

УДК 535.417

СИНТЕЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Столос Е. Г.

В настоящей работе проводится дальнейшее развитие метода синтеза, описанного в [1, 2]. Целью данной работы является расширение сферы применения вышеуказанной теории расчета.

Изложенная в [1, 2] методика синтеза интерференционных покрытий позволяет производить поиск на равномерной сетке в пространстве варьируемых параметров (оптических толщин слоев) конструкций, обладающих оптическими характеристиками, наиболее близкими к требуемым. При этом обеспечивается максимальное быстродействие за счет полного предотвращения дублирования вычислительных операций. Эта теория была описана лишь применительно к тем случаям, когда синтезируемое покрытие является диэлектрическим, при поиске варьируемые толщины всех слоев изменяются в одном и том же интервале, варьируются оптические толщины всех слоев, целью расчета является отыскание конструкций покрытий, обладающего на заданных длинах волн коэффициентами отражения, наиболее близкими к требуемым.

В настоящей работе производится обобщение развитой теории на ряд практически важных случаев: поглощающих покрытий; разных интервалов варьирования оптических толщин слоев; варьирования оптических толщин части слоев; расчет покрытий с заданной зависимостью коэффициента пропускания и от длины волны и от угла падения излучения.

Идея метода синтеза, описанного в [1, 2], заключается в том, что интерференционное покрытие представляется в виде структуры Π_1 — P — Π_2 , где P — разделительный слой, Π_1 и Π_2 — части покрытия, расположенные слева и справа от разделительного слоя. В случае нормального падения светового потока и отсутствия поглощения в слоях энергетический коэффициент пропускания T , соответствующий длине волны λ , определяется формулой [3]

$$T = \frac{(1 - \rho_1^2(\lambda))(1 - \rho_2^2(\lambda))}{1 + \rho_1^2(\lambda)\rho_2^2(\lambda) - 2\rho_1(\lambda)\rho_2(\lambda)\cos(\Delta_1(\lambda) + \Delta_2(\lambda) + \frac{4\pi n_a d_a}{\lambda})}, \quad (1)$$

где $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ — модули амплитудных коэффициентов отражения обеих частей покрытия, $\Delta_1(\lambda)$ и $\Delta_2(\lambda)$ — сдвиги фазы электрического вектора при отражении со стороны разделительного слоя для частей покрытия Π_1 и Π_2 , n_a и d_a — показатель преломления и геометрическая толщина разделительного слоя. В процессе синтеза просчитываются и вносятся в память ЭВМ значения ρ_1 , Δ_1 , ρ_2 , Δ_2 , соответствующие различным комбинациям оптических толщин слоев покрытия на заданных длинах волн. При проверке по формуле (1) каждой из вышеупомянутых комбинаций толщин на соответствие требованиям конкретной задачи значения ρ_1 , Δ_1 , ρ_2 , Δ_2 не просчитывают заново, а берутся из памяти ЭВМ. Найденные конструкции покрытий оптимизируются [4, 5].

Эта теория синтеза может быть использована и при расчете покрытий, содержащих поглощающие слои. При этом следует вместо формулы (1) применять в случае непоглощающего разделительного слоя формулу

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 + \rho_1^2 \rho_2^2 - 2\rho_1 \rho_2 \cos\left(\frac{4\pi n_a d_a}{\lambda} + \Delta_1 + \Delta_2\right)}, \quad (2)$$

спектральные характеристики могут отклоняться от требуемых из-за неконтролируемых ошибок в оптических параметрах слоев. Например, при контроле оптических толщин слоев с помощью кварцевого датчика из-за различной пористости пленок спектральная характеристика покрытий может смещаться по спектру, сохраняя при этом свою форму. Спектральные характеристики в этом случае могут быть скорректированы путем нанесения на уже изготовленное покрытие по смещенной спектральной кривой дополнительных слоев, оптические толщины которых определяются на основе развитой теории синтеза. При этом оптические толщины слоев исходной конструкции остаются фиксированными, а оптические толщины дополнительных слоев варьируются. В качестве разделительного слоя выбирается центральный дополнительный слой. Π_1 образуется из исходного покрытия и части дополнительных слоев, расположенных между центральным дополнительным слоем и воздухом. Для иллюстраций в таблице представлены конструкции 12-слойных просветляющих покрытий, полученных в результате коррекции описанного выше 7-слойного просветляющего покрытия при различных величинах относительного смещения по спектру $\Delta\lambda/\lambda$. Далее приводятся значения коэффициентов отражения для длин волн λ_0 и $\lambda_0/2$ исходного покрытия и исходного покрытия с дополнительными

Конструкции скорректированных просветляющих покрытий

Номер среды	Показатель преломления среды	Оптические толщины слоев в единицах $\lambda_0/4$				
		$\Delta\lambda/\lambda = 0,9$	$\Delta\lambda/\lambda = 0,95$	$\Delta\lambda/\lambda = 1,05$	$\Delta\lambda/\lambda = 1,1$	
0	1.0	∞	∞	∞	∞	} корректирующие слои
1	1.45	0.671	0.637	0.553	0.512	
2	1.96	0.434	0.526	0.360	0.278	
3	1.45	0.070	0.136	0.326	0.394	
4	1.96	0.632	0.473	0.431	0.469	
5	1.45	0.974	0.789	0.453	0.292	
6	1.45	0.860	0.907	1.003	1.051	} исходное покрытие
7	1.96	0.168	0.178	0.196	0.206	
8	1.45	0.421	0.445	0.491	0.515	
9	1.96	0.170	0.180	0.198	0.208	
10	1.45	1.510	1.594	1.762	1.846	
11	1.96	0.166	0.176	0.194	0.204	
12	1.45	1.178	1.244	1.374	1.440	
13	1.51	∞	∞	∞	∞	
$R(\lambda_0/2), \%$		0.00	0.00	0.01	0.00	} без коррекции
$R(\lambda_0), \%$		0.00	0.01	0.01	0.01	
$R(\lambda_0/2), \%$		5.08	2.70	4.47	17.80	
$R(\lambda_0), \%$		2.60	0.82	0.53	2.20	

слоями. Как видно из таблицы, такой подход позволяет получить удовлетворительные результаты. Аналогичные приемы расчета могут использоваться и в других случаях, когда также необходимо варьировать лишь оптические толщины части слоев, например при синтезе отрезающих и полосовых фильтров.

Разработанная методика может применяться при синтезе покрытий, удовлетворяющих сложному критерию качества. Например, когда покрытие должно обладать требуемыми значениями коэффициентов пропускания на заданных длинах волн при заданных углах падения излучения, т. е. сообщать минимум функционалу

$$\Phi(\vec{X}) = \sum_{ik} [T(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k) - T_{ik}]^2, \quad i = 1, 2, \dots, f; \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad (6)$$

где \vec{X} — варьируемые оптические толщины слоев, λ_i — заданные значения длин волн, φ_k — заданные значения углов падения излучения, T_{ik} — заданное значение энергетического коэффициента пропускания покрытия на длине волны λ_i и угле падения излучения φ_k .

Схема синтеза, реализующая поиск конструкции, удовлетворяющей этому критерию, отличается от изложенной в [1] тем, что запоминаются значения ρ_1 , Δ_1 и ρ_2 , Δ_2 , соответствующие различным комбинациям значений λ_i и φ_k для s - и P -компонент падающего излучения, а значения $T^{(s)}(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k)$ и $T^{(P)}(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k)$ вычисляются по формуле, отличающейся от (1) наличием множителя $\cos \varphi_k$ перед членом $4\pi n_a d_a / \lambda (T^{(s)}, T^{(P)})$ — энергетические коэффициенты пропускания покрытия для s - и P -компонент падающего излучения). $T(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k)$ вычисляется по формуле

$$T(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k) = \frac{1}{2} (T^{(s)}(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k) + T^{(P)}(\vec{X}, \lambda_i, \varphi_k)). \quad (7)$$

Эта модифицированная схема расчета может применяться при синтезе поляризаторов, «мягких диафрагм», предназначенных для коррекции волнового фронта, оптических процессоров на основе интерференционных фильтров [6].

Из вышеизложенного видно, что теория синтеза, описанная в [1], может быть адаптирована применительно к различным задачам.

Литература

- [1] Столов Е. Г. — Опт. и спектр., 1984, т. 56, в. 6, с. 1121.
- [2] Столов Е. Г. — Опт. и спектр., 1985, т. 58, в. 4, с. 676.
- [3] Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л., 1977.
- [4] Ермолаев А. М., Минков И. М., Власов А. Г. — Опт. и спектр., 1962, т. 13, в. 2, с. 259.
- [5] Z u s c h a Н. — Appl. Opt., 1973, v. 12, N 5, p. 979.
- [6] Столов Е. Г. — Автометрия, 1982, № 5, с. 47.

Поступило в Редакцию 23 октября 1985 г.