

## КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРЕЗАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

© 2009 г. Е. Н. Котликов\*, доктор физ.-мат. наук; А. Н. Тропин\*\*

\* Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

\*\* НИИ “Гириконд”, Санкт-Петербург

E-mail: ekotlikov@mail.ru, tropal@mail.ru

В работе рассмотрены вопросы синтеза дополнительных структур, позволяющих корректировать характеристики изготовленного покрытия. Для отрезающих фильтров предложены два способа коррекции спектральных характеристик, позволяющих достигнуть максимального пропускания на заданной длине волны при одновременном сохранении блокирования излучения в коротковолновой области спектра.

Коды OCIS: 310.3840.

Поступила в редакцию 03.07.2008.

При реализации на практике многослойных интерференционных покрытий их спектры пропускания (отражения) всегда отличаются от расчетных. Случайные ошибки при измерении толщины осаждаемого слоя, зависимость оптических констант пленок от технологических условий их получения, а также систематические ошибки, обусловленные присутствием в технологическом процессе человеческого фактора, являются причинами отклонения спектральных характеристик получаемых покрытий от рассчитанных теоретически [1–3].

Вопросы синтеза дополнительных структур, которые позволяют исправить ошибки, возникающие при напылении многослойного покрытия путем добавления одного или нескольких слоев, поднимались достаточно давно [1, 2]. Они представляют практический интерес для конструкторов, занимающихся проектированием многослойных покрытий, однако эти вопросы слабо отражены в литературе. В настоящей работе рассматриваются способы коррекции спектральных характеристик изготавливаемых отрезающих коротковолновых покрытий. Покрытия с подобными характеристиками находят широкое применение при изготовлении узкополосных интерференционных фильтров (ИФ).

Задачей коррекции стояло требование достижения коэффициента пропускания, близкого к 100% для некоторой заданной длины волны  $\lambda_0$ , на которую настроен интерференционный фильтр, сохранив блокирование излучения в области коротковолновых крыльев интерференционного фильтра (рис. 1).

Для коррекции спектральных характеристик нами разработаны две методики. Первая базируется на просветлении эквивалентного слоя однослойным или двухслойным покрытием по известным выражениям, полученным в аналитическом виде. Вторая –

основана на увеличении пропускания на заданной длине волны при изготовлении системы, аналогичной интерферометру Фабри–Перо [1].

Первый метод базируется на известном [2] положении, что свойства многослойной структуры, состоящей из однородных по своим оптическим свойствам пленок, можно описать с помощью характеристической матрицы (ХМ). Корректируемая структура и наносимый корректирующий слой рассматривались как двухслойное просветляющее покрытие на длину волны  $\lambda_0$ .

ХМ непоглощающего двухслойного покрытия имеет вид

$$M(n, f) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \Psi(n, f)N = \begin{pmatrix} \cos(f) & (i/n)\sin(f) \\ in\sin(f) & \cos(f) \end{pmatrix} N, \quad (1)$$

где  $n$  и  $f$  – показатель преломления и фазовая толщина корректирующего слоя соответственно. Структура корректируемого покрытия, а значит и его характеристическая матрица  $N$  определяются по его спектральным характеристикам. Задача сводится к определению ХМ второго слоя  $\Psi(n, f)$ , откуда можно будет получить значения  $n$  и  $f$  для корректирующего слоя.

Условие равенства нулю коэффициента отражения имеет вид

$$\begin{cases} n_0 m_{11} - n_s m_{22} = 0 \\ n_0 n_s m_{12} - m_{21} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_0$  и  $n_s$  – показатели преломления первой и последней сред соответственно.

При решении системы уравнений (2) с учетом (1) находятся  $n$  и  $f$  для корректирующего слоя, который при необходимости можно заменить на двухслойное покрытие с требуемыми коэффициентами преломления.

Идея второго метода заключается в создании тонкослойной системы  $Z_1$ -P- $Z_2$ , по своей структуре аналогичной интерферометру Фабри-Перо (ИФП), настроенному на  $\lambda_0$ . Зеркалом  $Z_1$ , входящим в ИФП, служит покрытие, спектральную характеристику ко-

торого необходимо корректировать. Для того чтобы получить ИФП на готовое зеркало  $Z_1$  наносят разделительный слой P, который определяет разность хода лучей в интерферометре, и непоглощающую тонкослойную систему  $Z_2$ , эквивалентную по оптическим свойствам второму зеркалу [1].

Внутри многослойной системы выбираются две соседние границы раздела и применяется формула Фабри-Перо. В результате получается следующее соотношение:

$$T(\lambda) = T_0(\lambda)F(\lambda) = \frac{T_1(\lambda)T_2(\lambda)}{[1 - R(\lambda)]^2} \frac{1}{1 + 4R(\lambda)/[1 - R(\lambda)]^2 \sin^2[(\varphi_1 + \varphi_2 - \beta)/2]}, \quad (3)$$

где  $T(\lambda)$  – коэффициент пропускания всей многослойной системы,  $T_1(\lambda)$  – коэффициент пропускания подсистемы I,  $T_2(\lambda)$  – коэффициент пропускания подсистемы II,  $R(\lambda) = [R_1(\lambda)R_2(\lambda)]^{1/2}$ ,  $R_1(\lambda)$  и  $R_2(\lambda)$  – коэффициенты отражения подсистем I и II для света, падающего со стороны прослойки – разделительного слоя между подсистемами,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – соответствующие  $R_1$  и  $R_2$  фазовые сдвиги при отражении,  $\beta = 4\pi nd/\lambda$ , где  $n$  и  $d$  – показатель преломления и геометрическая толщина прокладки.

Важная особенность этой формулы состоит в том, что фазовые и амплитудные соотношения можно рассматривать независимо:  $T_0(\lambda)$  зависит только от коэффициентов пропускания подсистем,  $F(\lambda)$  зависит в первую очередь от фазовых соотношений при отражении от двух подсистем и от толщины прокладки между ними. Оба эти множителя никогда не превышают единицы.

Из формулы (3) следует, что

$$T_0(\lambda) = 1 \text{ только при } R_1(\lambda) = R_2(\lambda) \quad (4)$$

и

$$F(\lambda) = 1 \text{ только при } R(\lambda) = 0 \text{ или } \sin [(\varphi_1 + \varphi_2 - \beta)/2] = 0. \quad (5)$$

Равенствами (4) и (5) авторы руководствовались в процессе предварительного проектирования покрытия с необходимыми характеристиками на основе двух подсистем с известными свойствами.

На практике приведенные подходы для коррекции спектральных характеристик покрытий могут быть реализованы следующим образом. Сначала рассчитываются и напыляются отрезающее покрытие, затем снимаются спектры пропускания и отражения. Здесь необходимо удостовериться в отсут-

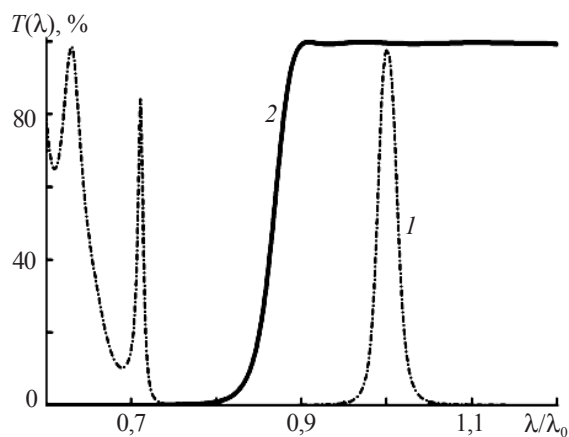


Рис. 1. Подавление коротковолнового крыла узкополосного интерференционного фильтра. 1 – спектр узкополосного ИФ, 2 – спектр отрезающего фильтра.

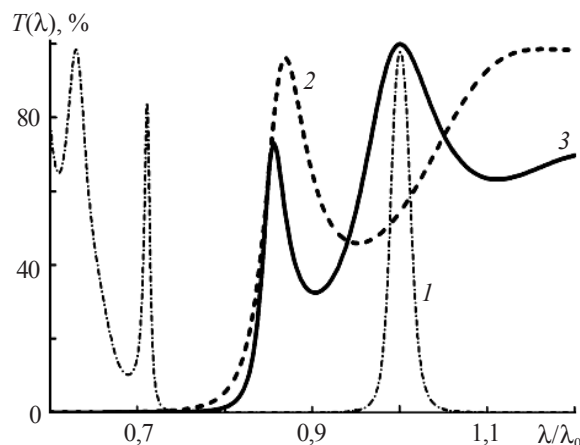


Рис. 2. Коррекция спектральной характеристики отрезающего фильтра. 1 – спектр узкополосного ИФ, 2 – спектр экспериментально полученного покрытия (до коррекции), 3 – спектр отрезающего покрытия с нанесенным корректирующим покрытием.

ствии поглощения на требуемой длине волны  $\lambda_0$ , т. е.  $R(\lambda_0) + T(\lambda_0) \approx 1$ .

Вариация толщины каждого слоя не может иметь значения больше некоторого, которое определяется всей совокупностью технологических и метрологических подходов, применяемых в данном конкретном случае. Принимая во внимание этот факт, с помощью программы расчета [3] синтезировалась структура с ошибками, спектр которой повторяет спектр полученного покрытия. Первым или вторым способом рассчитывались и напылялись корректирующие слои. В большинстве случаев, если синтез структуры с ошибками проводился верно, удавалось добиться на требуемой длине волны пропускания, близкого к 100%. На рис. 2 представлены результаты коррекции спектральной характеристики отрезающего покрытия для  $\lambda = \lambda_0$ , реализованного с ошибками, методом ИФП.

Таким образом, при изготовлении интерференционных покрытий имеется возможность исправить их спектральные характеристики путем добавления одного или нескольких корректирующих слоев различной толщины, а также удается получить пропускание, близкое к 100% на заданной длине волны вне зависимости от способа конструирования и количества слоев многослойной структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Фурман Ш.А.* Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
2. *Яковлев П.П., Мешков Б.Б.* Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987. 185 с.
3. *Котликов Е.Н., Прокашев В.Н., Хонинев А.Н., Хонинева Е.В.* Синтез светоделительных покрытий // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 8. С. 49–53.