

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПАДЕНИИ СВЕТА ПОД УГЛАМИ 30° И 45°

В.И. ПЕЦКО, А.В. МИЦА

Ужгородский национальный университет,
Ужгород, Украина, alex.mitsa@gmail.com, petsko.vi@gmail.com

Спроектировано трехслойные оптические покрытия просветляющие подложку с показателем преломления $n_s=1,51$ при падении света под углами $\theta_0 = 30^\circ$ и $\theta_0 = 45^\circ$ для s - и p -поляризации. При проведении расчетов использовался r -алгоритм.

Ключевые слова: *r -алгоритм, оптические просветляющие покрытия, многоэкстремальная оптимизация.*

Оптические многослойные покрытия используются в оптических системах космической техники, оптическом приборостроении, в аппаратуре контроля загрязнения окружающей среды и других отраслях народного хозяйства. Особый интерес вызывают просветляющие оптические покрытия, сделанные с небольшого числа слоев [1].

Для расчета спектральных характеристик оптических многослойных покрытий будем использовать матричный метод [2], в котором характеристическая матрица одного слоя задается как:

$$M_j(N_j, d_j, \lambda) = \begin{vmatrix} \cos \delta_j(N_j, d_j, \lambda) & -\frac{i}{p_j} \sin \delta_j(N_j, d_j, \lambda) \\ -ip_j \sin \delta_j(N_j, d_j, \lambda) & \cos \delta_j(N_j, d_j, \lambda) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\delta_j(N_j, d_j, \lambda) = \frac{2\pi N_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}$, $N_j = n_j(1 + ik_j)$, $i = \sqrt{-1}$,

$n_j, k_j, d_j, \theta_j, \lambda$ – показатель преломления j -го слоя, показатель поглощения j -го слоя, геометрическая толщина j -го слоя, угол между лучом, что падает на $(j+1)$ -ый слой, и нормалью к плоскости разделения j -го и $(j+1)$ -го слоев, длина волны соответственно. Поскольку для уменьшения световых потерь в оптических элементах при просветлении их поверхностей используются материалы с

незначительным поглощением, то будем считать для упрощения моделирования $k_j=0$ и, соответственно, $N_j=n_j$. При этом значения

$$p_j = N_j \cos \theta_j \text{ для ТЭ волны (s-поляризация) и } p_j = \frac{N_j}{\cos \theta_j} \text{ для ТМ}$$

волны (р-поляризация).

Характеристическая матрица k -слойной структуры будет равна:

$$M(\bar{n}, \bar{d}, \lambda) = M_k(n_k, d_k, \lambda) \cdot M_{k-1}(n_{k-1}, d_{k-1}, \lambda) \cdots M_2(n_2, d_2, \lambda) \cdot M_1(n_1, d_1, \lambda), \quad (2)$$

где M_j – характеристическая матрица j -ого слоя;

$\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k)$ – вектор значений показателя преломления;

$\bar{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_k)$ – вектор значений геометрической толщины;

λ – длина волны.

Отсюда легко найти коэффициент пропускания оптической структуры при заданных значениях \bar{n} , \bar{d} та λ :

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \frac{4}{\left(2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (3)$$

где $p_0 = N_0 \cos \theta_0$ и $p_s = N_s \cos \theta_s$ для ТЭ волны (s -поляризация);

$$p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0} \text{ и } p_s = \frac{N_s}{\cos \theta_s} \text{ для ТМ волны (p- поляризация);}$$

θ_0 – угол под которым луч падает на слоистую структуру;

θ_s – угол преломления под которым луч попадает из слоистой структуры;

n_0, n_s – показатели преломления внешней среды и подложки соответственно, $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ – элементы характеристической матрицы M .

Целевую функцию для просветляющего покрытия представим в виде:

$$\Omega(\lambda_2 / \lambda_1) = \max_{\bar{n}, \bar{d}} F(\bar{n}, \bar{d}) = \max_{\bar{n}, \bar{d}} \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T^2(\bar{n}, \bar{d}, \lambda_{(i)}) \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где L – число точек сетки спектрального интервала от λ_1 до λ_2 . При равномерном его делении с шагом $\Delta \lambda$:

$$L = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta \lambda} + 1. \quad (5)$$

В работе был выбран спектральный интервал от 200 до 800 нм. В качестве подложки использовано стекло с показателем преломления $n_s = 1,51$.

Проектирование проводилось по схеме близкой к описанной в [1]. С помощью г-алгоритма сначала находим оптимальные параметры функционала (4), а далее подбираем показатели преломления реальных материалов, которые ближе всего к полученным теоретическим результатам. После этого фиксируем показатели преломления и снова оптимизируем толщины слоев.

После проведения вычислений, для s-поляризации при падении света под углом $\theta_0 = 30^\circ$ получилось трехслойное оптическое

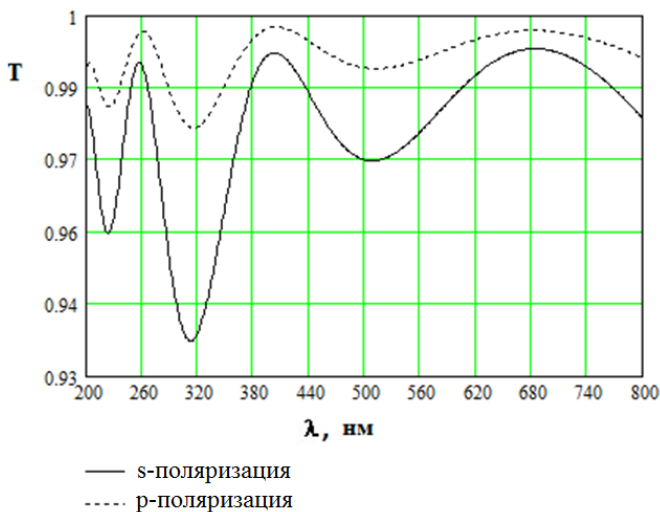


Рис. 1. Кривые коэффициентов пропускания при просветлении подложки с показателем преломления $n_s=1,51$ спроектированными трехслойными покрытиями при падении света под углом $\theta_0 = 30^\circ$ для s- и p-поляризаций.

покрытие со следующей структурой: первый слой толщиной 140,6 нм состоит из материала Al_2O_3 , показатель преломления которого $n_1 = 1,7$, второй – слой с показателем $n_2 = 1,51$ толщиной 50,8 нм, третий – материал Na_3AlF_6 , показатель преломления которого $n_3 = 1,35$, толщиной 69,7 нм. Значение целевой функции (4) при этом

0,97878649. Максимальное значение целевой функций на исследуемом промежутке достигается при длине волны $\lambda = 684$ нм и равно $T_{\max} = 0,99350789$, а минимальное – при $\lambda = 312$ нм и равно $T_{\min} = 0,93680845$ (рис. 1).

Для р-поляризации, при падении света под углом $\theta_0 = 30^\circ$,

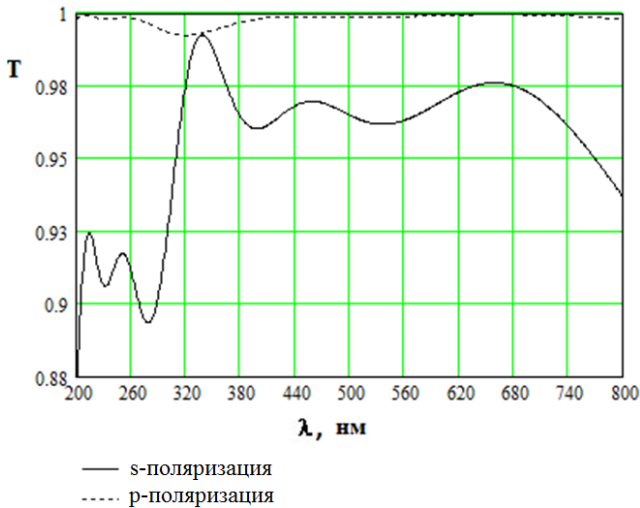


Рис. 2. Кривые коэффициентов пропускания при просветлении подложки с показателем преломления $n_s=1,51$ спроектированными трехслойными покрытиями при падении света под углом $\theta_0 = 45^\circ$ для s- и р-поляризаций.

структура спроектированного трехслойного оптического покрытия была следующей: первый слой толщиной 145,4 нм состоит из материала Al_2O_3 , показатель преломления которого $n_1 = 1,65$, второй – слой с показателем преломления $n_2 = 1,51$ толщиной 52,2 нм, третий – слой - Na_3AlF_6 , показатель преломления которого $n_3 = 1,35$, толщиной 69,7 нм. Значение целевой функции (4) при этом 0,99207593. Максимум коэффициента пропускания равен $T_{\max} = 0,99772398$ и достигается при длине волны $\lambda = 404$ нм, а минимум коэффициента пропускания равен $T_{\min} = 0,9781703$ (при $\lambda = 315$ нм). Из рисунка 1 видно, что на всем исследуемом спектральном интервале для s-поляризации при падении света под углом $\theta_0 = 30^\circ$ значение

коэффициента пропускания спроектированных оптических покрытий больше, чем для р-поляризации.

Далее была спроектирована оптическая трехслойная структура для s-поляризации, при падении света под углом $\theta_0 = 45^\circ$. Для первого слоя возьмем материал SiO_2 с показателем преломления $n_1 = 1,43$ толщиной 191 нм, для второго – материал с показателем $n_2 = 1,57$ толщиной 163,7 нм, для третьего – материал Na_3AlF_6 с показателем $n_3 = 1,35$ толщиной 88,8 нм. Значение целевой функции (4) равно 0,95878225. Причем при длине волны $\lambda = 338$ нм получим максимум коэффициента пропускания $T_{\max} = 0,99277217$, а при длине волны $\lambda = 200$ нм получим минимум коэффициента пропускания $T_{\min} = 0,87963607$.

Для р-поляризации, при падении света под углом $\theta_0 = 45^\circ$, структура спроектированного трехслойного оптического покрытия была следующей: для первого слоя взят материал с показателем преломления $n_1 = 1,57$ толщиной 171 нм, для второго – материал SiO_2 с показателем $n_2 = 1,43$ толщиной 66,7 нм, для третьего – материал Na_3AlF_6 с показателем $n_3 = 1,35$ толщиной 73 нм. Значение целевой функции (4) равно 0,99802116. Причем, при длине волны $\lambda = 684$ нм, получим максимум коэффициента пропускания $T_{\max} = 0,99957615$, а при длине волны $\lambda = 327$ нм, получим минимум коэффициента пропускания $T_{\min} = 0,99271906$. Из рис. 2 видно, что при падении света под углом $\theta_0 = 45^\circ$ для s-поляризации значение коэффициента пропускания спроектированных оптических покрытий также больше, чем для р-поляризации.

Полученные трехслойные оптические покрытия можно реализовать и использовать на практике.

Литература

1. Яковлев П.П. Проектирование интерференционных покрытий / П.П Яковлев, Б.Б. Мешков – М.: Машиностроение, 1987.– 192 с.
2. *Furman Sh.*. Basics of optics of multiplayer systems / Sh.Furman., A.V. Tikhonravov – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.