

# КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ТОЛЩИН ОСАЖДАЕМЫХ СЛОЕВ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА РАБОЧИХ ОБРАЗЦАХ В ПРОЦЕССЕ РОСТА

© 2010 г. И. С. Гайнутдинов\*, доктор техн. наук; А. Г. Гусев\*; А. В. Душин\*;  
Р. М. Мустаев\*, канд. техн. наук; А. Р. Насыров\*, канд. физ.-мат. наук;  
Н. Г. Мирханов\*; А. В. Михайлов\*\*, канд. техн. наук

\*\* НПО “Государственный Институт Прикладной Оптики”, Казань

\*\* НПК “Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Проведен анализ ошибок фотометрического контроля толщин слоев при вакуумном напылении многослойных интерференционных систем. Показано, что при контроле толщин растущего слоя по изменению спектральной характеристики пропускания (отражения) в определенном интервале длин волн погрешность измерения сигнала не более 1% приводит к существенным ошибкам контроля толщин осаждаемых слоев. В случае контроля сквозным методом на расчетных фиксированных длинах волн ошибки менее значительны. Предложена оптическая система, позволяющая проводить контроль толщины слоев покрытия в процессе их нанесения по отражению непосредственно по рабочим деталям или свидетелю, расположенному рядом с деталями на куполе вращения.

**Ключевые слова:** фотометрический контроль, многослойные интерференционные системы.

Коды OCIS: 310.3840

Поступила в редакцию 12.08.2009

В последние годы интенсивно совершенствуются оптические приборы как гражданского, так и военного назначения. Высокие выходные характеристики оптико-электронных приборов не могут быть обеспечены без нанесения на оптические элементы высококачественных интерференционных покрытий. Возрастающие требования к оптическим характеристикам интерференционных покрытий приводят к увеличению числа некратных толщин в многослойных системах и большой чувствительности спектральной характеристики к малейшим отклонениям в толщинах слоев при их нанесении.

Разработка новых технологических процессов изготовления высококачественных интерференционных покрытий неразрывно связана с необходимостью повышения точности контроля толщин осаждаемых слоев.

Ошибки, возникающие при контроле толщин, можно разделить на два типа: функциональные – связанные с выбором метода контроля и технологические – возникающие из-за изменений технологических параметров осаждения (температуры подложек, скорости конденсации, давления остаточных газов и др.) в процессе роста слоев.

Фотометрическое измерение толщины растущей пленки основано на изменении прозрачности системы пленок на подложке при росте последней. Для однородных, непоглощающих пленок пропускание системы можно записать в следующем виде [1]:

$$T(\lambda, g) = \frac{T_0(\lambda)(1 - r_1^2(\lambda))(1 - r_2^2(\lambda))}{(1 - r_1^2(\lambda))(1 - r_2^2(\lambda))(1 - T_0) + T_0(\lambda)F(\lambda, g)}, \quad (1)$$

где

$$F(\lambda, g) = 1 + r_1^2(\lambda)r_2^2(\lambda) + \\ + 2r_1(\lambda)r_2(\lambda)\cos\left(\frac{4\pi n_1(\lambda)g}{\lambda} + \Delta_2(\lambda)\right),$$

$T_0(\lambda) = 4n(\lambda)/(1 + n)^2$  – френелевская прозрачность одной границы плоскопараллельной подложки с показателем преломления  $n$ ,  $r_1$  – френелевское отражение на наружной границе растущей пленки с показателем преломления  $n_1$  и толщиной в момент измерения  $g$ ,  $r_2$  – френелевское отражение с фазой  $\Delta_2$  на второй границе растущей пленки с учетом всей ранее нанесенной системы слоев на длине волны зондирующего излучения  $\lambda$ .

Как правило, при оптическом контроле фиксируется экстремальное значение прозрачности полной системы слоев на фиксированной длине волны. Если все слои системы, нанесенные до рассматриваемого слоя, строго четвертьволновые, или рассматривается нанесение только первого слоя, то сдвиг фазы  $\Delta_2$  равен либо 0, либо  $\pi$  и экстремум достигается при толщине пленки, кратной четверти длины волны зондирующего излучения [2]. Страгая фиксация экстремумов для случая многослойного покрытия возможна только в случае, когда абсолютно точно известен показатель преломления растущей пленки, что позволяет рассчитать величину  $T_{\text{extr}}$  и при измерении прозрачности ее верно зафиксировать. Такое идеальное положение в действительности никогда не наблюдается. Показатель преломления пленки связан с условиями ее роста [3], с пористостью, зависящей от параметров процесса [1]; т. е. предварительный расчет значения экстремума неосуществим. В этом случае, очевидно, фиксация экстремума возможна только после его прохождения, т. е. после изменения прозрачности от экстремального значения на некоторую фиксированную величину. Для снижения ошибки предлагались различные методики, каждая из которых имела свои преимущества и свои недостатки и в целом не могла считаться наилучшей во всех случаях. Так, для контроля толщин слоев при изготовлении узкополосных фильтров Ш.А. Фурманом был предложен сквозной метод контроля, позволяющий скомпенсировать влияние появляющихся ошибок в толщинах слоев на оптические свойства системы в целом. Этот метод в дальнейшем развивался и многократно моделировался [4]. Кроме этого метода развивались и другие, аналогичные ему, а также делались попытки скомпенсировать влияние погрешности измерений [2]. Особые надежды возлагались на фиксацию экстремумов по равенству нулю производной сигнала прозрачности и наблюдение получаемой спектральной характеристики покрытия в процессе роста слоев [5]. Анализ показывает, что метод фиксации экстремумов прозрачности или отражения по прохождению через ноль производной от сигнала прозрачности или отражения страдает практически всеми типичными ошибками уже потому, что практически невозможно избавиться от шумовой составляющей сигнала (шумы приемника, шумы электроники), а по мере уменьшения сигнала производной отношение сигнал/шум изменяется не в лучшую сторону, что и приводит к значительным ошибкам.

Поэтому, несмотря на хорошую теоретическую проработку метода и некоторые его преимущества перед другими [5] он все же не находит широкого применения.

Как уже отмечалось, если все слои системы, нанесенные до растущего слоя, строго четвертьволновые, то сдвиг фазы  $\Delta_2$  равен либо 0, либо  $\pi$  и экстремум достигается при толщине пленки, кратной четверти длины волны зондирующего излучения. В случае некратных толщин точка экстремума достигается на других длинах волн, которые можно найти из условия экстремума функции (1)

$$\cos\left(\frac{4\pi n_1 g}{\lambda} + \Delta_2\right) = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)}{2r_1 r_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2r_1 r_2}. \quad (2)$$

Френелевский коэффициент  $r_1(\lambda)$  зависит только от оптических постоянных растущего слоя,  $r_2(\lambda)$  – от оптических свойств нижележащей системы слоев, которые могут быть вычислены в заданном диапазоне длин волн. Авторами данной работы создана программа, позволяющая определять длины волн контроля, на которых будут наблюдаться экстремальные значения  $T(R)$  при данной толщине определенного слоя. При задании широкого интервала поиска длин волн и количестве нижележащих слоев более двух решение уравнения (2), как правило, содержит несколько корней, а оптимальное решение находится из условия максимального изменения  $T(R)$  на данной длине волны контроля. При задании широкого диапазона поиска решения уравнения (2) необходимо учитывать дисперсию материалов всех слоев. В качестве примера возьмем 27-слойное дихроичное покрытие [6]. В таблице приведены требуемые оптические толщины каждого слоя (колонка 2) и расчетные длины волн (колонка 3), на которых достигается точка экстремума.

На рис. 1 приведена диаграмма сквозного контроля первых 15-ти слоев системы на оптимальных длинах волн. Контроль проводился по отражению. Как уже отмечалось, для уверенного определения точки экстремума надо ее перейти, что вносит ошибку. С учетом шумовых характеристик фотометрической системы и точности контроля переход через  $R_{\text{extr}}$  составлял  $\Delta R = 0,1\%$ . Ошибки в фиксации оптических толщин для каждого слоя отличны и при заданном  $\Delta R = 0,1\%$  рассчитывались для каждого слоя. Результаты расчетов толщин приведены в таблице (колонка 3).

Оптические толщины 27-слойного дихроичного покрытия и расчетные длины волн, на которых достигается точка экстремума

Слой	$g = 1$ (расчетная)	$g = 2$ (при контроле по спектру)	$\lambda$ , мкм	$g = 3$ (при контроле по длине волны)
1	0,536	0,51	0,311	0,55
2	0,662	0,59	0,363	0,68
3	1,0	0,97	0,31–0,486	1,02
4	0,797	0,74	0,337–0,474	0,81
5	0,795	0,775	0,318–0,468	0,81
6	0,946	0,89	0,304–0,503	1,0
7	0,905	0,883	0,325–0,512	0,925
8	0,838	0,78	0,316–0,501	0,86
9	0,89	0,87	0,303–0,507	0,91
10	0,924	0,865	0,32–0,519	0,94
11	0,893	0,872	0,315–0,519	0,91
12	0,87	0,815	0,305–0,513	0,89
13	0,897	0,875	0,301–0,516	0,91
14	0,916	0,86	0,313–0,522	0,935
15	0,897	0,876	0,306–0,521	0,91
16	0,87	0,815	0,303–0,515	0,89
17	0,893	0,873	0,311–0,516	0,91
18	0,924	0,87	0,307–0,524	0,945
19	0,89	0,87	0,305–0,521	0,91
20	0,838	0,78	0,311–0,507	0,86
21	1,0	0,88	0,307–0,515	0,925
22	0,946	0,88	0,305–0,528	0,965
23	0,795	0,775	0,31–0,502	0,81
24	0,798	0,71	0,304–0,487	0,82
25	1,0	0,968	0,303–0,523	1,02
26	0,663	0,58	0,306–0,47	0,68
27	0,536	0,34	0,306–1,094	0,55

Теоретическая спектральная характеристика дихроичного покрытия представлена кривой 1 на рис. 2, а спектральная характеристика покрытия, полученная в результате моделирования ошибок контроля на нескольких длинах волн, – кривой 2 на том же рисунке. Изменения в спектральной характеристике незначительны. Таким образом, сквозным контролем на опреде-

ленных фиксированных длинах волн, несмотря на накопление ошибок в определении толщин, возможно отследить большое число некратных толщин по одному контрольному (рабочему) образцу.

В работе [6] предложен усовершенствованный широкополосный акустооптический спектрографометр для контроля нанесения оптических

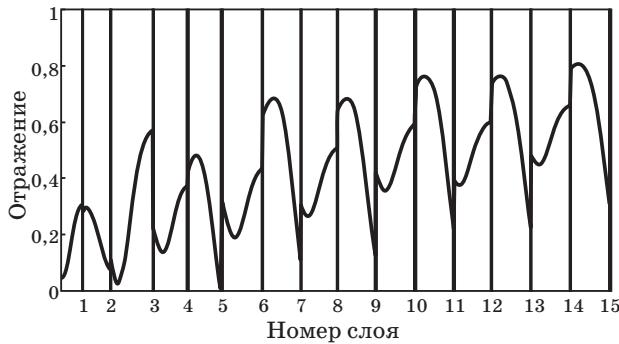


Рис. 1. Диаграмма сквозного контроля.

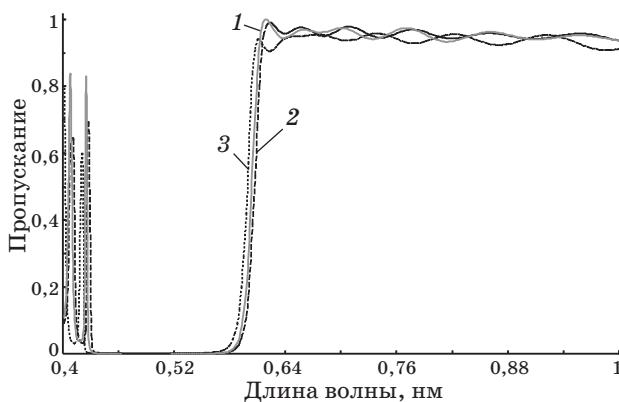


Рис. 2. Спектральная характеристика дихроичного покрытия. 1 – расчетные значения толщин, 2 – контроль по длине волны, 3 – контроль по спектру.

покрытий, позволяющий проводить оптический контроль в режиме спектровизора, т. е. для контроля всей спектральной характеристики покрытия в процессе напыления в реальном масштабе времени. Сигнал прекращения нанесения слоя появляется при достижении минимума функционала

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [T(\lambda, g) - T_0(\lambda)]^m d\lambda, \quad (3)$$

где  $[\lambda_1, \lambda_2]$  – заданный интервал спектра,  $T_0(\lambda)$  – прозрачность одной или нескольких пленок, к которой стремимся,  $T(\lambda, g)$  – прозрачность при конкретном значении толщины  $g$  растущего слоя,  $m$  – показатель степени, обычно равный 2.

Так как в процессе контроля используется определенный спектральный диапазон, необходимо предварительно знать дисперсию показателя преломления растущего слоя и его однородность. В противном случае минимум функционала (3) может достигаться где угодно, но не обязательно при заданной толщине слоя. Таким

образом, в самом методе анализа оптических свойств системы растущих слоев заключается возможность получить ошибочные значения толщин.

Моделирование метода контроля толщины при  $m = 2$  [4] в диапазоне длин волн 0,6–1,0 мкм для 27-слойного дихроичного покрытия (таблица, колонка 2), показало следующее. Погрешность 1% при уровне сигнала  $T = 50$ –90% приводит к существенным ошибкам при контроле толщин слоев (таблица, колонка 4), что отражается на спектральной характеристике получаемого покрытия (рис. 2 кривая 3). При внесении в систему большой ошибки поведение функционала (3) неустойчиво и в некоторых случаях минимум не наблюдается. При моделировании дисперсия и неоднородность слоев не учитывалась.

Существующие системы контроля толщины слоев, в основном, основаны на косвенном методе, где измерение толщины ведется по контрольному образцу, расположенному неподвижно на некотором расстоянии от рабочих деталей [2]. Различия условий осаждения (температуры, скорости конденсации и др.) на контрольных и рабочих образцах в процессе нанесения слоев приводят к большим ошибкам в определении толщин слоев на рабочих деталях. В процессе испарения изменяется и диаграмма направленности испарителей, причем учесть данное изменение очень проблематично. Поэтому соотношение между толщинами на контрольном и рабочих образцах в процессе нанесения может изменяться неконтролируемо, что приводит к искажению спектральной характеристики рабочих образцов. Если контролировать толщину покрытия в процессе нанесения по рабочим образцам, то можно избежать ошибок, связанных с неравномерностью распределения температуры и диаграммы направленности испарения.

Отечественная промышленность серийно выпускает систему фотометрического контроля СФКТ-7Б, позволяющую контролировать толщины слоев непосредственно по рабочим образцам, но только по пропусканию. При времени интегрирования сигнала порядка 10 с стабильность сигнала составляет  $\pm 2\%$ , что неудовлетворительно. Кроме того, большую трудность представляет контроль по пропусканию материалов, имеющих сильное поглощение в области длин волн 0,8–2 мкм (Si, Ge, PbTe и др.). Как правило, контроль толщин слоев данных материалов проводят по отражению.

Предложена оптическая система, позволяющая проводить контроль толщины слоев покры-

тия в процессе их нанесения непосредственно по рабочим деталям или свидетелю, расположенному рядом с деталями на куполе вращения, по отражению. Оптическая схема приведена на рис. 3.

Отражающая призма 1 расположена на столе вращения 2. Луч от модулятора 4 проходит через призму, изменяет свое направление на угол  $\alpha$  и попадает на рабочий образец (или контрольный свидетель). Отражаясь от рабочего образца, луч попадает обратно на призму и далее после делильной пластины 3 на фильтр (монохроматор) и фотоприемное устройство.

В процессе вращения из-за неточности юстировки параллельности места положения оси вращения и оптической оси возникает уход сигнала от  $R_{\max}$  до  $R_{\min}$ . Для согласования работы компьютера с вращением подколпачной арматуры на столе вращения закреплены магниты 5 и геркон 6, позволяющие синхронизировать вращение арматуры с моментом принимаемого сигнала. При прохождении магнитов над герконом на компьютер подается сигнал разрешения на прием измеряемого сигнала. На рис. 4. приведен

вид сигнала, синхронизированного с вращением подколпачной арматуры. Точки  $A$  и  $B$  отмечено начало и окончание приема сигнала.

Интегрирование сигнала по времени от точки  $A$  до  $B$  показало, что отклонение интегралов каждого периода составляет менее 0,2%. Это позволяет проводить измерение относительного коэффициента отражения с погрешностью 0,2% в течение 5–10 периодов вращения без учета общего ухода сигнала, а так как контроль толщин, как правило, проводится по точке экстремума, то уход сигнала за более длительный период можно не учитывать. При скорости вращения арматуры 30–60 об/мин и длительности нанесения слоя толщиной  $g = 1$ , равной 5 мин, точность контроля с учетом длительности периода вращения составит 0,0066–0,0033 от  $g = 1$  на один период вращения, что вполне допустимо. При больших скоростях нанесения необходимо разбить период вращения на секторы программно или с помощью установки дополнительных магнитов, отвечающих за разрешение приема сигнала. В этом случае необходимо программно анализировать изменение сигнала при вращении от сектора к сектору и выделять относительное изменение.

Данная система была успешно реализована на вакуумной установке А-700Q и показала высокую воспроизводимость получения узкополосных 19-слойных фильтров на основе чередующихся слоев  $ZrO_2$  и  $SiO_2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- Гусев А.Г., Несмелов Е.А. Автоматизация контроля оптических толщин пленок в процессе нанесения интерференционных покрытий // ОМП. 1989. Т. 56. № 9. С. 34–36.
- Несмелов Е.А., Борисов А.Н., Никитин А.С., Гайнутдинов И.С. Влияние структуры слоев интерференционного покрытия на его оптические свойства // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 11. С. 29–32.
- Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбулин И.Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: ФЭН, 2002. 592 с.
- Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 257 с.
- Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Матшина Н.П., Конюхов Г.П. Математическое моделирование метода оптического контроля толщин слоев интерференционного покрытия // ОМП. 1987. Т. 54. № 6. С. 14–15.
- Бернхт К.Г. Методы контроля и измерения толщины пленок и способы получения пленок, однородных по толщине // Физика тонких пленок / Под ред. Хасса Г. и Туна Р.Э. М.: Мир, 1968. Т. 3. С. 7–57.

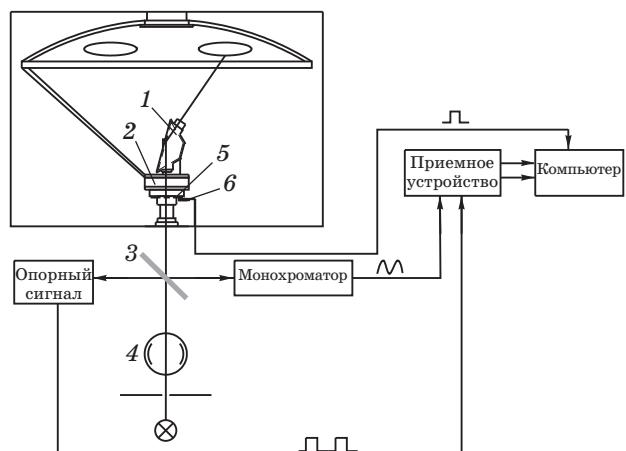


Рис. 3. Оптическая система, позволяющая проводить контроль толщины слоев покрытия в процессе их нанесения непосредственно по рабочим деталям.

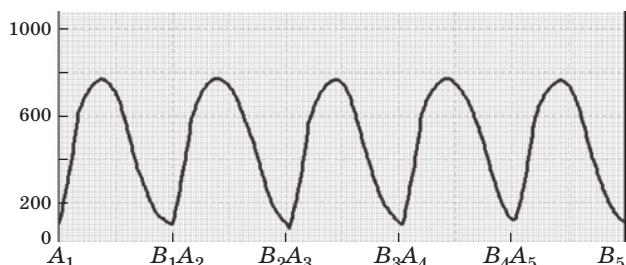


Рис. 4. Вид сигнала, синхронизированного с вращением подколпачной арматуры.