

УДК 535.417

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТЕРЬ В СЛОЯХ ТОНКОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. В. Козарь, Е. В. Путрина
(кафедра радиофизики)

Проведен анализ влияния малых потерь в слоях тонкослойной интерференционной структуры (ТИС) на ее оптические свойства (ТИС содержит в периоде два слоя одинаковой оптической толщины). Получены аналитические соотношения, позволяющие определять в зависимости от величины потерь возможные значения показателя преломления согласуемой среды и длины волны, на которой происходит согласование. Показано, что при большом числе периодов ТИС эти характеристики не зависят от числа периодов и определяются только величиной удельных потерь.

Рассмотрим влияние малых потерь в слоях на характеристики тонкослойных интерференционных структур (ТИС) — согласующих систем с характерными оптическими и структурными свойствами, к основным из которых можно отнести инвариантность их амплитудных характеристик и суммарной оптической толщины относительно числа слоев в них и возможность синтеза структур такого класса с толщинами слоев, существенно меньшими четвертьволновых [1, 2].

Пусть падение волны перпендикулярно плоскости слоев ТИС и она не ограничена в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения.

В случае наличия потерь в слоях правомерно [3] воспользоваться моделью «диэлектрик с потерями», тогда для комплексной диэлектрической проницаемости в нашем случае можно записать

$$\hat{\epsilon} = \epsilon + j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, σ — ее удельная проводимость, ω — циклическая частота распространяющейся в среде волны, ϵ_0 — универсальная диэлектрическая постоянная и соответственно для комплексного показателя преломления можно записать

$$\begin{pmatrix} n' \\ \kappa \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{V\epsilon^2 + \Sigma^2 \pm \epsilon}{2}},$$

где $(n' + j\kappa)^2 \equiv \hat{n}^2 = \hat{\epsilon} = \epsilon + j\Sigma$.

Для аналитических расчетов воспользуемся матричной и импедансной методиками [3, 4].

В случае двухслойной ТИС с помощью метода импедансных характеристик с учетом 1-го порядка малости по Σ (и соответственно по κ) можно получить соотношения для определения нового значения согласующей способности структуры и смещения длин волн, на которых происходит согласование (под согласующей способностью структу-

ры понимается величина показателя преломления подложки, которую может полностью согласовать данная структура). Пусть

$$\eta \equiv \frac{\kappa_1}{n_1} = \frac{\kappa_2}{n_2}, \quad \operatorname{tg} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} = \operatorname{tg} \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda} \equiv T_0.$$

Тогда

$$n_s = \frac{n_1 n_2}{n_L} (1 + 2\eta T L), \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta}{2T_0 V R}, \quad (2)$$

где

$$\Delta = 2\eta L \frac{n_L}{n_2} T_0 \left(T_0^2 \frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} \right) - \alpha d S (T_0^2 + 1),$$

$$S = \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) \left(1 + \frac{n_1 n_2}{n_L} \right),$$

$$L = \frac{n_2}{n_L} \frac{n_2}{n_1 + n_2} + \frac{n_L}{n_2} \frac{n_1}{n_1 + n_2},$$

n_1, n_2 — показатели преломления примыкающего и следующего за ним слоев соответственно, n_s, n_L — показатели преломления согласуемой среды и среды, из которой распространяется волна.

$$V = (1 + T_0^2) \Phi_0, \quad R = \frac{n_2}{n_1 n_L} - \frac{n_L}{n_2^2},$$

$$T = T_0 - \frac{\Delta\lambda}{\lambda} (1 + T_0^2) \Phi_0,$$

$$\Phi_0 \equiv \operatorname{arctg} T_0, \quad \alpha \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \kappa,$$

d_i — геометрическая толщина слоев.

Из соотношений (1), (2) можно видеть, что наличие малых потерь в слоях ТИС приводит к увеличению ее согласующей способности. Приближенные соотношения (1), (2) дают совпадение полученных по ним результатов с результатами расчета на ЭВМ по точным френелевским формулам с ошибкой не более 10% для $\eta=0,1$ и 5% для $\eta=0,05$ (таблица).

η	$n_s \text{ exp}$	$n_s \text{ theor}$	$\left\{ \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right\}_{\text{exp}}$	$\left\{ \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right\}_{\text{theor}}$
0,01	6,25	6,25	—0,008	—0,008
0,5	7,5	7,14	—0,0(3)	—0,035
0,1	10	9,1	—0,06	—0,07

Расчеты проводились для произвольно выбранных $n_1=2, n_2=3, \lambda=12$ мкм (соответственно $d_1=0,629$ мкм, $d_2=0,4196$ мкм) и носят относительно значений n_s иллюстративный характер.

Для решения задачи в случае периодической двухслойной ТИС применялась матричная методика. Из условия равенства нулю коэффициента отражения приходим к соотношению

$$(1+T^2) \frac{U_{k-2}(x_N)}{U_{k-1}(x_N)} = 1 - PT^2 - i(M-N)T, \quad (3)$$

где U_k — полиномы Чебышева второго рода от аргументов x_N ,

$$x_N = \frac{1}{2} ({}^2m_{11} + {}^2m_{22}),$$

$$P = \frac{n_L n_s^2 - n_s n_1^2}{n_1 n_2 (n_L - n_s)}, \quad M = \frac{n_s n_L}{n_1 n_2} (1 - i\eta) \frac{n_1 + n_2}{n_L - n_s},$$

$$N = \frac{n_1 + n_2}{n_L - n_s} (1 - i\eta),$$

${}^2m_{ij}$ — элементы характеристической матрицы одного периода.

Подставляя в полученное уравнение (3) в явном виде выражения для полиномов Чебышева при $k=1, 2$ и т. д. и пренебрегая членами со степенями T выше второй, приходим к системе

$$\begin{cases} 1 - k[(k-1)Q + P]m^2 + k(Bm - An) = 0, \\ 2[(k-1)Q + P]n + A = 0, \end{cases}$$

где $\operatorname{tg}(2\pi \hat{n}d/\lambda) = m + in$, и с учетом первого порядка малости по η

$$m = T,$$

$$n = \eta \Phi_0 (1 + T_0^2), \quad A + iB \equiv M - N,$$

$$A = \frac{n_1 + n_2}{n_L - n_s} \left(\frac{n_L n_s}{n_1 n_2} - 1 \right), \quad B = \eta \frac{n_1 + n_2}{n_L - n_s} \left(\frac{n_L n_s}{n_1 n_2} + 1 \right).$$

Для новых значений согласующей способности структуры и величины T , принимая во внимание, что $m = T > 0$, имеем

$$n_s = \frac{n_1 + n_2 - 2nn_L n_2/n_1 - 2n_L (k-1) Qn}{n_L (n_1 + n_2)/n_1 n_2 - 2n n_1/n_2 - 2(k-1) Qn}, \quad (4)$$

$$T = \frac{\sqrt{[(kB)^2 + 4k(k-1)Q + P](1 + An) - kB}}{2k[(k-1)Q + P]}, \quad (5)$$

С учетом пропорциональности величины $n \sim d_i \sim 1/k$, а также малости потерь ($\Sigma \ll \varepsilon$) при $k \gg 1$ имеем

$$n_s = \frac{n_1 n_2}{n_L} \left[1 + \sum_j \left(2 \frac{n_L}{n_1 + n_2} \frac{J}{n_j^2} (1 + T_0^2) \left(\frac{n_1 n_2}{n_L^2} - 1 \right) \right) \right], \quad (6)$$

$$T = T_0 \left(1 - \eta \frac{B}{\sqrt{Q}} \right), \quad (7)$$

где

$$Q = \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_1 n_2},$$

$$J = Q \sqrt{\frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1 n_2}} = \text{const} > 0,$$

или, учитывая то, что $\eta \equiv \frac{\kappa_i}{n_i} \Big|_{\Sigma \ll \epsilon} = \frac{\Sigma_i}{2n_i^2}$, для смещенного из-за наличия потерь в слоях ТИС значения длины волны получим

$$\lambda = 2\pi D T_0^{-1} \left(1 + \frac{\Sigma_i}{2n_i^2} \Phi \right), \quad (8)$$

где D — оптическая толщина слоев,

$$\Phi = \frac{\sqrt{2n_1 n_2}}{n_L - n_s} \left(\frac{n_s n_L}{n_1 n_2} - 1 \right).$$

Из соотношений для входящих в зависимости (6), (7) констант можно видеть, что при наличии потерь мы имеем увеличение значения согласующей способности структуры и смещение в сторону меньших значений длины волны, на которой происходит согласование. Кроме того, важно отметить, что, как видно из полученных соотношений, и в случае наличия малых потерь в слоях ТИС сохраняется одно из ее фундаментальных свойств — независимость оптических характеристик ТИС от числа периодов.

Полученные соотношения были проверены численно на ЭВМ. Совпадение теоретических и экспериментальных результатов лежит в интервалах ошибок от 0,1 до 6% при изменении η от 0,01 до 0,1 соответственно.

Таким образом, проведенный анализ влияния малых потерь в слоях ТИС на ее оптические свойства позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Наличие малых потерь в слоях приводит к изменению величины согласующей способности ТИС и длины волны, на которой происходит согласование.

2. Из полученных соотношений видно, что при наличии малых потерь в слоях n_s линейно зависит от величины потерь. Кроме того, имеет место увеличение согласующей способности и смещение длин волн, на которых происходит согласование, в сторону меньших значений.

3. При большом числе периодов согласующая способность и соответствующая длина волны не зависят от их числа и определяются лишь величиной удельных потерь в слоях многослойной структуры.

Приведенные в работе соотношения (4)—(8) позволяют, зная величину потерь в слоях ТИС, рассчитывать поправку на смещение длины волны, на которой необходимо реализовать согласование, а также согласующую способность ТИС, при решении прикладных задач синтеза просветляющей оптики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козарь А. В. //Опт. и спектр. 1985. 59, № 5. С. 1132. [2] Козарь А. В. //Опт. и спектр. 1988. 64, № 5. С. 1130. [3] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973. [4] Бреховских Л. М. //Волны в слоистых средах. М., 1973.

Поступила в редакцию
10.02.92