

УДК 535.411 : 535.345.6

К ТЕОРИИ ПОЛОСОВЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЗЕРКАЛ

Марков Ю. Н.

Рассматриваются теоретические вопросы конструирования трехкомпонентных систем полосовых интерференционных зеркал. Полученные формулы позволяют определять величины показателей преломления слоев интерференционной системы исходя из условий, накладываемых на спектральные характеристики зеркал. Исследуются предельные возможности трехкомпонентных покрытий в задаче получения интерференционных зеркал.

В [1-3] рассмотрены теоретические вопросы конструирования трехкомпонентных широкополосных интерференционных фильтров вида

$$G(ABCCBA)^m, \quad (1)$$

где G — обозначение подложки с показателем преломления n ; A, B, C — четвертьволновые слои относительно длины волны λ_0 с показателями преломления n_A, n_B, n_C ; m — параметр кратности периода.

Для всех вариантов фильтров, представленных в [1-3], характерно наличие значительных осцилляций кривой прозрачности с длинноволновой стороны от области отражения (первого порядка). Величины провалов (рис. 1, a) коэффициента пропускания за счет наличия с длинноволновой стороны вторичных максимумов отражения достигают значений 50—55 % [1-3]. В том случае, когда покрытие (1) предполагается использовать не в качестве пропускающего фильтра, а в качестве полосового зеркала, к спектральной характеристике необходимо предъявить требование симметричного формирования спектрального профиля прозрачности относительно полосы отражения с одновременным условием сглаживания вторичных максимумов отражения. Особенностью систем (1) в отличие, например, от систем, включающих более чем 2 показателя преломления слоев и исследуемых в [4, 5], является то, что отношение центров двух соседних областей отражения у них составляет не 1 : 2 и 1 : 3, а 1 : 5 (рис. 3). Вопросы оптимизации конструкций трехкомпонентных систем вида (1) в части симметричного сглаживания осцилляций вторичных максимумов в окрестности области высокого отражения в литературе не рассматривались. Отсутствуют также сведения о предельных значениях параметров оптических характеристик трехкомпонентных зеркал (1), достигаемых на ограниченном диапазоне реальных значений показателей преломления слоев покрытий.

В настоящей работе решение задачи оптимизации трехкомпонентных полосовых отражателей осуществляется в результате поиска аналитических соотношений, связывающих значения показателей преломления системы n_A, n_B, n_C . В качестве метода воспользуемся предложенным в [8] аналитическим подходом к решению задачи синтеза полосовых пропускающих фильтров. Согласно [3], выражение усредненной спектральной характеристики прозрачности, в качестве которой используется функция среднего геометрического от огибающих семейства кривых коэффициента пропускания $T_{\text{геом}}(\varphi)$, можно записать через матричные элементы s_{ij} подсистемы $s=CBA$ следующим выражением:

$$T_{\text{геом}}(\varphi) = \frac{4n}{1+n} \cdot \frac{\sqrt{s_{11}s_{12}s_{21}s_{22}}}{|ns_{11}s_{12} + s_{21}s_{22}|}, \quad (2)$$

где $\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}$ — относительная спектральная переменная.

Ширина области высоких отражений системы (1) определяется в единицах φ выражением [3]

$$\Delta\varphi_{\text{отр}} = \varphi_{\text{пр}} - \varphi_{\text{гр}}, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\text{пр}} &= \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{e-1}{e+1} \right), \quad \varphi_{\text{гр}} = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{v-1}{v+1} \right), \\ e &= \frac{n_A^i}{n_B} + \frac{n_A^{\text{II}}}{n_C} + \frac{n_B}{n_C}, \quad v = \frac{n_B}{n_A} + \frac{n_C}{n_A} + \frac{n_C}{n_B}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Спектральные точки $\varphi_{\text{пр}}$, $\varphi_{\text{гр}}$ соответствуют границам перехода от уровня низкой прозрачности к высокой (рис. 1). Используя соотношения (3), (4), не-

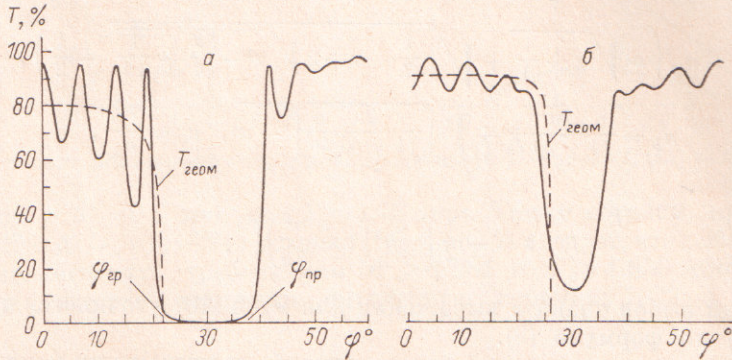


Рис. 1. Спектральные характеристики T и $T_{\text{геом}}$, рассчитанные, согласно [8], и по формуле (2) при $m=4$ для примера (15) из [3] — вариант *a* и примера (15) данной статьи — вариант *б*.

трудно показать, что относительная ширина полосы отражения может быть описана формулой

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{ц}}} = \frac{6}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\frac{n_A}{n_B} + \frac{n_A}{n_C} + \frac{n_B}{n_C} - 1}{\frac{n_A}{n_B} + \frac{n_A}{n_C} + \frac{n_B}{n_C} + 1} \right) - \frac{\pi}{3} \right], \quad (5)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{\text{д}} - \lambda_{\text{к}}$ при $\lambda_{\text{д}}$ — длинноволновой, $\lambda_{\text{к}}$ — коротковолновой границах полосы и $\lambda_{\text{ц}}$ — длине волны центра полосы.

Численные расчеты показывают, что формула (5) достаточно точно описывает значение относительной ширины полосы на уровне 85—90 % от максимального значения отражения в полосе (рис. 3).

Используя характеристику (2), определим критерий симметричного формирования спектрального профиля прозрачности относительно полосы отражения как условие симметричного распределения усредненной кривой прозрачности, которое можно достаточно точно удовлетворить выполнением равенства

$$T_{\text{геом}}(0) = T_{\text{геом}}\left(\frac{\pi}{2}\right) = D. \quad (6)$$

Предложенный критерий может быть проиллюстрирован рис. 1, на котором представлены два варианта распределения спектральных характеристик трехкомпонентных систем, причем вариант *б* удовлетворяет условию (6). Из примеров (рис. 1, 3) следует также, что эффект сглаживания вторичных максимумов отражения усиливается при задании в (6) больших значений параметра D . Представляет интерес решение, полученное с учетом условия [2],

$$n_B^i = \sqrt{n_A n_C}, \quad (7)$$

выполнение которого удовлетворяет требованию полного подавления смежных полос отражения в окрестности точек $\varphi = \pi/3$ и $\varphi = 2\pi/3$.

Равенство (6) с учетом (2) при выполнении условия (7) в терминах показателей преломления может быть после преобразований представлено в форме

$$n_B = \frac{n^2 - n_A^4}{4n_A^3} + \sqrt{\left(\frac{n^2 - n_A^4}{4n_A^3}\right)^2 + \frac{n^2}{n_A^2}}, \quad (8)$$

причем

$$D = \frac{4n}{1+n} \cdot \frac{n_B}{n+n_B^2}. \quad (9)$$

Соотношения (8), (9) определяют аналитическую зависимость величины D от параметров n и n_A . Разрешая (7)–(9) относительно n_A , n_B , n_C , находим при заданных значениях n и D условия на показатели преломления в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} n_A &= n_B \left(\pm \sqrt{\alpha + \frac{1}{4}} + \sqrt{\frac{1}{2} - \alpha + 2\sqrt{\alpha^2 - \frac{\alpha}{4} + \frac{1}{16}} - \frac{1}{2}} \right), \\ n_B &= \frac{2n}{(1+n)D} + \sqrt{\left[\frac{2n}{(1+n)D}\right]^2 - n}, \quad n_C = \frac{n_B^2}{n_A}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left[\frac{n^2}{2n_A^4} \left(1 - \frac{n^2}{n_A^4} \right) \right]^{1/2},$$

а правильный выбор знака в выражении для n_A в (10) уточняется при численном расчете по формуле (8).

Особый интерес представляет поиск условий, связывающих показатели преломления слоев при заданных значениях ширины полосы отражения $\Delta\lambda/\lambda_{\pi}$ и показателя преломления подложки n . Решая систему трех уравнений (5), (7), (8), находим следующие соотношения:

$$n_A = \sqrt{n \sqrt{\frac{\beta(1+2\beta)}{2+\beta}}}, \quad n_B = \frac{n_A}{\beta}, \quad n_C = \frac{n_B}{\beta}, \quad (11)$$

где

$$\beta = \frac{1 - \sin \frac{\pi}{6} \left(1 + \frac{\Delta\lambda}{2\lambda_{\pi}} \right)}{\sin \frac{\pi}{6} \left(1 + \frac{\Delta\lambda}{2\lambda_{\pi}} \right)},$$

при этом соответствующее значение D контролируется согласно (9).

Ограниченный диапазон значений показателей преломления слоев по величинам, принципиально реализуемым, является основным фактором, затрудняющим практическую реализацию многослойных интерференционных покрытий для широкого интервала заданных требований на оптические характеристики. Анализ формул (8)–(11) позволяет оценить возможные пределы допустимых значений $\Delta\lambda/\lambda_{\pi}$ и D , которые реализуются при реальных значениях показателей преломления. Вводя обозначения $\varepsilon = (n_C/n_A)_{\max}$, $\delta = (n_A)_{\min}$ и накладывая требования $n_A \geq \delta$, $(n_C/n_A) \leq \varepsilon$, получаем, согласно (9), (11), условия

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\pi}} \leq 2 \left(\frac{6}{\pi} \arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} - 1 \right), \quad (12)$$

$$\frac{4n}{1+n} \cdot \frac{\delta \sqrt{\varepsilon}}{n + \delta^2 \varepsilon} \leq D \leq \frac{2\sqrt{n}}{1+n} \quad (13)$$

при

$$n \geq \frac{\delta^2}{\sqrt{\frac{\beta(1+2\beta)}{2+\beta}}}. \quad (14)$$

Рассмотрим возможности трехкомпонентных покрытий (1) в задаче получения полосовых зеркал при выборе значений $\delta \approx 1.3$ (для пленок LiF,

NaF [6]) и $\epsilon \approx 3.5$ (для пленок PbTe и Ge [6]). На рис. 2 представлены зависимости, построенные согласно условиям (12)–(14) при использовании значений $\delta=1.3$, $\epsilon=3.5$.

Для демонстрации возможностей метода в получении заданных значений ширины полосы расчет численных примеров проводился для вариантов.

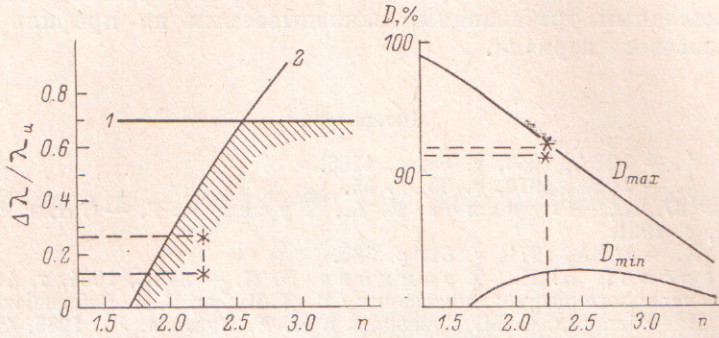


Рис. 2. Зависимости, полученные с помощью выражений (12)—кривая 1, (14) — кривая 2 и (13).

с $\Delta\lambda=1$ мкм и $\Delta\lambda=0.5$ мкм при $\lambda_u=3.75$ мкм. Таким образом, при заданных $\Delta\lambda/\lambda_u=0.267$ и $\Delta\lambda/\lambda_u=0.133$ из условия (14) (рис. 2) следует, что выбор подложек должен удовлетворять требованиям $n \geq 1.981$ и $n \geq 1.830$ соответственно. Выбирая в качестве подложки оптическую керамику KO2 с показателем

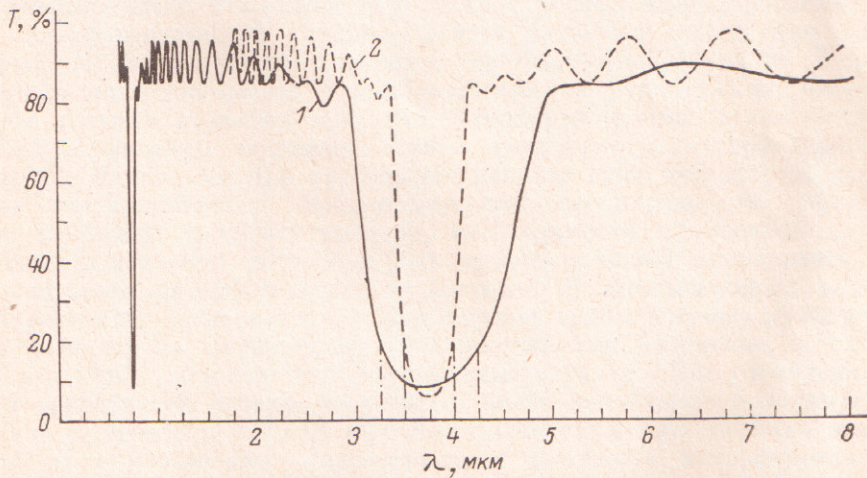


Рис. 3. Спектральные характеристики полосовых зеркал (1), рассчитанные для примеров (17) — кривая 1 и (18) — кривая 2.

преломления $n=2.252$ [7] для длины волны 3.75 мкм, определяем, согласно (14), следующие значения:

$$n_A=1.386, n_B=1.759, n_C=2.232 \text{ для } \Delta\lambda/\lambda_u=0.267; \quad (15)$$

$$n'_A=1.442, n'_B=1.625, n'_C=1.831 \text{ для } \Delta\lambda/\lambda_u=0.133. \quad (16)$$

Практическая реализация рассчитанных покрытий (15), (16) возможна при выборе [6] пленкообразующих материалов

$$\begin{aligned} \text{для слоя } A - \text{Na}_3\text{AlF}_6 \text{ с } n_A=1.35, \text{ для слоя } B - \text{PbF}_2 \text{ с } n_B=1.75, \\ \text{для слоя } C - \text{ZnS} \text{ с } n_C=2.3 \end{aligned} \quad (17)$$

и

$$\begin{aligned} \text{для слоя } A - \text{SiO}_2 \text{ с } n_A=1.45, \text{ для слоя } B - \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ с } n_B=1.63, \\ \text{для слоя } C - \text{SiO} \text{ с } n_C=1.83. \end{aligned} \quad (18)$$

Положения решений для вариантов (15), (16) отмечены звездочкой на рис. 2. Решения (15), (16) можно получить с помощью соотношений (10), задавая при $n=2.252$ условия $D=91.14$ и 92.00 % соответственно. Спектральные характеристики покрытий (1), (17) при $m=4$, $\lambda_0=1.2422$ мкм и (1), (18) при $m=10$, $\lambda_0=1.2444$ мкм, рассчитанные на ЭВМ [8], представлены кривыми 1 и 2 на рис. 3. Как видно из рис. 3, характеристики с хорошей точностью удовлетворяют исходным требованиям, накладываемым на профиль трехкомпонентного полосового зеркала.

Литература

- [1] Thelen A. — JOSA, 1963, v. 53, p. 1266.
- [2] Thelen A. — JOSA, 1973, v. 63, p. 65.
- [3] Марков Ю. Н., Несмелов Е. А., Гусев А. Г. — Опт. и спектр., 1982, т. 53, в. 6, с. 1091.
- [4] Thelen A. — JOSA, 1971, v. 61, p. 365.
- [5] Шкляревский И. Н., Храмцова В. И. — ЖПС, 1984, т. 41, с. 321.
- [6] Справочник технолога-оптика: Справочник / И. Я. Бубис, В. А. Вейденбах, И. И. Духовел и др.; Под общ. ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова. Л., 1983. 414 с.
- [7] Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л., 1984. 216 с.
- [8] Несмелов Е. А. Конюхов Г. П. — ОМП, 1961, № 10, с. 10.

Поступило в Редакцию 1 апреля 1986 г.
