

## МЕТОДИ КОРЕКЦІЇ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТОНКІ ПЛІВКИ

Розглянуто принципи формування та корекції передавальних характеристик оптичних фільтрів на тонких плівках. Запропоновано методи збільшення загасання в смузі загородження та підвищення лінійності передавальних характеристик фільтрів. Визначено принципи корекції розміщення смуг пропускання та загородження по довжинам хвиль. Зроблено висновок про напрямки оптимізації конструкції відбиваючого фільтра.

**Ключові слова:** оптичний фільтр, смуга пропускання, коефіцієнт поглинання.

Рассмотрены принципы формирования и коррекции передаточных характеристик оптических фильтров на тонких пленках. Предложены методы увеличения затухания в полосе заграждения и повышения линейности передаточных характеристик фильтров. Определены принципы коррекции размещения полос пропускания и заграждения по длинам волн. Сделан вывод о направлении оптимизации конструкции отражающего фильтра.

**Ключевые слова:** оптический фильтр, полоса пропускания, коэффициент поглощения.

The principles of the formation and correction of the transmission characteristics of thin films optical filters are considered. The methods of increasing the damping in the stop band and improving the linearity of the transmission characteristics of the filters are proposed. Determination of correction principles of wavelength characteristics is performed. The conclusion about the direction of the design optimizing of the reflective filter is produced.

**Key words:** optical filter, bandwidth, absorption coefficient.

### Вступ

На цей час в системах оптичного зв'язку знайшли широке застосування оптичні фільтри на тонких плівках [1,2]. В основному, вони застосовуються для демультимплексування оптичних сигналів [3]. Методи розрахунку їх характеристик наведені в [1], але вони не враховують квантової природи світла. На відміну від класичної електродинаміки світловий сигнал являє собою сукупність світлових квантів, що розповсюджуються, при певних умовах, не взаємодіючи один з одним, і взаємодія його з речовиною визначається згідно з законами квантової електродинаміки [4].

Отже, для підвищення точності моделювання тонкоплівкових фільтрів та розрахунку їх характеристик доцільно застосовувати принципи квантової електродинаміки. Враховуючи це, в роботі були використані принципи моделювання та розрахунку передаточних характеристик багат шарових

оптичних фільтрів, запропоновані в [5].

Враховуючи наявність в конструкції фільтра таких степенів свободи для його побудови, як показники заломлення оптичних шарів, порядок їх розміщення та кількість, має місце потреба у визначенні впливу цих факторів на формування та можливість корекції передавальних характеристик. Це особливо важливо, оскільки самі конструкції фільтрів поділяються за призначенням [6], і вид передавальних характеристик визначається, в основному, ним.

### Теоретична частина

Для визначення впливу на характеристики оптичного фільтру порядку розміщення оптичних шарів та з метою перевірки оптимальності фазових характеристик парціальних сигналів, відбитих від різних границь розділу оптичних плівок в роботі було розглянуто конструкцію відбиваючого оптичного фільтра, що складався з трьох плівок (рис.1,2) з показниками заломлення шарів

$n_2$ ,  $n_3$ , та  $n_4$  відповідно. При цьому були використані рекомендації з побудови такого фільтра, вказані в [6]: фільтр повинен містити певне число діелектричних плівок з різними показниками заломлення, але з однаковою оптичною товщиною, що дорівнює  $\lambda/4$ , причому розміщені плівки таким чином, щоб між двома плівками з більшим показником заломлення  $n_1$  була розміщена плівка з малим показником заломлення  $n_2$ , і, на додаток до того, фільтр починається та закінчується плівкою з високим показником заломлення.

Показник заломлення повітря  $n_1$  дорівнював одиниці. Вважалось, що всі кванти надходять на вхід фільтру одночасно з початковою фазою  $\varphi_0=0$ . Між показниками заломлення шарів та значеннями їх товщин ( $x_1, x_2, x_3$ ) виконувалось співвідношення:

$$(n_2/n_3)(x_1/x_2)=(n_3/n_4)(x_2/x_3)=1. \quad (1)$$

Так забезпечувалась рівність фазових зсувів в кожному шарі для квантів з однаковими довжинами хвиль. При відбитті сигналу враховувався той факт, що фаза сигналу, відбитого від шару з більшим показником заломлення, змінювалась на  $\pi$ .

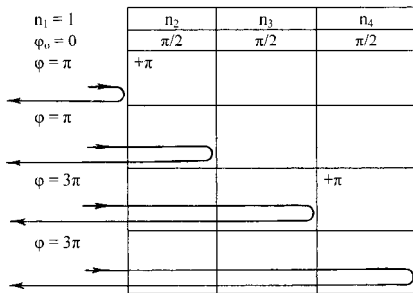


Рис. 1. Фазові характеристики сигналів, відбитих від границь розділу між різними оптичними шарами при фазовому зсуві в кожному шарі, що дорівнює  $\pi/2$ .

Як видно з графіків, в діапазоні довжин хвиль пропускання оптичного сигналу (рис.2) парціальні сигнали, відбиті від різних границь розділу, є синфазними (фазовий зсув між ними кратний  $2\pi$ ), і сумарний сигнал, що утворюється на виході фільтру внаслідок складання синфазних сигналів, є максимальним. Рівень передаточного загасання при цьому порівняно невеликий. В діапазоні довжин хвиль загородження (рис.2) пар-

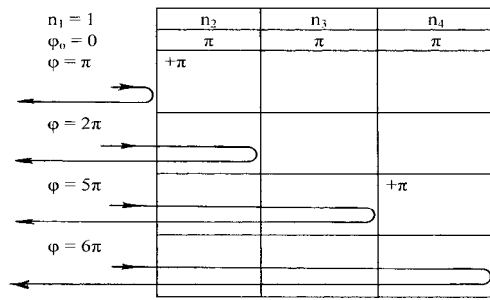


Рис. 2. Фазові характеристики сигналів, відбитих від границь розділу між різними оптичними шарами при фазовому зсуві в кожному шарі, що дорівнює  $\pi$ .

ціальні сигнали, відбиті від сусідніх границь розділу, є протифазними, і частково компенсують один одного. Сигнал на виході фільтру при цьому є мінімальним, а перехідне загасання порівняно велике. Таким чином, це підтверджує оптимальність конструкції відбиваючого фільтра щодо співвідношення між показниками заломлення оптичних шарів та їх розташування. Аналогічні результати властиві для фільтрів подібної конструктивної побудови з більшим числом плівок.

Також в роботі було розглянуто принципи оптимізації співвідношення значень показників заломлення сусідніх плівок відбиваючого фільтра з метою підвищення передаточного загасання в режимі загородження. Для збільшення загасання в смузі загородження необхідне виконання умови компенсації квантів, відбитих від попередньої границі між шарами з номерами  $i$  та  $i+1$ , та квантами, відбитими від наступної границі між шарами  $i+1$  та  $i+2$  (рис.3).

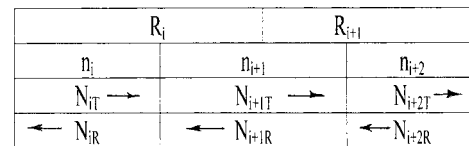


Рис. 3. Розподіл відбитих квантів та квантів, що пройшли між сусідніми шарами певної ділянки оптичного фільтра.

Тут  $N_{iT}$  – кількість квантів, що проходить через оптичний шар з номером  $i$  в напрямку до границі розділу,  $N_{iR}$  – кількість квантів, що відбивається від границі розділу між шаром  $i$  та  $i+1$ ,  $n_i$  – значення показника за-

ломлення  $i$  – того шару,  $R_i$  – коефіцієнт відбиття між шаром  $i$  та  $i+1$ . Враховуючи той факт, що кванти, відбиті від сусідніх границь розділу, є протифазними, для повної компенсації при їх інтерференції необхідне виконання умови:

$$N_{iR} = N_{i+1R}. \quad (2)$$

При цьому ми вважаємо, в першому наближенні, що відсутнє повторне відбиття квантів від границь розділу.

Беручи до уваги співвідношення

$$N_{iR} = N_{iT}R_i, \quad (3)$$

отримаємо кількість квантів, що пройшли в шар  $i+1$ :

$$N_{i+1T} = N_{iT} - N_{iR} = N_{iT}(1 - R_i), \quad (4)$$

та, з урахуванням (4), кількість квантів, що відбилась від границі розділу між шаром  $i+1$  та  $i+2$

$$N_{i+1R} = N_{i+1T}R_{i+1} = N_{iT}(1 - R_i)R_{i+1}. \quad (5)$$

Підставивши (5) в співвідношення (2) та враховуючи (3) отримаємо рекурентне співвідношення для коефіцієнтів відбиття:

$$R_{i+1} = R_i / (1 - R_i). \quad (6)$$

Якщо в формулу (6) замість коефіцієнтів відбиття підставити їх вирази через показники заломлення шарів [1], то отримаємо вираз, який визначає оптимальний показник заломлення шару  $i+2$  при відомих показниках заломлення шарів  $i$  та  $i+1$ :

$$n_{i+2} = \frac{n_{i+1}(1 \pm \sqrt{\gamma})}{1 \mp \sqrt{\gamma}}, \quad (7)$$

де  $\gamma = \frac{(n_{i+1} - n_i)^2}{4n_{i+1}n_i}$ .

Отже, при розробці конструкції відбиваючого оптичного фільтра для підвищення загасання в смузі загородження необхідно провести корекцію показників заломлення оптичних шарів з точки зору умов компенсації квантів, відбитих від сусідніх границь розділу оптичних плівок.

З метою корекції передавальних та фазових характеристик було розроблено метод, спрямований на досягнення цієї мети [7].

Метод розглянуто на прикладі фільтра, що використовує дві оптичних плівки. На

рис.4 та рис.5 наведено фазову передавальну характеристику фільтра, розраховані в залежності від фазового зсуву, що вноситься одиничним оптичним шаром. При цьому в якості вихідного сигналу розглядався загальний сигнал, відбитий від структури фільтра. На графіках спостерігається (періодом  $\pi$ ) періодичність характеристик фільтра вздовж осі абсцис (період дорівнює 3,14 рад). Значення показників заломлення першого  $n_1$  та другого  $n_2$  шару оптичного фільтра склали величини 2,2 та 1,5 відповідно. Товщини шарів вибирались такими, щоб забезпечувалась рівність фазових зсувів в кожному шарі для квантів світла з однаковими довжинами хвиль.

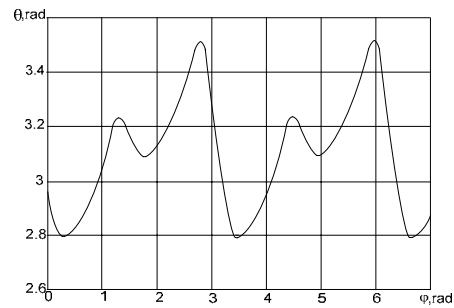


Рис.4. Фазова характеристика фільтра.

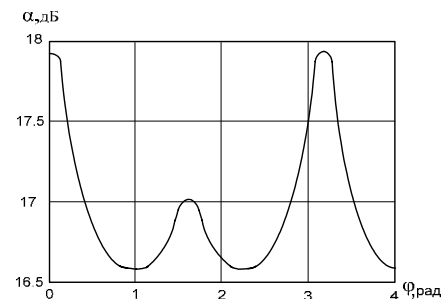


Рис.5. Передавальна характеристика фільтра.

Як видно з передаточної характеристики (рис.5), в смузі пропускання існує помітний провал, що проявляється в підвищенні загасання в центрі смуги. В свою чергу фазова характеристика в тій же смузі пропускання також має яскраво виражену нерівномірність, що складає величину порядку 0,1 рад.

З метою мінімізації нерівномірності експлуатаційних характеристик в смузі пропускання оптичного фільтра було проведено дослідження впливу внесених в оптичні шари певного (наперед заданого) рівня втрат за рахунок незначного збільшення

коефіцієнта поглинання. Зміна амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик оптичних фільтрів задавалось рівнем оптичних втрат  $\alpha$ , що вносились в той чи інший шар. При внесенні втрат в перший шар та збільшенні їх рівня від 0,5 до 3,0 дБ спостерігалось значне погіршення експлуатаційних параметрів двохшарового оптичного фільтра, що полягало в суттєвому збільшенні загасання в смузі пропускання та зменшенні втрат в смузі загородження. При цьому нерівномірність передаточної характеристики в смузі пропускання фільтра зменшувалась незначно. Внесення оптичних втрат в другий шар фільтра сприяло погіршенню його функціональних параметрів (рис.6), але рівень такого погіршення був помітно нижчим, ніж в першому випадку. Так, для передаточної характеристики перепад між значеннями  $\alpha$  в смузі загородження та пропускання зменшувався усього лише до значення в 3,5 дБ. Особливо слід відмітити те, що при цьому була досягнуто практично постійне значення коефіцієнта передачі (рівня внесених втрат) в смузі пропускання (нерівномірність не більше 0,02 дБ при  $\alpha = 3,0$  дБ). Нерівномірність фазової характеристики в цій же смузі також значно зменшувалась, і вона ставала при цьому практично лінійною (рис.7).

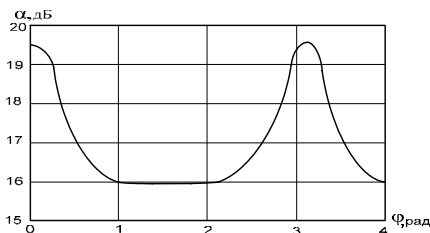


Рис.6. Передавальна характеристика фільтра після корекції.

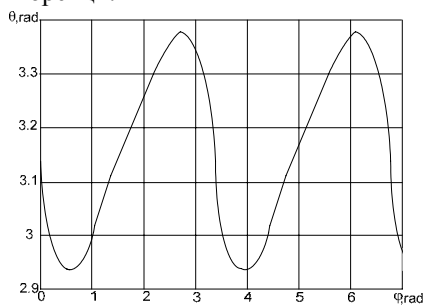


Рис.7. Фазова характеристика фільтра після корекції.

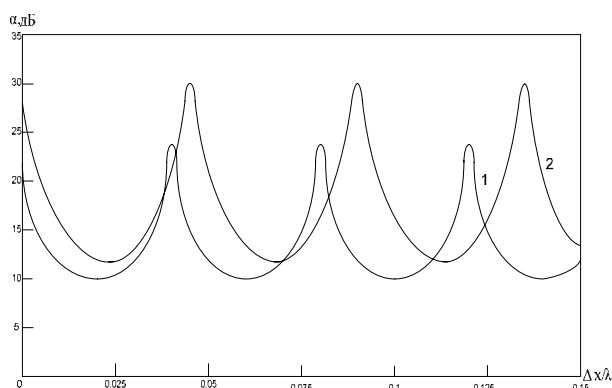
Отримані результати обумовлені, в першу чергу, суттєвою корекцією степені впливу квантів світла, відбитих від зовнішньої границі другого шару на нерівномірність передаточної характеристики в смузі пропускання. Внесення реальних оптичних втрат в другий шар та підбір їх конкретного значення дозволяє, з однієї сторони, зменшити рівень потоку відбитих квантів настільки, щоб згладити хід передаточної характеристики в смузі пропускання, зробивши величину внесених втрат в цій смузі практично постійною, а, з іншої сторони, лінеаризувати хід фазочастотної характеристики.

Вплив на передавальні характеристики фільтра внесення неоднорідності (градієнтності) показника заломлення в оптичний шар було розглянуто в [8].

В роботі представлено передаточні характеристики градієнтних фільтрів, що були розраховані за розробленою в [8] методикою. Незалежним параметром в цьому випадку було взято товщину елементарної плівки, нормовану до довжини хвилі:  $\Delta x/\lambda$ . Як видно з графіків, смуги пропускання та загородження таких фільтрів розташовані еквідистантно, тобто так само як і інформаційні канали групового сигналу системи зі спектральним розділенням каналів. Це дозволяє використання градієнтних фільтрів в подібних системах для фільтрування групового сигналу з метою підвищення співвідношення сигнал-шум.

На рис.8 приведено передаточні характеристики фільтра для різних значень показника заломлення передньої поверхні плівки  $n_1$  при фіксованому значенні показника задньої поверхні  $n_2$ , що дорівнює 2,5. При цьому початкові значення показників  $n_1$  та  $n_2$  однакові та дорівнюють 2,5. Тобто цей випадок відповідає конструкції фільтра зі сталим значенням показника заломлення плівки.

Як видно з графіків, зі зменшенням  $n_1$  змінюється період передаточної характеристики в більшу сторону. При цьому перепад між загасанням в смугах пропускання і загородження також змінюється в більший бік.



1)  $n_1=2,5; n_2=2,5$       2)  $n_1=2,0; n_2=2,5$

Рис.8. Передаточні характеристики оптичного фільтра при фіксованому показнику заломлення задньої поверхні плівки.

### Висновки

З отриманих результатів випливає, що можна провести корекцію показників заломлення оптичних шарів фільтрів з точки зору умов компенсації квантів, відбитих від сусідніх границь розділу оптичних плівок з метою підвищення втрат в смугах загорождення. Показано, що за рахунок внесення певних втрат в конкретні шари оптичного фільтра можна значно покращити рівномірність та лінійність його передавальних та фазових характеристик. Визначено, що за рахунок зміни конструктивних параметрів градієнтного оптичного фільтра з лінійним законом зміни показника заломлення, таких, як граничні значення показників заломлення на поверхнях оптичної плівки, можна досягти корекції параметрів передавальної характеристики фільтра а саме: розміщення смуг пропускання та загорождення по довжинам хвиль, та значень внесеного загасання. Це дозволяє розширити галузь застосування тонкоплівкових оптичних фільтрів, в тому числі в оптичних системах зв'язку зі спектральним розділенням каналів для підвищення співвідношення сигнал/шум в оптичних каналах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. – М.: Высшая школа, 1966. – 556 с.
2. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света: Учеб. пособие для приборостроительных вузов оптических специальностей. 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 332 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – Москва: Техносфера, 2003. – 440 с.
4. Фейнман Р. КЭД – странная теория света и вещества. – М.: Наука, 1988. – 144с.
5. Sukach G.O., Manko V.O. Method of the multilayer optical filters numerical modelling // Вісник ДУІКТ.-2006. – 4(4). – С.331-333.
6. Справочник технолога-оптика: Справочник / И.Я. Бубис В.А. Вейденбах, И.И. Духопел и др.; Под общ. ред. С.М. Кузнецова. – Ленинград: Машиностроение, 1983. – 414 с.
7. Сукач Г.А., Манько А.А., Манько В.А. Об одном методе коррекции передаточных характеристик многослойных тонкопленочных оптических фильтров // Зв'язок. – 2008. – №5-6. – С.53-55.
8. Сукач Г.О., Манько В.О., Манько О.О. Моделирование оптических фильтров, що використовують тонкі плівки з градієнтним показником заломлення // Вісник ДУІКТ. – 2007. – 5(4). – С.59-62.