалева (СПб., Политехника, 1995).
- [3] L. Li, J.A. Dobrowolski, Optics Express 18(4), 3784 (2010).
- [4] М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики (Наука, Москва, 1973).
- [5] A.F. Turner, J. Phys. Rad. 11(7), 444 (1950).
- [6] Г.В. Розенберг, УФН 47(2), 173 (1952).
- [7] А.А. Коробко-Стефанов, УФН 42(3), 433 (1950).

О.Р. Ovcharenko¹, V.I. Bilozertseva², D.O. Gaman²

Optical Characteristics of Nonsplit Narrowband Frustrated Total Internal Reflection Filter

¹V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, 61022, Kharkiv, Ukraine, e-mail: apovcharenko@karazin.ua,

²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21 Frunze str., 61002 Kharkiv, Ukraine, e-mail: 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.