

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ r -АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А.В. МИЦА

Ужгородский национальный университет,

Ужгород, Украина,

amitsa@i.ua

С помощью r -алгоритма проведено оптимизацию неоднородных оптических покрытий с линейным, квадратическим, логарифмическим и экспоненциальным распределением показателя преломления. Показано, что для просветления высокопреломляющихся подложек, наиболее эффективными являются неоднородные пленки с квадратическим распределением показателя преломления.

Ключевые слова: *неоднородные оптические покрытия, многоэкстремальная задача оптимизации, r -алгоритм.*

Использование неоднородных пленок для создания оптических покрытий и интегрально-оптических элементов является актуальной прикладной проблемой в оптическом приборостроении и интегральной оптике [1]. Однако теоретическое описание расчетов интерференционных систем с неоднородными по толщине многослойными структурами, что позволяет получать необходимые оптические характеристики, разработано еще недостаточно. В работе [2] показано, что для решения задач нахождения оптимальных параметров однородных оптических покрытий с небольшим количеством параметров достаточно эффективным является использование r -алгоритма [3-5]. Проведенная работа показала, что это утверждение можно расширить и на неоднородные структуры, в которых показатель преломления меняется по известному нам закону.

Разработано математическую модель неоднородной структуры и предлагается подход, позволяющий с помощью r -алгоритма найти оптимальные параметры неоднородных покрытий с такими

распределениями показателя преломления, как линейный, квадратический, логарифмический и экспоненциальный.

Как известно [1], характеристическая матрица одного слоя задается в виде:

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

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 – показатель преломления, k_j – показатель поглощения, d_j – геометрическая толщина, θ_j – угол между лучом, что падает на $(j+1)$ -ый слой, и нормалью к плоскости разделения j -го и $(j+1)$ -го слоев, λ – длина волны.

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 значение $p_j = N_j \cos \theta_j$ – для ТЕ волны (s -поляризация) и

$$p_j = \frac{N_j}{\cos \theta_j} \text{ – для ТМ волны (} p\text{-поляризация).}$$

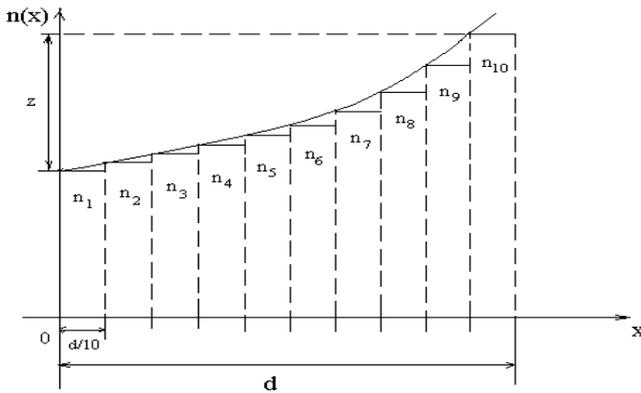


Рис.1. Схематическое изображение неоднородной пленки, разделенной на 10 зон, с квадратическим распределением показателя преломления.

Будем аппроксимировать неоднородность ступенчатой структурой путем разделения пленки на m равных за толщиной зон (рис.1), показатели преломления в которых изменяются за законами, заданными в таблице 1. В таблице используются такие обозначения: n_1 – значение показателя преломления первой зоны, z – значение, на которое изменяется показатель преломления от первой зоны до границы последней зоны и внешней среды, $j=1..m$ – номер зоны. При $z > 0$ показатель преломления неоднородной пленки убывает, а при $z < 0$ – возрастает.

Таблица 1. Значения показателя преломления j -ой зоны-подслоя

Распределение	Значение показателя преломления n_j
Линейный	$n_1 + \frac{z}{(m-1)} \cdot (j-1)$
Квадратический	$n_1 + \frac{z}{(m-1)^2} \cdot (j-1)^2$
Логарифмический	$n_1 + \frac{z}{\ln(m)} \cdot \ln(j)$
Экспоненциальный	$n_1 + \frac{z}{e^{m-1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1)$

Характеристическая матрица неоднородной пленки [1] будет равной

$$\bar{M}(n_1, d, \lambda) = M_m \left(n_m, \frac{d}{m}, \lambda \right) \cdot M_{m-1} \left(n_{m-1}, \frac{d}{m}, \lambda \right) \cdot \dots \cdot M_2 \left(n_2, \frac{d}{m}, \lambda \right) \cdot M_1 \left(n_1, \frac{d}{m}, \lambda \right), \quad (2)$$

где M_j – характеристическая матрица j -ой зоны;

d – геометрическая толщина неоднородной пленки;

λ – длина волны.

Учитывая (2) легко определить коэффициент пропускания системы подложка-неоднородная пленка при заданных значениях показателя преломления n_1 , геометрической толщины d та длины волны λ :

$$R(n_1, d, \lambda) = \left| \frac{n_0(\overline{M}_{11}(n_1, d, \lambda) + n_S \cdot \overline{M}_{12}(n_1, d, \lambda)) - (n_S \cdot \overline{M}_{22}(n_1, d, \lambda) + \overline{M}_{21}(n_1, d, \lambda))}{n_0(\overline{M}_{11}(n_1, d, \lambda) + n_S \cdot \overline{M}_{12}(n_1, d, \lambda)) + (n_S \cdot \overline{M}_{22}(n_1, d, \lambda) + \overline{M}_{21}(n_1, d, \lambda))} \right|^2 \quad (3)$$

где n_0 , n_S – показатели преломления внешней среды и подложки соответственно, \overline{M}_{11} , \overline{M}_{12} , \overline{M}_{21} , \overline{M}_{22} – элементы характеристической матрицы неоднородной пленки \overline{M} .

В общем виде целевая функция будет такой:

$$F(n_1, d) = \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T^2(n_1, d, \lambda_i) \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где L – число точек сетки спектрального интервала от λ_{\min} до λ_{\max} . При равномерном его разбиении с шагом $\Delta\lambda$

$$L = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\Delta\lambda} + 1.$$

В работе использовались такие ограничения $1000\text{нм} \leq d \leq 3000$ нм, $z = -1.0, -0.9, \dots, 3.1$, $n_1 = \begin{cases} \text{от } (1.35 + z) \text{ до } 6.0, \text{ если } z > 0 \\ \text{от } 1.35 \text{ до } (6.0 + z), \text{ если } z < 0 \end{cases}$.

Последнее ограничение позволит добиться выполнения условия, что показатель преломления любой зоны неоднородного слоя будет находиться в границах от 1.35 до 6.0, что соответствует показателям преломления реальных материалов.

Целевая функция, которую необходимо максимизировать с учетом ограничений, будет равной

$$F(n_1, d) = \left(\frac{1}{200} \sum_{l=0}^{199} T^2(n_1, d, 2000 + 100 \cdot l) \right)^{1/2}. \quad (5)$$

После проведения вычислительного эксперимента, были получены результаты, которые изображены на рисунке 2. Из рисунка 2 следует, что для просветления высокопреломляющихся подложек, наиболее эффективными являются неоднородные пленки с квадратическим распределением показателя преломления. Немного уступают им неоднородные пленки с линейным распределением показателя преломления, потом идут неоднородные пленки с логарифмическим распределением и совсем неэффективными являются неоднородные пленки с экспоненциальным распределением.

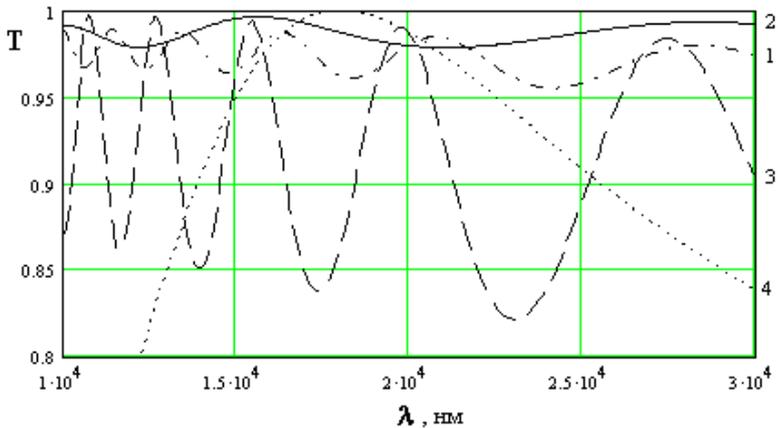


Рис. 2. Возможности просветления неоднородной пленкой подложки с показателем преломления $n_s=4.0$:

- 1 – при линейном распределении с оптимальным выбором параметров ($n_1=3.650$, $d=1500.0$ нм, $z=-2.3$);
- 2 – при квадратическом распределении с оптимальным выбором параметров ($n_1=3.750$, $d=614.4$ нм, $z=-2.4$);
- 3 – при логарифмическом распределении с оптимальным выбором параметров ($n_1=2.850$, $d=1447.9$ нм, $z=-1.5$);
- 4 – при экспоненциальном распределении с оптимальным выбором параметров ($n_1=3.487$, $d=234.3$ нм, $z=-1.5$).

Литература

1. Furman Sh., Tikhonravov A.V. Basics of optics of multiplayer systems. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.
2. Мица О.В., Стецюк П.І. Задача знаходження оптимальних параметрів однорідного оптичного покриття // Теорія оптимальних рішень. – № 2. – Київ, 2003. – С. 127–134.
3. Шор Н.З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наук. думка, 1979. – 199 с.
4. Мица А.В., Стецюк П.І. Использование г-алгоритма для оптимизации трех оптических многослойных покрытий // Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale. – Chisinau, 2010. С. 100-108.
5. Стецюк П.І., Мица А.В. О задачах оптимизации параметров для многослойных оптических покрытий // Кибернетика и системный анализ. – Киев, 2005. – С. 107–115.