

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАНОСТРУКТУР СЛОИСТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2014 г. Г.Л. КИСЕЛЕВ

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики
e-mail: kisselev@mirea.ru

Идентификация наноструктуры покрытий оптических изделий, по измеренным спектральным характеристикам, представляет собой большой практический интерес при проектировании приборов квантовой электроники, в спектроскопии, астрономии и многих других областях оптического приборостроения. Однако, проблема идентификация многослойных интерференционных оптических покрытий является трудно решаемой. Задача обычно решается путем многопараметрической оптимизации показателей преломления, толщин слоев и их числа [1...10].

Несмотря на огромное число публикаций, посвященных этой проблеме, у большинства исследователей сложилось убеждение, что задача идентификации тонкослойных оптических покрытий не имеет решений.

Покажем, что проблема идентификации покрытий имеет решение [11].

Рассмотрим дисперсионные зависимости коэффициента отражения для плоскостройной среды.

Комплексный коэффициент отражения представляет собой запись двух характеристик: амплитудно-частотной $|\rho(\omega)|$ и фазово-частотной $\varphi(\omega)$.

$$\rho(\omega) = |\rho(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) = \rho_1(\omega) + i\rho_2(\omega), \quad (1)$$

$$\text{где } |\rho(\omega)| = \sqrt{\rho_1^2(\omega) + \rho_2^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{\rho_1(\omega)}{\rho_2(\omega)}.$$

Коэффициент отражения от первого слоя (последнего от подложки)

ρ_1 - комплексное число, может быть найден как [11]

$$\rho_1 = \frac{1}{\Omega} \sum_0^{\Omega} \rho(\omega), \quad \text{где } \Omega - \text{период спектральной функции} \quad (2)$$

Тогда n_1 и z_1 для случая $\vartheta_s = 0$ определяются как

$$n_1 = n_0 \frac{1 + \rho_1}{1 - \rho_1}, \quad z_1 = 0. \quad (3)$$

Представим $\rho_{1,s} \equiv \rho(\omega)$ в виде дробно-линейного преобразования

$$\rho_{1,s} = \frac{\rho_1 + \rho_{2,s} \exp(i2\varphi_1)}{1 + \rho_1 \rho_{2,s} \exp(i2\varphi_1)} \quad (4)$$

Тогда, используя обратное преобразование, найдем

$$\rho_{2,s} = \frac{\rho_{1,s} - \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_{1,s}} \exp(-i2\varphi_1) \quad (5)$$

частотную характеристику слоистой системы без первого слоя.

Эти преобразования можно рассматривать как рекуррентные для последовательного нахождения всех существенных параметров слоистой системы.

Действительно, осуществляя последовательное выделение постоянной составляющей, находим

$$\rho_s = \frac{1}{\Omega} \sum_0^{\Omega} \rho_{s,s}(\omega) \quad (6)$$

с последующим обратным дробно-линейным преобразованием

$$R_{s+1,s} = \frac{\rho_{s,s}(\omega) - \rho_s}{1 - \rho_s \rho_{s,s}(\omega)} \exp(-i2\varphi_s), \quad (7)$$

где $\varphi_s = \frac{\omega}{c} n_s z_s = \omega t_s$

Затем последовательно осуществляется нахождение показателей преломления слоев

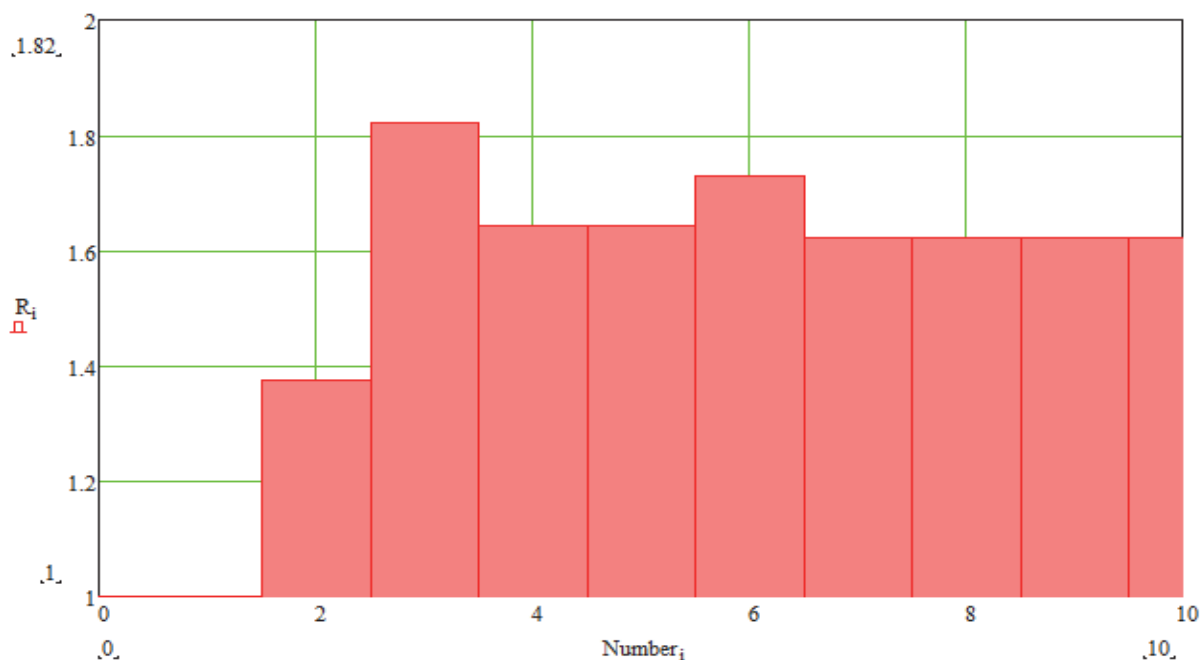
$$n_{s+1,ss} = n_{s,ss} \frac{1 + \rho_s \cos \vartheta_s}{1 - \rho_s \cos \vartheta_{s+1}} \quad \text{для } s\text{- компоненты поляризации}$$

$$n_{s+1,pp} = n_{s,pp} \frac{1 + \rho_s \cos \vartheta_{s+1}}{1 - \rho_s \cos \vartheta_s} \quad \text{для } p\text{- компоненты поляризации}$$

Пример идентификации:



Спектральная характеристика многослойного просветляющего покрытия



Наноструктура четырехслойного покрытия. Толщина первого слоя 137 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М. Вольф Э. Основы оптики - М.: Наука, 1970. - 856 с.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. - М.: Наука, 1973.
3. Гребенщиков И.В., Власов А.Г., Суйковская Н.В. Просветление оптики - М.-Л.: Гос-техиздат, 1946. - 212 с.
4. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. - М.: Физ-мат лит., 1958. - 570 с.
5. Телен А. Конструирование многослойных интерференционных светофильтров Физика тонких плёнок под редакцией Э. Туна и Г. Хасса. - М.: Мир, 1972. Том 5.
6. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия - Л.: Машиностроение, 1977. - 264 с.
7. Яковлев П.П., Мошков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. - М.: Машиностроение, 1967. - 192 с.
8. Бернинг П.Х. Теория и методы расчёта оптических свойств тонких плёнок. Физика тонких плёнок под редакцией Э. Туна и Г. Хасса - М.: Мир, 1967. Том 9.
9. Лапшин Б.А. Новая теория и расчет фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий. СПб: Наука, - 1998. - 181 с.
10. Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебное пособие по курсу «Оптические покрытия». - СПб.: СПбГУИТМО, 2005.
11. Киселев Г.Л. Обратные задачи оптики слоистых сред. (Новый подход к синтезу слоистых структур). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, ISBN: 978-3-659-48789-7.