

В результате оказывается возможным считывать высокочастотный сигнал фотосмещения обыкновенным, широкоапертурным низкочастотным фотоприемником.

Экспериментально показано, что минимальный размер объемной зоны селекции по глубине (толщине) материала составляет около 4—5 мкм и находится вблизи теоретического предела, определяемого дифракционным разрешением микрообъектива.

Приведенные результаты экспериментальных исследований показывают, что предложенный метод многослойной записи в толстой (объемной) среде позволяет примерно на порядок увеличить плотность оптической записи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sawatari T. Optical heterodyne scanning microscope // Appl. Opt.— 1973.— 12, N 11.— P. 2768.
2. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А. Метод многоканальной записи двоичных данных на оптическом диске // Автометрия.— 1989.— № 2.
3. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Вьюхина Н. Н. и др. Высокоскоростной накопитель цифровых данных на основе пакета оптических дисков // Автометрия.— 1989.— № 3.

Поступила в редакцию 14 июня 1990 г.

УДК 535.345.67

Е. Г. СТОЛОВ, З. Э. ЭЛЬГАРТ
(Ленинград)

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящей работе излагается теория синтеза адаптивных физических систем. Под понятием «адаптивность» в данном случае подразумевается наличие у системы нового свойства: сохранения требуемых характеристик, несмотря на отклонения ряда конструктивных параметров от заданных значений из-за невозпроизводимости технологических режимов процесса изготовления системы. Это свойство иллюстрируется примером расчета адаптивных конструкций интерференционных оптических покрытий.

Характеристики любой сложной физической системы зависят от совокупности значений конструктивных параметров. Например, параметры интерференционных покрытий зависят от оптических толщин слоев и показателей преломления слоев и обрамляющих сред:

$$T(\lambda) = T(n_0, n_1, n_2, \dots, n_m, n_{m+1}, l_1, l_2, \dots, l_m, \lambda), \quad (1)$$

где $T(\lambda)$ — энергетический коэффициент пропускания m -слойного покрытия; n_0 и n_{m+1} — показатели преломления обрамляющих сред; n_i , l_i — показатель преломления и оптическая толщина i -го слоя; λ — длина волны излучения в вакууме.

В процессе практической реализации сложной физической системы ряд ее конструктивных параметров контролируется непосредственно с помощью приборов контроля, имеющихся в технологической установке, предназначенной для изготовления данных систем. Ряд других параметров определяется свойствами материалов, из которых изготавливаются элементы физической системы, и их значения претерпевают неконтролируемые изменения в определенном интервале из-за колебаний технологических режимов. Во многих случаях контролируются характеристики, являющиеся сложной функцией от конструктивных параметров системы.

Поясним изложенное на примере изготовления многослойного интерференционного покрытия. Выражение для спектральной характери-

стики интерференционного покрытия из чередующихся слоев с высоким (n_v) и низким (n_n) показателями преломления, получающегося при практической реализации, имеет вид

$$T(\lambda) = T(l_1(n_v, n_n), \dots, l_m(n_v, n_n), n_0, n_1, \dots, n_{m+1}, \lambda). \quad (2)$$

Конкретный вид функций $l_i(n_v, n_n)$ зависит от выбранного метода контроля.

В линейном приближении требование адаптивности покрытия примет вид

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \left(\frac{\partial l_i}{\partial n_v} \Delta n_v + \frac{\partial l_i}{\partial n_n} \Delta n_n \right) + \frac{\partial T}{\partial n_n} \Delta n_n + \frac{\partial T}{\partial n_v} \Delta n_v = 0, \quad (3)$$

где Δn_v и Δn_n — отклонения показателей преломления слоев от средних значений; $n_v^{(0)}$ и $n_n^{(0)}$, Δn_v и Δn_n изменяются в интервалах

$$\begin{aligned} n_v &\in [n_v^{(0)} - \Delta n_v^{(\max)}; n_v^{(0)} + \Delta n_v^{(\max)}], \\ n_n &\in [n_n^{(0)} - \Delta n_n^{(\max)}; n_n^{(0)} + \Delta n_n^{(\max)}]. \end{aligned} \quad (4)$$

При дальнейшем рассмотрении будем предполагать наличие корреляции между Δn_v и Δn_n , а именно

$$\Delta n_n = \alpha \Delta n_v, \quad (5)$$

где α , как и $\Delta n_v^{(\max)}$, находится экспериментально. Соотношение (5) является результатом экспериментальных исследований и обусловлено тем обстоятельством, что основной фактор, определяющий Δn_v и Δn_n , — пористость пленок. При фиксированной температуре подложек доминирующее влияние на пористость пленок оказывают концентрация и состав остаточных газов: с увеличением концентрации пористость возрастает и соответственно показатель преломления пленки уменьшается. С учетом (5) соотношение (3) примет вид

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \left(\frac{\partial l_i}{\partial n_v} + \frac{\partial l_i}{\partial n_n} \alpha \right) + \alpha \frac{\partial T}{\partial n_n} + \frac{\partial T}{\partial n_v} = 0. \quad (6)$$

Рассмотрим схему расчета адаптивной конструкции покрытия применительно к оптическому методу контроля толщины наносимых слоев по двум длинам волн. Суть метода заключается в том, что в процессе нанесения i -го слоя ($i = 1, 2, \dots, m$) сравнивают энергетические коэффициенты пропускания покрытия на двух длинах волн ($\lambda_1^{(i)}$ и $\lambda_2^{(i)}$) и прерывают процесс нанесения в момент достижения определенного отношения энергетических коэффициентов пропускания:

$$\frac{T^{(i)}(\lambda_1^{(i)})}{T^{(i)}(\lambda_2^{(i)})} = \gamma^{(i)}, \quad (7)$$

где $\gamma^{(i)}$ — заранее заданная расчетная величина, при которой обеспечивается требуемая толщина i -го слоя; $T(\lambda)^{(i)}$ — коэффициент пропускания части покрытия, содержащей подложку и первые i слоев.

Расчет адаптивной конструкции покрытия производится следующим образом. Сначала по методике, описанной в [1], определяются все конструкции из числа анализируемых, для которых энергетический коэффициент пропускания на длине волны $\lambda_{\text{раб}}$ равен заданному значению $T_{\text{раб}}$. Поиск осуществляется при $n_v = n_v^{(0)}$ и $n_n = n_n^{(0)}$. Для каждой из найденных конструкций выполняются следующие вычислительные операции. Сначала определяются две конструкции покрытий, обладающие, как и исходная конструкция, требуемым энергетическим коэффициентом пропускания на длине волны $\lambda_{\text{раб}}$ при показателях преломления слоев соответственно

$$(n_v^{(0)} - \Delta n_v^{(\max)}), (n_n^{(0)} - \alpha \Delta n_v^{(\max)}) \text{ и } (n_v^{(0)} + \Delta n_v^{(\max)}), (n_n^{(0)} + \alpha \Delta n_v^{(\max)}).$$

Расчет значений $\Delta l_i^{(1)}$ и $\Delta l_i^{(2)}$, $i = 1, 2, \dots, m$ производится в линейном приближении ($\Delta l_i^{(1)}$ и $\Delta l_i^{(2)}$ — значения приращений оптических толщин соответственно для первой и второй конструкции). Они должны удовлетворять уравнению связи

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \Delta l_i^{(1)} - \frac{\partial T}{\partial n_B} \Delta n_B^{(\max)} - \frac{\partial T}{\partial n_H} \alpha \Delta n_B^{(\max)} = 0 \quad (8)$$

для первой конструкции и

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \Delta l_i^{(2)} + \frac{\partial T}{\partial n_B} \Delta n_B^{(\max)} + \frac{\partial T}{\partial n_H} \alpha \Delta n_B^{(\max)} = 0 \quad (9)$$

— для второй и сообщать минимум функционалу

$$I(\Delta l_i) = \sum_{i=1}^m (\Delta l_i)^2. \quad (10)$$

Таким образом, определение $\Delta l_i^{(1)}$ и $\Delta l_i^{(2)}$ является задачей на условный экстремум и может быть выполнено методом неопределенных множителей Лагранжа. При этом для $\Delta l_i^{(1)}$ получается система линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \Delta l_i^{(1)} &= \left(\frac{\partial T}{\partial n_B} + \frac{\partial T}{\partial n_H} \alpha \right) \Delta n_B^{(\max)}, \\ 2\Delta l_k^{(1)} + \mu \frac{\partial T}{\partial l_k} &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

а для $\Delta l_i^{(2)}$ —

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_i} \Delta l_i^{(2)} &= - \left(\frac{\partial T}{\partial n_B} + \frac{\partial T}{\partial n_H} \alpha \right) \Delta n_B^{(\max)}, \\ 2\Delta l_k^{(2)} + \mu \frac{\partial T}{\partial l_k} &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где μ — неопределенный множитель Лагранжа. Решение системы (11):

$$\mu = - \frac{2 \left(\frac{\partial T}{\partial n_B} + \alpha \frac{\partial T}{\partial n_H} \right) \Delta n_B^{(\max)}}{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial T}{\partial l_k} \right)^2}, \quad \Delta l_k^{(1)} = - \mu \frac{\partial T}{\partial l_k} / 2. \quad (13)$$

Решение системы (12):

$$\mu = \frac{2 \left(\frac{\partial T}{\partial n_B} + \alpha \frac{\partial T}{\partial n_H} \right) \Delta n_B^{(\max)}}{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial T}{\partial l_k} \right)^2}, \quad \Delta l_k^{(2)} = - \Delta l_k^{(1)}. \quad (14)$$

Следующий этап расчета адаптивной конструкции — определение набора значений $[\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}]$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}$ — длины волн фотометрирования слоев покрытия. Очевидно, что для обеспечения эффекта адаптации, т. е. автоматического изменения оптических толщин наносимых слоев при изменении показателей преломления таким образом, что $T(\lambda_{\text{раб}}) = T_{\text{раб}}$, необходимо выполнение соотношений

$$\frac{T_1^{(i)}(\lambda_1^{(i)})}{T_1^{(i)}(\lambda_2^{(i)})} = \frac{T_2^{(i)}(\lambda_1^{(i)})}{T_2^{(i)}(\lambda_2^{(i)})}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (15)$$

где $T_1^{(i)}(\lambda)$ и $T_2^{(i)}(\lambda)$ — коэффициенты пропускания частей соответ-

ственно первой и второй конструкции покрытий, содержащих подложку и первые i слоев.

Выполнение соотношений (15) эквивалентно условию

$$\frac{\partial \gamma^{(i)}}{\partial n_i} \Delta n_i + \frac{\partial \gamma^{(i)}}{\partial l_i} \Delta l_i = 0 \quad (16)$$

и означает, что прерывание процесса осаждения каждого слоя будет происходить при оптических толщинах $(l_i + \Delta l_i)$, в совокупности обеспечивающих у m -слойного покрытия $T(\lambda_{\text{раб}}) = T_{\text{раб}}$, при значениях n_s , n_n и Δn_i , удовлетворяющих соотношениям (4) и (5):

$$\gamma^{(i)} = \frac{T^{(i)}(\lambda_1^{(i)})}{T^{(i)}(\lambda_2^{(i)})},$$

где $T^{(i)}(\lambda_1)$ и $T^{(i)}(\lambda_2)$ — коэффициенты пропускания части исходной конструкции покрытия, содержащей подложку и первые i слоев.

Для расчета $\lambda_1^{(i)}$ и $\lambda_2^{(i)}$ последовательно вычисляют значения функции

$$\Theta^{(i)}(\lambda) = \frac{T_1^{(i)}(\lambda)}{T_2^{(i)}(\lambda)}, \quad \lambda \in [\lambda_a, \lambda_D], \quad (17)$$

где $[\lambda_a, \lambda_D]$ — рабочий диапазон фотометра, и выявляют пары значений $\lambda_1^{(i)}$ и $\lambda_2^{(i)}$, удовлетворяющие соотношению

$$\Theta^{(i)}(\lambda_1^{(i)}) = \Theta^{(i)}(\lambda_2^{(i)}). \quad (18)$$

Среди всех значений $\lambda_1^{(i)}$ и $\lambda_2^{(i)}$, удовлетворяющих (15), т. е. обеспечивающих эффект адаптации при нанесении i -го слоя, выбираются те, при которых абсолютная погрешность в оптической толщине (δl_i), вызванная неточностью контроля, минимальна. При этом для определения δl_i можно использовать соотношение

$$\delta l_i = \frac{C \left(V_{T_1^{(i)}(\lambda_1^{(i)})} + V_{T_1^{(i)}(\lambda_2^{(i)})} \right)}{\frac{\partial T_1^{(i)}(\lambda_1^{(i)})}{\partial l_i} - \gamma^{(i)} \frac{\partial T_1^{(i)}(\lambda_2^{(i)})}{\partial l_i}}, \quad (19)$$

где C — постоянная, зависящая от частотной полосы усилителя и сопротивления в цепи нагрузки приемника тока. Соотношение (19) получено в предположении, что доминирующим является дробовый шум. Таким образом, в результате выполнения всей последовательности вычислительных операций определяются значения оптических толщин слоев покрытия l_1, l_2, \dots, l_m , длин волн фотометрирования $\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\gamma^{(i)} = T^{(i)}(\lambda_1^{(i)})/T^{(i)}(\lambda_2^{(i)})$, $i = 1, 2, \dots, m$, и $P^{(i)}$ — целое число, указывающее при нанесении i -го слоя номер соотношения $T^{(i)}(\lambda_1^{(i)}) = \gamma^{(i)} T^{(i)}(\lambda_2^{(i)})$ когда следует прервать процесс.

Для иллюстрации в таблице представлены данные по адаптивной конструкции двухслойного просветляющего покрытия для $n_s = 1,52$; $n_n = 2,05$; $n_n = 1,45$; $\Delta n_n^{(\text{max})} = 0,05$; $\alpha = 0$. Следует отметить, что при расчете адаптивных просветляющих покрытий нельзя использовать вышеописанную схему расчета первой и второй конструкций, так как все производные $\frac{\partial T}{\partial n_i}$ и $\frac{\partial T}{\partial l_i}$ равны нулю при $T = 0$. Расчет 2-слойных просветляющих покрытий, конструкции которых представлены в таблице, производился аналитически.

Аналогичная схема расчетов адаптивных конструкций может быть применена для оптического контроля толщин слоев по одной длине волны. Для этого сначала так же, как и в описанном выше случае, определяют методом из [1] конструкции, имеющие на длине волны $\lambda_{\text{раб}}$ энергетический коэффициент $T_{\text{раб}}$, и для каждой из них находят две

Параметры двухслойного просветляющего адаптивного покрытия для случая
 $n_{II} = 1,52; n_B = 2,5; n_H = 1,45; \Delta n_B^{(max)} = 0,05; \alpha = 0$

Номер слоя от подложки	Оптические толщины слоев в единицах $\lambda_{раб}/4$			Показатели преломления слоев			В единицах $\lambda_{раб}$			
	l_i	$l_i + \Delta l_i^{(1)}$	$l_i + \Delta l_i^{(2)}$	Исходное покрытие	I	II	$\lambda_1^{(i)}$	$\lambda_2^{(i)}$	$\gamma^{(i)}$	$P^{(i)}$
1	0,421	0,470	0,383	2,0	1,95	2,05	λ_B	λ_D	$\frac{T_1^{(1)}(\lambda_B)}{T_1^{(1)}(\lambda_D)}$	1
2	1,250	1,230	1,267	1,45	1,45	1,45	0,75	1,20	0,935	1

конструкции согласно соотношениям (8)–(14). Для каждого варианта отыскиваются значения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ — длины фотометрирования слоев покрытия. Значения $\{\lambda_i\}$ определяются таким образом, чтобы обеспечить выполнение соотношений

$$T_1^{(i)}(\lambda_f) = T_2^{(i)}(\lambda_f), \quad f = 1, 2, \dots, m. \quad (20)$$

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что расчет адаптивной конструкции, во-первых, предполагает определение не просто оптических толщин слоев, обеспечивающих при заданных показателях преломления требуемые оптические характеристики, но также всех параметров технологического контроля ($\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \gamma^{(i)}, P^{(i)}, i = 1, 2, \dots, m$); во-вторых, выполняется с учетом параметров, характеризующих процесс изготовления покрытия ($\Delta n_B^{(max)}, \alpha$).

Схема расчета адаптивных конструкций может быть развита и применительно к случаю кварцевого контроля толщин. Этот метод контроля основан на изменении частоты собственных колебаний кварцевой пластины при изменении ее массы. Изменение массы происходит при осаждении на кварцевую пластину пленкообразующего материала, при этом получают информацию об оптической толщине. Как несложно показать, между Δl и Δn в этом случае имеет место соотношение

$$\Delta l = - \frac{l \Delta n}{n(n-1 + \Delta n)}. \quad (21)$$

Условие адаптивности (3) примет вид

$$\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial T}{\partial l_{2i+1}} l_{2i+1} \frac{\Delta n_B}{n_B(n_B-1 + \Delta n_B)} - \frac{\partial T}{\partial l_{2i}} l_{2i} \frac{\Delta n_H}{n_H(n_H-1 + \Delta n_H)} \right] - \frac{\partial T}{\partial n_B} \Delta n_B - \frac{\partial T}{\partial n_H} \Delta n_H = 0 \quad (22)$$

(предполагается, что покрытие состоит из $(2m+1)$ -слоев и к подложке прилегает слой с n_B). В случае наличия корреляции между Δn_B и Δn_H в виде (5) из (22) получим

$$\sum_{i=0}^m \left[\frac{\partial T}{\partial l_{2i+1}} \frac{l_{2i+1}}{n_B(n_B-1 + \Delta n_B)} + \frac{\partial T}{\partial l_{2i}} \frac{\alpha l_{2i}}{n_H(n_H-1 + \Delta n_H)} \right] = \frac{\partial T}{\partial n_B} + \alpha \frac{\partial T}{\partial n_H}. \quad (23)$$

При отсутствии корреляции условия адаптивности примут вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=0}^m \frac{\partial T}{\partial l_{2i+1}} \frac{l_{2i+1}}{n_B(n_B-1 + \Delta n_B)} &= \frac{\partial T}{\partial n_B} \\ \sum_{i=1}^m \frac{\partial T}{\partial l_{2i}} \frac{l_{2i}}{n_H(n_H-1 + \Delta n_H)} &= \frac{\partial T}{\partial n_H} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Очевидно, что условия (24) значительно более жесткие, нежели (22).

Схема синтеза адаптивных покрытий для кварцевого контроля практически не отличается от описанной в [4].

В случае наличия корреляции между Δn_v и Δn_n предварительно просчитываются не только значения $\rho_1, \Delta_1, \rho_2, \Delta_2$, относящиеся к значениям n_v и n_n и оптическим толщинам, соответствующим выбранной сетке в пространстве неизвестных, но и

$$\rho_1', \Delta_1', \rho_2', \Delta_2', \rho_1'', \Delta_1'', \rho_2'', \Delta_2''.$$

Значения параметров, отмеченные одним штрихом, рассчитаны для $(n_n + \Delta n_n^{(\max)})$, $(n_v + \Delta n_v^{(\max)})$ и оптических толщин, отличающихся от основной конструкции согласно (21). Значения параметров с двумя штрихами — для $(n_n - \Delta n_n^{(\max)})$, $(n_v - \Delta n_v^{(\max)})$ и оптических толщин, также отличающихся от основной конструкции согласно (21). В процессе синтеза производится поиск конструкций покрытия, сообщающих минимум функционалу качества:

$$\Phi_1(\mathbf{X}) = [T_{\text{раб}} - T(\rho_1, \Delta_1, \rho_2, \Delta_2)]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1', \Delta_1', \rho_2', \Delta_2')]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1'', \Delta_1'', \rho_2'', \Delta_2'')]^2. \quad (25)$$

При отсутствии корреляции между Δn_v и Δn_n в оперативной памяти удерживаются, кроме вышеуказанных параметров, также $\rho_1''', \Delta_1''', \rho_2''', \Delta_2''', \rho_1''', \Delta_1''', \rho_2''', \Delta_2'''$. Значения параметров, отмеченные тремя штрихами, рассчитаны для $(n_n + \Delta n_n^{(\max)})$ и $(n_n - \Delta n_n^{(\max)})$ и оптических толщин, отличающихся от основной конструкции согласно (21), четырьмя штрихами — для $(n_v - \Delta n_v^{(\max)})$ и $(n_v + \Delta n_v^{(\max)})$. В процессе синтеза производится поиск конструкции покрытия, для которой минимален функционал качества:

$$\Phi_2(\mathbf{X}) = [T_{\text{раб}} - T(\rho_1, \Delta_1, \rho_2, \Delta_2)]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1', \Delta_1', \rho_2', \Delta_2')]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1'', \Delta_1'', \rho_2'', \Delta_2'')]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1''', \Delta_1''', \rho_2''', \Delta_2''')]^2 + [T_{\text{раб}} - T(\rho_1''''', \Delta_1''''', \rho_2''''', \Delta_2''''')]^2.$$

Приведем пример адаптивной конструкции 5-слойного светоделителя, обеспечивающего на длине волны $\lambda_{\text{раб}}$ энергетический коэффициент пропускания $T = (67,5 \pm 0,4)\%$ при коррелированных изменениях n_v в интервале $[1,860, 1,960]$ и $n_n = [1,412, 1,460]$. Оптические толщины слоев, считая от подложки с $n_n = 1,52$, в единицах $\lambda_{\text{раб}}/4$ равны 1,409; 0,352; 0,704; 1,409; 0,704. Эти толщины соответствуют значениям $n_v = 1,96$ и $n_n = 1,46$, т. е. случаю, когда слои беспористые и показатели преломления максимальны.

Вышеизложенное подтверждает возможность синтеза адаптивных конструкций, при реализации которых ошибки в показателях преломления слоев не приводят к изменению оптических характеристик. Компенсация влияния ошибок достигается изменением оптических толщин, которое выполняется автоматически при выбранной системе контроля. Кроме того, из представленных данных видно, что оптический метод контроля по двум длинам волн предпочтительнее, так как содержит дополнительно набор варьируемых параметров $\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, i = 1, 2, \dots, m$, что повышает вероятность отыскания решения по сравнению с кварцевым методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столов Е. Г. Синтез интерференционных оптических покрытий // Автометрия.— 1989.— № 6.

Поступила в редакцию 7 сентября 1990 г.