

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ СЛОЕВ НА СФЕРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

© 2008 г. Л. А. Губанова, канд. техн. наук; Э. С. Путилин, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: La7777@mail.ru

Рассмотрены факторы, влияющие на распределение толщины слоя на сферической поверхности выпуклой формы известного радиуса при формировании на ней слоев через плоскую диафрагму простейшей формы. Показано влияние расположения оптической детали и диафрагмы относительно испарителя на характер распределения толщины слоя.

Коды OCIS: 310.0310.

Поступила в редакцию 10.09.2007.

В большинстве оптических систем используются сферические поверхности. Поэтому формирование на них оптических интерференционных покрытий представляет несомненный интерес. При создании асферических поверхностей и градиентных зеркал конфокальных лазерных резонаторов актуальной является задача изготовления слоев с некоторым наперед заданным распределением толщины слоя по поверхности оптического элемента. Для управления распределением коэффициента отражения (пропускания) по поверхности оптического элемента и создания асферических поверхностей используют слои, толщина которых является функцией координат поверхности оптического элемента. Поэтому оптические детали с заданным распределением коэффициента отражения по сферической поверхности могут использоваться в качестве “мягких” внутрирезонаторных диафрагм и корригирующих систем в объективах фото-, теле- и кинокамер.

Ранее нами были рассмотрены возможности формирования слоев с заданным распределением толщины на плоской поверхности с помощью простейших диафрагм [1]. Воспользуемся предложенным там способом для получения градиентных слоев на сферических поверхностях. Определим распределение толщины слоя на сферической поверхности радиусом \mathcal{R} при осаждении на нее пленкообразующего материала через плоскую круглую диафрагму известного радиуса r_d , удаленную от плоскости испарителя на некоторое расстояние h и находящуюся в плоскости $x'y'$ (рис. 1), параллельной плоскости xz , в которой расположен испаритель. Центр диафрагмы лежит на оси вращения подложки и вращается вместе с ней с угловой скоростью ω_1 . Ось z направлена по нормали к поверхности испарителя. Испарение осуществляется из маленького поверхностного испарителя (МПИ), расположенного на расстоянии a от оси вращения подложкодержателя, на вращающуюся подложку.

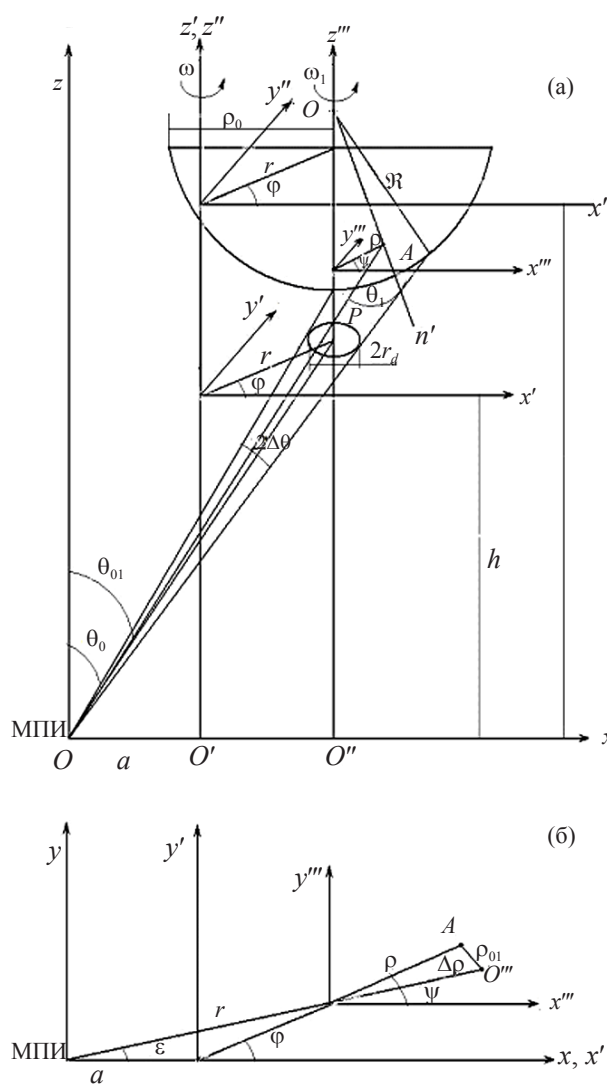


Рис. 1. а – схема расположения элементов испарительной установки при осаждении слоя через круглую диафрагму на выпуклую сферическую подложку, совершающую планетарное вращение, б – вид сверху на подложку.

Диафрагма жестко связана с оптической деталью сферической формы так, что центр диафрагмы расположен на оси симметрии детали, параллельной

оси z . Расстояние между осью вращения подложкодержателя, вращающегося со скоростью ω , и центрами подложек – r (где r – это радиальная координата, определяющая положение центра вращения подложек во время испарения слоя, связанная с осью вращения подложкодержателя в системе координат $x''y''z''$, ось z' совпадает с осью вращения подложкодержателя).

Для определения распределения толщины слоя по поверхности подложки следует определить координаты точки A на сферической поверхности. С этой целью необходимо ввести следующие величины в системе координат $x''y''z''$:

– угловую координату φ , определяющую положение центра вращения подложек во время испарения слоя;

– угловую координату φ_0 , определяющую положение центра вращения подложек в момент начала испарения слоя;

– радиальную координату ρ , определяющую положение точки A на поверхности подложки в системе координат $x'''y'''z'''$, связанной с осью вращения подложки, при условии, что ось вращения подложки совпадает с осью z''' .

Положение плоскости $x'''y'''$ зависит от радиальной координаты ρ . Для выпуклой и вогнутой подложек центр кривизны O совпадает с осью вращения подложек. Расстояние до центра кривизны подложки от плоскости xy , в которой расположен

испаритель, равно $H \pm \sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho_0^2}$, где знак “+” перед корнем относится к выпуклой, а знак “–” к вогнутой сферической поверхности; H – расстояние от плоскости испарителя до подложкодержателя по нормали, ρ_0 – габаритный радиус подложки, ψ – угловая координата, определяющая положение точки на подложке во время испарения слоя; ψ_0 – угловая координата, определяющая положение точки на подложке в момент начала испарения слоя; при равномерном вращении подложкодержателя и подложек $\varphi = \omega t$, а отношение $\psi/\varphi = \alpha$.

При формировании толщины слоя на подложке, совершающей планетарное вращение, при термическом испарении из МПИ толщина определяется выражением [2]

$$t = \frac{\beta v}{\pi g \omega} \int_0^T \frac{\cos \theta_0 \cos \theta_1}{P^2} d\varphi, \quad (1)$$

где θ_0 – угол между нормалью к поверхности испарителя (ось z) и направлением молекул, вылетающих из испарителя; θ_1 – угол между внешней нормалью к поверхности подложки n' и направлением на испаритель, P – расстояние между испари-

телем и точкой A на поверхности подложки, T – период подынтегральной функции, β – коэффициент конденсации осаждаемого материала, v – скорость осаждения, g – плотность пленкообразующего материала.

Величины $\cos \theta_0$ и $\cos \theta_1$ определяются из уравнений

$$\cos \theta_0 = \frac{H \mp z(\rho)}{P}, \quad (2)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{n'_x P_x + n'_y P_y + n'_z P_z}{P},$$

где $z(\rho) = \sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho^2} - \sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho_0^2}$. Составляющие внешней единичной нормали к поверхности подложки (n'_x, n'_y, n'_z) и составляющие вектора P (P_x, P_y, P_z) рассчитываются из уравнений (3а) и (3б) соответственно:

$$\begin{aligned} n'_x &= \frac{\rho}{\mathfrak{R}} \cos(\psi + \psi_0), \\ n'_y &= \frac{\rho}{\mathfrak{R}} \sin(\psi + \psi_0), \end{aligned} \quad (3а)$$

$$n'_z = -\left(\sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho^2}\right) \mathfrak{R}^{-1};$$

$$P_x = a + r \cos(\varphi + \varphi_0) + \rho \cos(\psi + \psi_0),$$

$$P_y = r \sin(\varphi + \varphi_0) + \rho \sin(\psi + \psi_0), \quad (3б)$$

$$P_z = H \mp \left(\sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho^2} - \sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho_0^2}\right),$$

откуда получаем

$$\begin{aligned} P^2 &= \left(a + r \cos(\varphi + \varphi_0) + \rho \cos(\psi + \psi_0)\right)^2 + \\ &+ \left(r \sin(\varphi + \varphi_0) + \rho \sin(\psi + \psi_0)\right)^2 + \\ &+ \left[H \mp \left(\sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho^2} - \sqrt{\mathfrak{R}^2 - \rho_0^2}\right)\right]^2. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с (2) и (4) толщина слоя может быть найдена согласно вышеприведенным зависимостям. Основная сложность при определении толщины слоя заключается в том, что во время осаждения слоя пары вещества на разные точки подложки попадают в разные моменты времени. Это означает, что подынтегральная функция является разрывной кусочно-непрерывной функцией, причем положение разрывов функции также зависит от времени. Точки разрыва можно найти путем довольно сложных вычислений. Чтобы эти вычисления не проводить, т. е. преодолеть возникшие сложности,

воспользуемся тем, что поток вещества, попадающего на подложку во время осаждения слоя, определяется конусом (угол при вершине $2\Delta\theta$, наклон к оси Oz θ_{01}), опирающимся на диафрагму. Вершина этого конуса совпадает с положением испарителя МПИ, а положение конуса в пространстве во время осаждения (угол θ_{01}) зависит от положения диафрагмы. Зона на подложке, в которой происходит осаждение слоя, определяется пересечением конуса и сферической поверхности; если подложка не сферическая, то – пересечением конуса и соответствующей поверхности. Найти уравнение, описывающее границы зоны, в которой происходит осаждение слоя, довольно сложно. Поэтому воспользуемся тем, что при каждом значении ρ (см. рис. 1) существует плоскость, которая перпендикулярна оси вращения подложки и содержит вектор ρ . В этой плоскости изображение диафрагмы будет иметь вид окружности радиуса $\frac{H \mp z(\rho)}{h} r_d$. Центр этой окружности O''' будет смещен относительно оси вращения подложки с закрепленной на ней соосно диафрагмой на величину

$$\Delta\rho = \left[(a + r\cos\varphi)^2 + (r\sin\varphi)^2 \right]^{0.5} (H(\rho) - h)h^{-1}, \quad (5)$$

где $H(\rho) = H \pm z(\rho)$. Знак “+” соответствует выпуклой, а знак “-” вогнутой поверхности. В связи с этим положение точки A на подложке в системе координат, центр которой совпадает с положением центра изображения диафрагмы, может быть определено как

$$\rho_{01} = \rho^2 + (\Delta\rho)^2 - 2\Delta\rho\rho\cos(\alpha\varphi + \psi_0 - \varepsilon), \quad (6)$$

где ε – угол, образованный вектором, направленным из испарителя на центр проекции диафрагмы в плоскости испарителя, и осью Ox . Угол ε может быть определен из выражения

$$\sin\varepsilon = r\sin\varphi \left[(a + r\cos\varphi)^2 + (r\sin\varphi)^2 \right]^{-0.5}. \quad (7)$$

Тогда для определения времени или угла поворота подложки, в течение которого в зоне, определяемой точкой A , происходило осаждение слоя, необходимо, чтобы эта точка находилась в зоне проекции диафрагмы на плоскость, определенную выше. Для этого необходимо ввести функцию, которая имела бы в этой зоне значения, равные единице, а вне этой зоны – равные нулю, и тогда эта функция должна иметь вид

$$N = 0,5 \left(1 - \frac{\rho_{01} - bz(\rho)/h}{|\rho_{01} - bz(\rho)/h|} \right). \quad (8)$$

Кроме того, необходимо учесть, что в случае, если угол падения молекулярного пучка на подложку превышает $\pi/2$, то осаждения слоя также не происходит. Для описания этой ситуации необходимо ввести функцию, аналогичную предыдущей и определяемую соотношением

$$N_1 = 0,5 \left(1 - \frac{\theta_1 - 0,5\pi}{|\theta_1 - 0,5\pi|} \right). \quad (9)$$

Эта функция, так же как и предыдущая, имеет значения, равные единице, когда происходит осаждение слоя, и равные нулю, когда осаждение не происходит.

Для удобства описания процесса формирования слоя необходимо учесть, что осаждение слоя происходит только внутри габаритного радиуса детали. Вне этого размера толщина слоя, хотя реально слой осаждается на элементах оснастки, должна обращаться в нуль. Это условие может быть выполнено при введении дополнительной функции, определяемой условием

$$N_2 = 0,5 \left(1 - \frac{z(\rho)}{|z(\rho)|} \right). \quad (10)$$

В соответствии с высказанными выше соображениями процесс определения толщины слоя, получаемого испарением из МПИ, при осаждении его через диафрагму, закрепленную соосно с подложкой, совершающей планетарное вращение, может быть сведен к вычислению интеграла вида

$$t = \frac{\beta v}{\pi g \omega} \int_0^T NN_1 N_2 \frac{\cos\theta_0 \cos\theta_1}{P^2} d\varphi. \quad (11)$$

В выражении (11) произведение функций $NN_1 N_2$ определяет особенности формирования толщины слоя при испарении через диафрагму, расположенную соосно с подложкой, а произведение функций $\frac{\cos\theta_0 \cos\theta_1}{P^2}$ определяет толщину слоя, получаемого осаждением слоя из МПИ на подложку, совершающую планетарное вращение без диафрагмы. Период интегрирования определяется периодом подынтегральной функции, который равен наименьшему общему кратному трех чисел 2π , $2\pi/|\alpha|$, $2\pi/|\alpha-1|$.

Поскольку величины β , g , входящие в формулу, определяющую толщину слоя, являются величинами неизвестными, то для анализа ее распределения по поверхности подложки удобно ввести понятие относительной толщины слоя, под которой будем понимать отношение толщины слоя в зоне с координатой ρ к толщине слоя, полученной в центре под-

ложки при отсутствии диафрагмы. Тогда в соответствии с нашим определением относительная толщина слоя составит

$$\frac{t}{t_0} = \frac{\int_0^T NN_1 N_2 \frac{\cos\theta_0 \cos\theta_1}{P^2} d\varphi}{\int_0^T \frac{H \mp \left(R - \sqrt{R^2 - \rho_0^2} \right)}{P^4} d\varphi}, \quad (12)$$

где знак “-” относится к вогнутой, а “+” к выпуклой сферической поверхности.

На рис. 2 представлены распределения толщин слоев при планетарном вращении выпуклой сферической подложки для различных условий осаждения. Видно, что в специфическом случае одинарного вращения ($r = 0$) распределение толщины слоя по выпуклой сферической поверхности имеет осесимметричный характер. Кроме того, по мере увеличения габаритного радиуса детали, что соответствует приближению полюса детали к диафрагме, происходят расширение зоны равномерности вблизи полюса и спад толщины слоя до минимального значения 0,5 при $\rho = \rho_0$.

На рис. 3 представлено распределение толщины слоя при двойном вращении для выпуклой детали с радиусом кривизны $\mathfrak{R} = 1,6$, габаритным радиусом детали 0,5, расположенной на высоте $H = 1$. Молекулярный поток, попадающий на деталь, формируется диафрагмой радиусом $b = 0,05$, расположенной на расстоянии $h = 0,8$ от плоскости, в которой находится испаритель, в зависимости от расстояния между осями вращения подложкодержателя и подложек. Как видно из этого рисунка, по мере увеличения расстояния до оси вращения подложкодержателя происходит деформация распределения толщины по радиусу детали, оно перестает быть симметричным при $r \geq 0,3$. При $r < 0,3$ распределение имеет осесимметричный характер, кроме зоны вблизи центра. Отклонение распределения толщины от симметричного распределения не превышает нескольких процентов.

На рис. 4 представлено распределение коэффициента отражения полупрозрачного зеркала по поверхности выпуклой сферической подложки с относительным радиусом кривизны 1,6. Зеркало сформировано из слоя с меняющейся по радиусу подложки толщиной, нанесенного на просветляющую систему слоев с постоянной толщиной. Показатель преломления градиентного слоя 2,0, оптическая толщина в центре детали $0,25\lambda_0$, показатели преломления слоев просветляющего покрытия 1,45 и 1,77, оптические толщины $0,25\lambda_0$. Как видно из это-

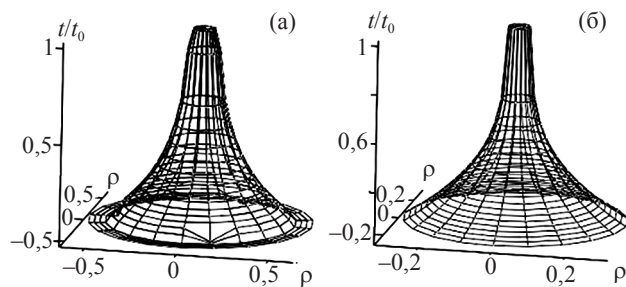


Рис. 2. Распределение толщины слоя при двойном вращении на сферической подложке. $H = 1$, $a = 1$, $h = 0,8$, $\mathfrak{R} = 1,6$, $r = 0$, $b = 0,05$. а – $\rho_0 = 0,5$, б – $\rho_0 = 0,3$.

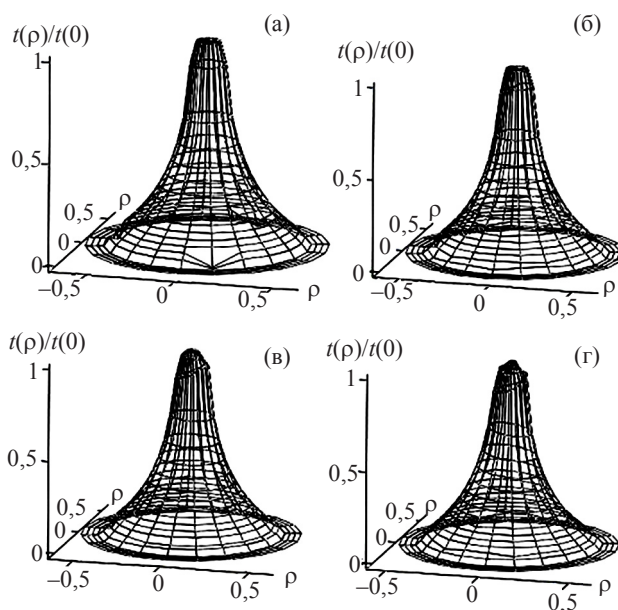


Рис. 3. Распределение толщины слоя при двойном вращении на сферической подложке. $H = 1$, $a = 1$, $h = 0,8$, $\mathfrak{R} = 1,6$, $\rho_0 = 0,5$, $b = 0,05$. а – $r = 0$, б – $r = 0,3$, в – $r = 0,5$, г – $r = 0,7$.

го рисунка, характер распределения коэффициента отражения остается примерно одинаковым при разных условиях осаждения. В случае когда толщина градиентного слоя отличается от $0,25\lambda_0$, распределение коэффициента отражения напоминает распределение толщины при тех же условиях и при $r < 0,5$ распределение коэффициента отражения по поверхности элемента имеет осесимметричный характер (при $r = 0$, $r = 0,3$ распределения полностью совпадают). При $r > 0,5$ нарушается симметрия распределения коэффициента отражения от радиальной координаты в зоне постоянного коэффициента отражения, хотя размеры зон, где $R = \text{const}$ и $R = 0$ для всех испытанных r одинаковы. Распределение ко-

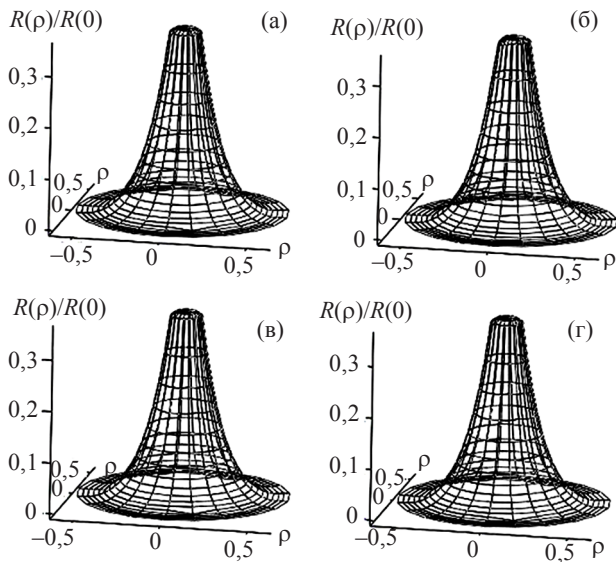


Рис. 4. Распределение коэффициента отражения полупрозрачного зеркала, сформированного слоем с показателем преломления 2,0. Условия осаждения слоя с переменной толщиной по поверхности оптического элемента: $H = 1$, $a = 1$, $h = 0,8$, $\mathfrak{R} = 1,6$, $\rho_0 = 0,5$, $b = 0,05$, $\alpha = 4$. а – $r = 0$, б – $r = 0,3$, в – $r = 0,5$, г – $r = 0,7$. Остальные пояснения см. в тексте.

эффицента отражения в зоне переменной толщины для $r > 0,5$ теряет осевую симметрию.

Итак, в результате выполненных исследований

– получена зависимость, описывающая распределение толщины слоя, получаемого на сферической подложке, при формировании его из маленького поверхностного испарителя через плоскую тонкую круглую диафрагму, удаленную от испарителя на известное расстояние;

– показано влияние расположения оптической детали и диафрагмы относительно испарителя на характер распределения толщины слоя по поверхности оптического элемента сферической формы;

– показано влияние условий осаждения пленкообразующих материалов на характер распределения коэффициента отражения полупрозрачного зеркала с коэффициентом отражения 0,36;

– представлен анализ влияния положения оси вращения (полюса) подложки, имеющей форму сферы, от удаления ее оси вращения от центра испарителя на распределение толщины слоя при осаждении слоя из маленького поверхностного испарителя через круглую диафрагму на подложку, совершающую планетарное вращение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитренко В.А., Губанова Л.А., Путилин Э.С. Формирование градиентных слоев с помощью круглых диафрагм и экранов // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 3. С. 50–53.
2. Холленд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 603 с.