УДК 535.417 : 539.238

МЕТОД СИНТЕЗА АХРОМАТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ И СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Ю. Н. Марков, Е. А. Несмелов и И. С. Гайнутдинов

Предлагается метод синтеза ахроматических просветляющих и светоделительных покрытий, основанный на выборе величин показателей преломления диэлектрических слоев с целью удовлетворения двух заданных условий, накладываемых на спектральную характеристику, а именно на кривизну и величину коэффициента пропускания в некоторой спектральной точке.

В монографиях [1, 2] изложены методы синтеза ахроматических просветляющих и светоделительных интерференционных покрытий, которые используют в роли показателя качества интегральные характеристики. Эти методы представляют различные способы подбора параметров слоев, ведущие к оптимальным результатам в пределах используемого критерия ахроматичности. В настоящей работе предлагается иной подход к задаче ахроматизации следующих двух-, трех- и четырехслойных диэлектрических покрытий

$$\text{а) } g_1=g_2=g_3=g_4=1, \quad \text{б) } g_1=g_3=1, \; g_2=2, \quad \text{в) } g_1=g_2=g_3=1,$$
$$\text{г) } g_1=1, \; g_2=2, \quad \text{д) } g_1=g_2=1, \tag{1}$$

где g_j — толщина j-го слоя в единицах четверти длины волны $\lambda=\lambda_0$ при ведении нумерации слоев пленки от исходной среды в направлении падения света.

В основу метода положена возможность выбора величин n_j показателей преломления слоев покрытий (1) с целью удовлетворения двух заданных условий, накладываемых на спектральную характеристику, а именно на кривизну и величину коэффициента пропускания в спектральной точке λ_0. В задаче ахроматизации использование характеристики кривизны, определяемой для некоторой функции $y(x)$ как [3]

$$K(x)=\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}, \tag{2}$$

оказывается удобным в описании спектральной избирательности покрытий (1), характеризующихся достаточно гладкой функцией прозрачности, в виду определенности требования равенства K либо нулю, либо значениям, близким к нулю, что обуславливается самим геометрическим смыслом определения K. А также в виду достаточности вычисления K лишь в λ_0, являющейся точкой симметрии и точкой экстремума функции коэффициента пропускания $T(\varphi)$ по переменной $\varphi=\pi\lambda_0/2\lambda$, что сводит расчет K, согласно (2), к вычислению лишь $T''(\pi/2)$, снижая существенно при этом объем вычислений. К преимуществам метода можно отнести то, что одновременное задание параметров спектральной избирательности и уровня прозрачности позволяет нам, во-первых, решать задачу просветления и светоделения с единой точки зрения и находить искомые показатели преломления из общей для обеих задач формулы, во-вторых, в случае просветления метод является комбинированным в виду возможности учета наряду с требованием ахроматичности также требования малости отражения.

Общее выражение для коэффициента пропускания интерференционного покрытия имеет вид [4]

$$T(\varphi)=\frac{4n}{(M_{11}+nM_{22})^2+(M_{21}+nM_{12})^2}, \tag{3}$$

где M_{ij} — элементы матрицы интерференции пленки, n — показатель преломления подложки.

Наложим на характеристику (3) два условия в точке λ_0. Первое условие связано с уровнем пропускания и описывается параметром γ, второе связано со спектральной избирательностью и описывается параметром ε

$$T\left(\frac{\pi}{2}\right)=\gamma, \tag{4}$$

$$K\left(\frac{\pi}{2}\right)=\varepsilon. \tag{5}$$

Согласно (2) и (3), можно записать

$$T\left(\frac{\pi}{2}\right)=\frac{4n}{\beta^2}, \tag{6}$$

$$K\left(\frac{\pi}{2}\right)=\frac{8n}{\beta^4}\left[\left(\frac{\eta}{n_2}+n_2\theta+\chi\right)^2-2\beta\left(\frac{\delta}{n_2}+n_2\nu+\mu\right)\right], \tag{7}$$

где для системы а) будет

$$\eta=n_4n_1+n_3n_1+\frac{nn_3}{n_4},\quad \theta=\frac{n}{n_4n_1}+\frac{n}{n_3n_1}+\frac{n_4}{n_3},\quad \chi=\frac{n_4n_1}{n_3}+\frac{nn_3}{n_4n_1},$$

$$\delta=n_4+n_3+nn_1,\quad \mu=\frac{n_4}{n_1}+\frac{nn_1}{n_4}+\frac{n_3}{n_1}+\frac{nn_1}{n_3}+\frac{n_4}{n_3}+\frac{nn_3}{n_4}+2\beta,$$

$$\nu=\frac{n}{n_4}+\frac{n}{n_3}+\frac{1}{n_1},\quad \beta=\frac{n_2n_4}{n_1n_3}+\frac{nn_1n_3}{n_2n_4}. \tag{8}$$

Для систем б)$\div$д) легко получить вид $\eta, \theta, \ldots, \beta$ в результате подстановки этих коэффициентов, соответствующих системе а), в (7), процедуры переобозначения $n_3 \to n_2$, $n_4 \to n_3$ или $n_4 \to n$ или $n_3 \to n_2$, $n_4 \to n$ или $n_3 \to n$, $n_4 \to n$ в зависимости от того, что мы исследуем б) или в), или г), или д) соответственно и затем приведении каждый раз к виду, подобному (7), с выделением искомых коэффициентов перед $1/n_2$ и n_2.

Из уравнения (4) с учетом (6) находим условия на показатели преломления трехслойного покрытия б)

$$n_3=n_1\left[\sqrt{\frac{n}{\gamma}}+\sqrt{n\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}\right] \tag{9}$$

и двухслойного покрытия д)

$$n_1=\sqrt{\frac{n}{\gamma}}+\sqrt{n\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}, \tag{10}$$

реализующие выполнение заданного γ. Условия на n_2 этих систем совпадают по виду, отличаясь, согласно переобозначениям n_j, лишь соответствующими $\eta, \theta, \ldots, \beta$, и находятся из (7) в результате решения уравнения четвертой степени [3]. Для двухслойного покрытия д) решение (4), (5) как системы уравнений имеет вид

$$n_2=\frac{1}{\xi}n_1, \tag{11}$$

$$n_1=\frac{1}{2}\frac{\alpha\xi}{1+\xi}+\sqrt{\left(\frac{1}{2}\frac{\alpha\xi}{1+\xi}\right)^2-n\xi},$$

где

$$a=\sqrt{2\left[2\sqrt{\frac{n}{\gamma}}\left(1+2\sqrt{\frac{n}{\gamma}}+n\right)+\frac{n\varepsilon}{\gamma^2}\right]},\quad \xi=\frac{1}{\sqrt{n\gamma}}+\sqrt{\frac{1}{n}\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}.$$

На рис. 1 приведены характеристики просветляющих покрытий б) и д), полученных по описанному методу.

Чтобы избежать некоторой громоздкости расчета систем б) и г), а также, чтобы получить аналитическое решение для а) и в), целесообразно развить метод на основе приближенных формул, предложенных в [1], которые хорошо описывают основные особенности истинной спектральной характеристики

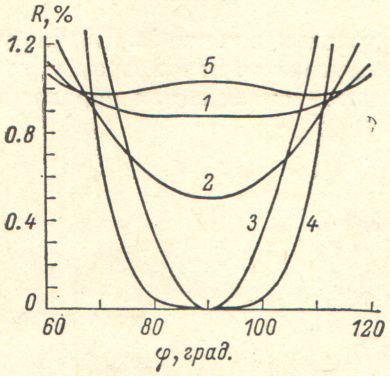

Рис. 1. Коэффициент отражения просветляющих покрытий д) при $n=1.55$, $n_1=1.32$ с $n_2=1.496$ ($\varepsilon=0$, $\gamma=0.991225$) (*1*) с $n_2=1.531$ ($\varepsilon=0.059$, $\gamma=0.995$) (*2*), с $n_2=1.643$ ($\varepsilon=0.23$, $\gamma=1$) (*3*).

Кривая *4* соответствует решению для трехслойного покрытия б) $n_2=2.063$, $n_3=1.643$ ($\varepsilon=0$, $\gamma=1$) при $n=1.55$, $n_1=1.32$. Кривая *5* относится к соответствующему двухслойному покрытию с $n_2=1.484$ ($\varepsilon=-0.021$, $\gamma=0.98966$), предложенному в [1].

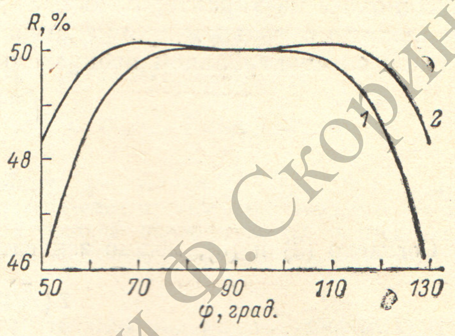

Рис. 2. Коэффициент отражения светоделителей д) с $n_1=3.426$, $n_2=1.75$ ($\varepsilon=0$, $\gamma=0.5$) при $n=1.52$ (*1*) и в) с $n_2=1.911$, $n_3=1.558$ ($\varepsilon=0.039$, $\gamma=0.5$) при $n=1.52$, $n_1=3.65$ (*2*).

$$T=\frac{1}{Q+1},$$

$$Q=\left|\sum_{m=0}^{N}v_{m,\,m+1}\exp\left[i\left(-g_1-g_2-\ldots-g_m+g_{m+1}+\ldots+g_N\right)\varphi\right]\right|^2, \tag{12}$$

где

$$v_{m,\,m+1}=\frac{1}{2}\ln\frac{n_m}{n_{m+1}},$$

N — общее число слоев в системе.

Согласно (2) и (12), для системы а) имеем

$$K\left(\frac{\pi}{2}\right)=8\gamma^2\left[v_{12}\left(9v_{45}+v_{01}-4v_{34}+v_{23}\right)-v_{01}\left(16v_{45}-9v_{34}+4v_{23}\right)-\right.$$
$$\left.-v_{45}\left(4v_{23}-v_{34}\right)+v_{23}v_{34}\right]. \tag{13}$$

Решение (4), (5) как системы уравнений с использованием (6), (13) при заданных n_1, n_4 дает следующие условия для а):

$$n_2=\frac{n_3n_1}{n_4}\left[\sqrt{\frac{n}{\gamma}}-\sqrt{n\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}\right], \tag{14}$$

$$n_3=n_4\exp\left[-2\left(f+\sqrt{f^2-\omega}\right)\right], \tag{15}$$

где

$$\omega=\frac{1}{4}\left[v_{14}\left(9v_{45}+v_{01}+\rho\right)-\rho\left(13v_{45}+5v_{01}+\rho\right)-16v_{45}v_{01}-\frac{1}{8}\frac{\varepsilon}{\gamma^2}\right],$$

$$f=v_{01}-v_{45}+\frac{1}{2}\left(\rho-v_{14}\right),\quad \rho=\frac{1}{2}\ln\left\{\frac{n_1}{n_4}\left[\sqrt{\frac{n}{\gamma}}-\sqrt{n\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)}\right]\right\}.$$

Применяя переобозначение n_j, соответствующее б), в выражении (15), где, полагая $\rho=0$, получаем при заданном n_1 показатель n_2, а n_3 находится из (9). Аналогично находим решения для г) из (10) и (15), где полагаем $\rho=0$. Для системы в) из (14) и (15).

Для получения ахроматических светоделителей (1) необходимо задание $\gamma=0.5$, $\varepsilon=0$. На рис. 2 представлены характеристики светоделителя д), полученного из (11) при $n=1.52$ и в), полученного из (14), (15) при $n=1.52$, $n_1=3.65$. С целью оценки совместимости результатов, получаемых данным и другими методами, воспользуемся решением $n_1=3.73$, $n_2=1.972$, $n_3=1.574$ при $n=1.52$, найденном в [1] методом Полака—Пегиса. Подстановка в (14), (15) $n=1.52$, $n_1=3.73$, $\gamma=0.5$, $\varepsilon=0$ дает величины $n_2=1.9723$, $n_3=1.5738$, которые с хорошей точностью совпадают с решением [1].

Литература

[1] П. Г. Кард. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Таллин, 1971.

[2] Ш. А. Фурман. Тонкослойные оптические покрытия. «Машиностроение», Л., 1977.

[3] Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике. «Наука», М., 1974.

[4] Е. А. Несмелов, Г. П. Конюхов, Ж. прикл. спектр., *11*, 468, 1969.

Поступило в Редакцию 20 февраля 1978 г.