

## НАНЕСЕНИЕ РАВНОМЕРНЫХ ПО ТОЛЩИНЕ ПОКРЫТИЙ НА БОЛЬШИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ

© 2005 г. Г. И. Абзалова\*, Р. С. Сабиров\*, канд. техн. наук; А. В. Михайлов\*\*, канд. техн. наук

\* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

\*\* ВНИЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Рассмотрен метод повышения равномерности по толщине многослойных интерференционных покрытий, наносимых электронно-лучевым испарением в вакууме на сферические поверхности путем экранирования с помощью маски потока молекул испаряемого материала. Получены аналитические выражения для расчета формы маски и приведены экспериментальные результаты. На вакуумной установке с диаметром камеры 700 мм изготовлены отражающие покрытия из оксидов циркония и кремния с неравномерностью по толщине не более  $\pm 1,5\%$  на плоской подложке диаметром 550 мм.

Коды OCIS: 310.1620.

Поступила в редакцию 04.04.2005.

Для нанесения интерференционных покрытий с постоянными оптическими характеристиками на большие поверхности необходимо обеспечить требуемую равномерность по толщине покрытия, что представляет собой достаточно сложную задачу, особенно при электронно-лучевом методе испарения. Решению этой задачи посвящен целый ряд работ [1–10]. Однако в них исследовалось нанесение покрытий на оптические элементы диаметром до 250 мм.

В настоящей работе рассматривается нанесение методом электронно-лучевого испарения в вакууме равномерного по толщине покрытия на подложке со сферической поверхностью, диаметр которой приближается к диаметру вакуумной камеры. При этом используется экранирование потока молекул испаряемого материала вращающейся маской.

Схема взаимного расположения испарителя, подложки и маски приведена на рис. 1. Для использования нескольких симметрично расположенных испарителей центр вращения маски располагается на оси вращения подложки ( $C$  – центр сферической подложки). Высота расположения маски  $l$  над испарителем выбирается так, чтобы центральная часть маски не экранировала подложку от испарителя, и определяется соотношением

$$l \leq \frac{m}{h_1}(r_{\max} + m), \quad (1)$$

где  $m$  – расстояние от испарителя до оси вращения подложки  $O$ ,  $h_1$  – высота расположения сечения  $r_{\max}$ .

Профиль маски определим функцией угловой ширины  $\theta(\rho)$  в полярной системе координат. При неподвижной подложке элемент поверхности подложки на окружности сечения радиусом  $r$  будет перекрываться при одном обороте маски на относительное время  $\frac{\theta(R_r)}{2\pi}$ , где  $\theta(R_r)$  – проекция маски на плоскость сечения  $r$ , а

$$R_r = \frac{h_r}{l} \rho, \quad h_r = h - R + \sqrt{R^2 - r^2}.$$

Количество вещества, нанесенного на элемент поверхности  $rdr$ , определяется как

$$M(r, \varphi) = \rho_{\text{п}} \left[ 1 - \frac{\theta(R_r)}{2\pi} \right] t(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (2)$$

где  $t(r, \varphi)$  – толщина пленки на элементе  $rdr$  в произвольной точке  $P$  на поверхности подложки при отсутствии маски.

Общее количество вещества, нанесенного на кольцо радиуса  $r$ , шириной  $dr$ , составит

$$M(r) = \rho_{\text{п}} \int_0^{2\pi} \left[ 1 - \frac{\theta(R_r)}{2\pi} \right] t_r(r, \varphi) d\varphi \int_{r_1}^{r_2} dr. \quad (3)$$

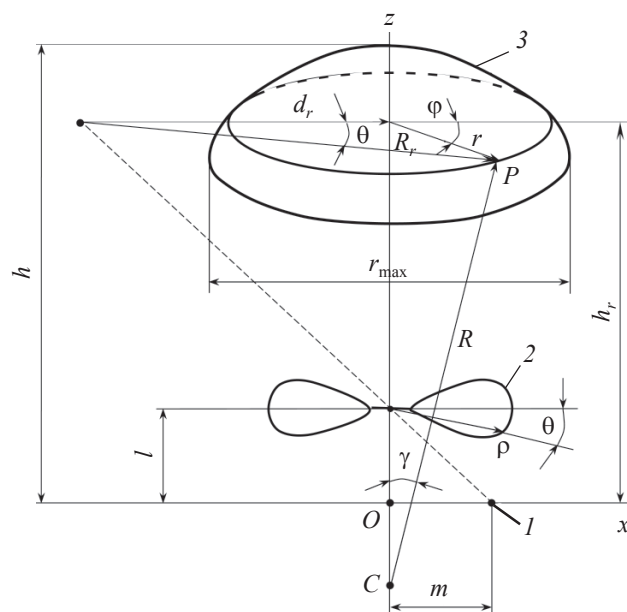


Рис. 1. Схема расположения испарителя 1, маски 2 и подложки 3.

Предположим, что подложка вращается, при этом скорость вращения маски намного больше скорости вращения подложки. Тогда испаряемый материал равномерно распределяется в пределах этого кольца и толщина пленки на расстоянии  $r$  от оси вращения определяется выражением

$$t_{cp}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ 1 - \frac{\theta(R_r)}{2\pi} \right] t_r(r, \varphi) d\varphi. \quad (4)$$

Толщина пленки на вершине сферы ( $r = 0$ ) составит

$$t_{cp}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ 1 - \frac{\theta(0)}{2\pi} \right] t_0(0, \varphi) d\varphi, \quad (5)$$

где  $\theta(0)$  – угловая ширина маски при  $r = 0$ , для которого  $R_r = \frac{h}{l} \rho$ .

Определим толщину  $t = f(r, \varphi)$ , используя эмиссионную характеристику испарителя в виде [11]

$$\phi(\alpha) = \cos^n \alpha, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол испарения,  $n$  – параметр, зависящий от формы кратера, образующегося в испаряемом материале при воздействии электронного луча.

Применяя методику расчета толщины пленки на плоской поверхности [12], толщину пленки в произвольной точке  $P$  на сечении радиуса  $r$  неподвижной сферической поверхности можно записать в виде

$$\int_0^{2\pi} \left[ 1 - \frac{\theta(R_r)}{2\pi} \right] \frac{\left[ h - R + \sqrt{R^2 - r^2} \right]^n \left[ R^2 - rm \cos \varphi + (h - R) \sqrt{R^2 - r^2} \right]}{R \left[ r^2 + m^2 - 2mr \cos \varphi + \left( h - R + \sqrt{R^2 - r^2} \right)^2 \right]^{\frac{n+3}{2}}} d\varphi = \frac{h^{n+1}}{(m^2 + h^2)^{\frac{n+3}{2}}} \int_0^{2\pi} \left( 1 - \frac{\theta(0)}{2\pi} \right) d\varphi.$$

Профиль маски представим в виде кривой второго порядка [9]:

$$\theta(\rho) = K + E\rho + \Lambda\rho^2, \quad (12)$$

где  $K, E, \Lambda$  – постоянные коэффициенты.

Проекция маски на плоскость сечения  $r$

$$\theta(R_r) = K + ER_r + \Lambda R_r^2. \quad (13)$$

Определяя значения коэффициента  $K$  из условия

$\theta(R_r) = 0$  при  $R_r = r_{\max} + d_m$ ,  $d_m = \frac{m(h_m - l)}{l}$ , где  $h_m$  – высота расположения сечения  $r = r_{\max}$ , получаем

$$\theta(R_r) = \Lambda \left[ R_r^2 - (d_m + r_{\max})^2 \right] + E \left[ R_r - (d_m + r_{\max}) \right]. \quad (14)$$

Учитывая, что  $R_r^2 = r^2 + d_r^2 + 2rd_r \cos \varphi$ , где  $d_r = \frac{m(h_r - l)}{l}$ , перейдем к координатам  $r, \varphi$ :

$$t(r, \varphi) = \frac{M_{ii}}{\pi \rho_{ii} S^2} \cos^n \alpha \cos \beta, \quad (7)$$

где  $M_{ii}$  – масса испаряемого материала,  $\rho_{ii}$  – плотность пленки,  $\beta$  – угол падения потока молекул в рассматриваемой точке,  $S$  – расстояние от испарителя до этой точки.

Определяя координаты произвольной точки на поверхности сферы радиуса  $r$  в виде

$$\{r \cos \varphi, r \sin \varphi, h - R(1 - \cos \varphi)\},$$

находим

$$\cos \alpha = \frac{h - R + \sqrt{R^2 - r^2}}{S}, \quad (8)$$

$$\cos \beta = \frac{R^2 - rm \cos \varphi + (h - R) \sqrt{R^2 - r^2}}{SR}, \quad (9)$$

$$S^2 = r^2 + m^2 - 2mr \cos \varphi + \left[ h - R + \sqrt{R^2 - r^2} \right]^2. \quad (10)$$

Форма маски должна обеспечивать выполнение условия

$$\frac{t_{cp}(r)}{t_{cp}(0)} = 1. \quad (11)$$

Подставляя (4), (5), (8)–(10) в (11), получаем уравнение для расчета формы маски

$$\theta(r) = \Lambda \left[ \left( r^2 + d_r^2 + 2rd_r \cos \varphi \right)^2 - (d_m + r_{\max})^2 \right] + E \left[ \left( r^2 + d_r^2 + 2rd_r \cos \varphi \right)^{1/2} - (d_m + r_{\max}) \right]. \quad (15)$$

При  $r = 0$  получаем

$$\theta(0) = \Lambda \left[ d_r^2 - (d_m + r_{\max})^2 \right] + E \left[ d_r - (d_m + r_{\max}) \right]. \quad (16)$$

Полученные результаты использовались для изготовления равномерных по толщине покрытий на сферических и плоских поверхностях. Интерференционные покрытия из оксидов циркония и кремния наносились на установке с диаметром вакуумной камеры 700 мм.

В [11] подробно исследована эмиссионная характеристика электронно-лучевого испарителя при испарении тугоплавких оксидов, в частности из окси-

дов циркония и кремния. Показано, что она зависит от формы образующегося кратера, может изменяться в процессе испарения и в наиболее используемых режимах испарения параметр  $n$  находится в пределах 1–2.

Были определены следующие значения коэффициентов, при которых обеспечивается наилучшая равномерность покрытий для изменения  $n$  в пределах от 1 до 2:  $E = 35,6 \times 10^{-3}$  рад/мм,  $\Lambda = -45 \times 10^{-6}$  рад/мм<sup>2</sup>. Расчетное относительное изменение толщины пленки для  $n = 1$  и 2 находится в пределах от 1,1 до 1,9% для  $r_{\max} = 300$  мм (рис. 2, кривые 1, 2).

Для удобства вращения маска изготавливалась в виде двух лепестков, при этом лепестки изготавливались симметричными, как показано на рис. 1.

На тонкие плоские пластины из зеркального стекла размерами 420×420 мм были нанесены фильтрующая система конструкции  $(\text{ВН})^4 2\text{В}(\text{НВ})^4$  и отражающее покрытие конструкции  $(\text{ВН})^{11}\text{Н}$  на длину волны 1,064 мкм. Для измерения спектральной характеристики подложка разрезалась на пластины размерами 40×40 мм. После незначительной корректировки формы маски на подложке диаметром 550 мм была достигнута неравномерность не более  $\pm 1,5\%$  (рис. 2, кривая 3).

Результаты работы показывают возможность достижения высокой равномерности многослойных покрытий, наносимых методом электронно-лучевого испарения в вакууме на оптические элементы, диаметр которых приближается к диаметру вакуумной камеры, за счет экранирования потока пара вращающейся маской. При этом форму маски необходимо определять с учетом нестабильности эмиссионных характеристик электронно-лучевого испарителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ramsay I.V., Netterfield R.P., Mugridge E.G. Large-area uniform evaporated thin films // *Vakuum*. 1974. Bd. 24. № 8. P. 337–340.
2. Дробот А.Д., Егоров В.Н., Клонов Ю.К., Маликов С.Н., Пантелеев Г.В., Пацкевич Н.И., Ямпольский В.И. Оптимизация условий напыления оптических покрытий // *ОМП*. 1981. № 8. С. 53–57.

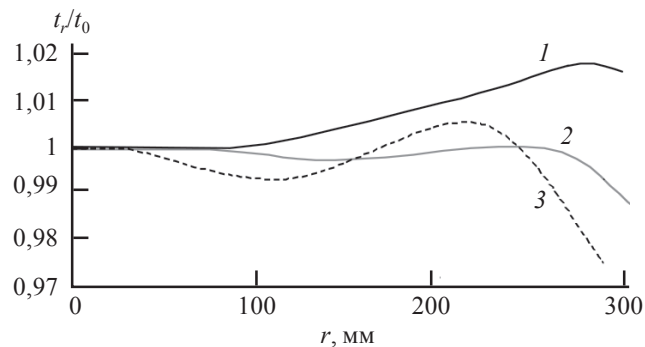


Рис. 2. Относительное распределение толщины пленки (покрытия): 1 – расчет для  $n = 1$ , 2 – расчет для  $n = 2$ , 3 – экспериментальные данные.

3. Ковалев В.И., Хомякова Ф.Т., Чариков А.В. Расчет толщины слоя конденсата при нанесении покрытий в вакууме // *ОМП*. 1981. № 10. С. 45–48.
4. Усокин А.И. Корректирующие диаграммы для повышения равномерности толщины вакуумных покрытий // *ОМП*. 1984. № 8. С. 33–36.
5. Костюченко Н.Г., Повецено В.П., Демидович Т.И., Петлицкая Я.В., Трофимова Ж.П., Тютюма С.А., Холодов В.М. Влияние формы поверхности испарения на распределение конденсата // *ОМП*. 1985. № 5. С. 43–45.
6. Пантелеев Г.В., Зорина Н.В., Моршаков В.В. Нанесение покрытий равномерной толщины из тугоплавких окислов на оптические элементы диаметром до 250 мм // *ОМП*. 1985. № 6. С. 35–36.
7. Чжон Сун Ким, Путилин Э.С. Экспериментальные характеристики электронно-лучевых испарителей // *Оптический журнал*. 2000. Т. 67. № 4. С. 100–103.
8. Белашенков Н.Р., Карасев В.Б., Путилин Э.С., Филмин Л.Н., Храмов В.Ю. Градиентные лазерные зеркала // *Оптический журнал*. 2001. Т. 68. № 4. С. 9–19.
9. Чжон Сун Ким, Путилин Э.С. Математическое моделирование процесса осаждения оптических тонких пленок // *Оптический журнал*. 1997. Т. 64. № 8. С. 61–65.
10. Villa F., Martinez A., Regalado L.E. Correction masks for thickness uniformity in large-area thin films // *Appl. Opt.* 2000. V. 32. № 10. P. 160–1610.
11. Сабиров Р.С. Диаграмма направленности электронно-лучевого испарителя при испарении тугоплавких окислов // *ОМП*. № 8. С. 36–38.
12. Сабиров Р.С. Расчет толщины пленки, получаемой электронно-лучевым испарением // *ОМП*. 1985. № 7. С. 18–20.