

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЗОНЫ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ**Т.Л. Хоанг<sup>1</sup>, Л.А. Губанова<sup>1</sup>, В.Б. Нгуен<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), Санкт-Петербург, Россия**Аннотация**

Предложен метод увеличения зоны просветления на сферических поверхностях оптических деталей с большой кривизной при нанесении на них комбинированных слоёв, сформированных с использованием круглой диафрагмы в вакуумной установке. Проведено математическое моделирование траектории движения произвольной точки на сферической поверхности оптической детали, совершающей двойное вращение, и определена зона просветления при формировании комбинированного однослойного покрытия на поверхности детали.

**Ключевые слова:** просветляющее покрытие, оптическая деталь большой кривизны, зона просветления.

**Цитирование:** Хоанг, Т.Л. Увеличение зоны просветления оптических деталей большой кривизны / Т.Л. Хоанг, Л.А. Губанова, В.Б. Нгуен // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 856-863. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-856-863.

**Введение**

Оптические детали, поверхности которых имеют сферическую форму большой кривизны (полусфера), часто используются как фокусирующие и коллимирующие детали, идеально подходят для применения во многих системах, используемых в волоконной связи, эндоскопии, микроскопии, оптических приёмных устройствах, широкоугольных объективах и лазерных измерительных системах [1, 2]. Для повышения эффективности таких линз на их поверхности обычно наносят просветляющие интерференционные покрытия, основной целью которых является снижение коэффициента отражения от границы раздела двух сред с разными показателями преломления, что позволяет увеличивать пропускание таких элементов [3–6].

Наиболее распространённым методом получения интерференционных слоёв на поверхностях оптических элементов является метод термического испарения плёнообразующих материалов в вакууме, разновидностями которого являются осаждение материала резистивным или электронно-лучевым способом [7, 8]. При осаждении плёнообразующих материалов в вакуумной установке на оптическую деталь часто применяют систему двойного вращения оптического элемента. Применение этой системы вращения обеспечивает большую равномерность и симметричность распределения толщины слоя на поверхности детали [9, 10].

В работах [11–13] рассмотрены методы получения равномерного распределения относительной толщины слоёв, формирующих покрытие, на сферических поверхностях оптического элемента. Недостатки таких слоёв на сферических поверхностях описаны в работе [14]. В работе [15] описан метод получения слоёв с переменной толщиной при двойном вращении с использованием круглой диафрагмы на сферической поверхности оптических элементов, имеющих большие габариты (радиус больше 50 мм) и малую кривизну, в связи с этим в работе не были рассмотрены экранируемые зоны. Использование наклонного испарителя [16] для формирования слоёв на сферических поверхностях неприменимо, поскольку экранируемые зоны будут асимметричны.

В данной работе рассмотрены анализ траектории движения произвольной точки на сферической поверхности детали большой кривизны, совершающей двойное вращение, и распределение относительной толщины слоя на этой поверхности при формировании его в вакуумной установке. Помимо этого, рассмотрено применение слоя с заданным распределением толщины слоя для увеличения зоны просветления. Зона просветления определяется как отношение радиуса области поверхности оптического элемента, в которой энергетический коэффициент отражения меньше некоторой величины, к его радиусу ( $\rho/R$ ).

**Постановка задачи и ход её решения**

При формировании слоёв равномерной толщины, формирующих просветляющие покрытия [17] на сферических поверхностях большой кривизны, размер зоны просветления незначительный, что было показано в работе [14]. Также в работе [14] были рассмотрены интерференционные слои, входящие в состав просветляющих покрытий, геометрическая толщина которых плавно увеличивается вдоль радиальной координаты оптической детали по некому закону от центра к краю. Зона просветления при формировании таких слоёв составляет примерно  $\rho/R = 80\%$ , такой размер зоны просветления достаточно велик. Обычно на практике при формировании слоёв, входящих в состав просветляющих покрытий, на сферических поверхностях оптических деталей большой кривизны, совершающих двойное вращение, методом термического испарения плёнообразующих материалов в вакууме, их толщина уменьшается от центра к краю оптической детали [16]. Получение слоёв, геометрическая толщина которых постепенно увеличивается по поверхности детали, практически невозможно при существующих габаритах вакуумных установок. Уменьшение геометрической толщины слоя от центра к краю оптической детали вызывает существенное увеличение энергетического коэффициента отражения, и при этом размер зоны просветления будет незначительным. Быстрое уменьшение энергетического коэффициента отражения объясняется тем, что

при нормальном падении пучка излучения угол падения на краю оптической детали существенно увеличивается (рис. 1), при этом фазовая толщина слоя уменьшается от центра к краю детали, что нарушает условие просветления [18] и энергетический коэффициент отражения увеличивается.

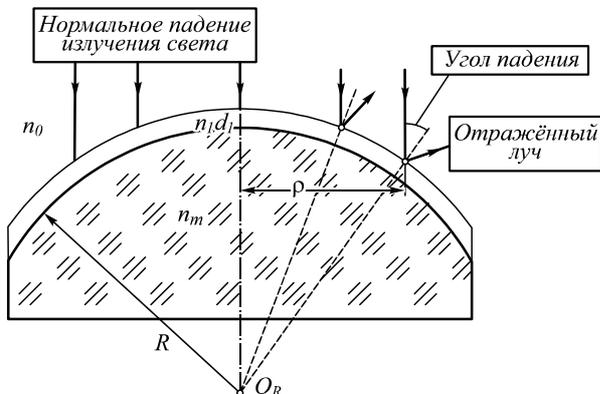


Рис. 1. Изменение угла падения при нормальном падении излучения света на поверхности оптической детали большой кривизны

Для увеличения размера зоны просветления необходимо корректировать уменьшение фазовой толщины слоя в точках, удалённых от центра оптической детали, в области, где коэффициент отражения велик. Для достижения этой цели сначала на поверхность оптической детали наносят слой, выполняющий функцию просветляющего покрытия, то есть его оптическая толщина соответствует условию просветления. Далее в области, в которой коэффициент отражения существенно увеличивается, наносят дополнительный слой из того же материала, но толщина его меняется в зависимости от координаты поверхности оптического элемента. Формирование этого слоя осуществляется при использовании круглой диафрагмы. Такой комбинированный слой, вид которого показан на рис. 2, может существенно увеличить зону просветления. При формировании дополнительного слоя существуют некоторые трудности, которые будут рассмотрены далее.

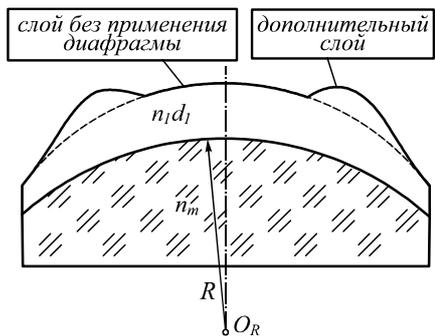


Рис. 2. Схема комбинированного слоя

**Формирование дополнительного переменного слоя**

Вспользуемся способом, предложенным в работе [19], для получения дополнительного слоя с заданным распределением толщины на сферических поверхностях.

На рис. 3а показана схема формирования слоя на сферической поверхности. Как показано на схеме, в неподвижной системе координат XYZ сферическая деталь большой кривизны вращается вокруг своей оси O''Z'', удалённой от оси вращения OZ подложкодержателя на расстояние r, и её полюс находится на расстоянии H от плоскости, в которой расположен испаритель, a – расстояние от малого поверхностного испарителя до оси вращения подложкодержателя, θ – угол между линией, соединяющей точку P на испарителе и исследуемую точку A на поверхности сферической подложки (PA), и нормалью (n) к плоскости, в которой расположен испаритель, θ' – угол между нормалью (n') к сферической поверхности в точке A и направлением (AP) на испаритель, R – радиус сферической детали, ρ\_0 – габарит сферической детали, ρ – радиальная координата исследуемой точки на поверхности сферической подложки, отсчитываемая по нормали к оси вращения, H\_ρ – расстояние от плоскости, на которой расположена исследуемая точка с радиальной координатой ρ, до плоскости испарителя. Диафрагма, имеющая радиус r\_d, удалена от плоскости испарителя на расстояние h и находится в плоскости O'X'Y', параллельной плоскости OXY, в которой расположен испаритель. Центр диафрагмы O\_d лежит на оси вращения оптической детали и вращается с угловой скоростью ω'.

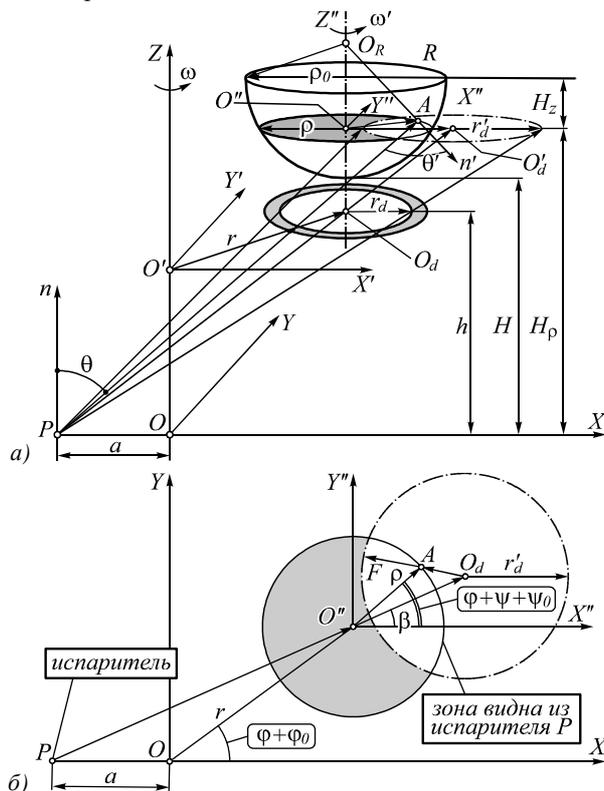


Рис. 3. Схема формирования слоя с заданным распределением через круглую диафрагму на выпуклой сферической поверхности оптической детали, совершающей двойное вращение (а); вид сверху плоскости, на которой расположены исследуемая точка A и проекция окружности диафрагмы в некий момент времени t (б)

Определим распределение толщины слоя как функцию периода обращения  $T$  оптической детали, расположенной на подложкодержателе, вокруг оси вращения  $OZ$ . Допустим, что в начальное время ( $t=0$ ,  $\varphi=0$ ) в системе координат  $XYZ$  положение оси вращения оптической детали имеет некую начальную угловую координату  $\varphi_0$  и исследуемая точка  $A$ , расположенная на поверхности детали, имеет начальную координату вращения  $\psi_0$  ( $\psi=0$ ). Через некий момент времени  $t$ , если подложкодержатель вращается вокруг своей оси  $OZ$  со скоростью  $\omega$ , положение центра вращения оптической детали  $O''$  в системе координат  $XYZ$  определяется угловой координатой  $(\varphi + \varphi_0)$ , где  $\varphi = \omega t$ , а оптическая деталь вращается вокруг своей оси  $O''Z''$  со скоростью  $\omega'$ , и положение исследуемой точки  $A$  в системе координат  $XYZ$  определяется угловой координатой  $(\varphi + \psi + \psi_0)$ , где  $\psi = \omega' t$ . При равномерном вращении подложкодержателя и подложки  $\omega' = \omega \alpha$ , тогда величина  $\psi = \varphi \alpha$ , где  $\alpha$  – коэффициент, определяющий отношение углов поворота подложкодержателя и оптической детали. Вследствие этого можно определить координаты точки  $A$  в системе координат  $XYZ$  таким образом:

$$\begin{cases} x_A = r \cos(\varphi + \varphi_0) + \rho \cos(\varphi + \psi + \psi_0), \\ y_A = r \sin(\varphi + \varphi_0) + \rho \sin(\varphi + \psi + \psi_0), \\ z_A = H_\rho = H \pm (R - \sqrt{R^2 - \rho^2}). \end{cases} \quad (1)$$

В этой системе координаты испарителя  $P$  и центра  $O_R$  сферической поверхности могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} x_P = -a, \\ y_P = 0, \\ z_P = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{O_R} = r \cos(\varphi + \varphi_0), \\ y_{O_R} = r \sin(\varphi + \varphi_0), \\ z_{O_R} = H \pm R, \end{cases} \quad (3)$$

где знак «+» относится к выпуклой, знак «-» – к вогнутой поверхностям.

Если исследуемая точка  $A$  полностью видна из испарителя, тогда толщина слоя в зоне исследуемой точки  $A$  может быть определена следующим образом [20]:

$$d = \frac{\beta m N}{\pi g} \int_0^T \frac{\cos \theta \cos \theta'}{P_A^2} d\varphi, \quad (4)$$

где  $N$  – количество периодов обращения  $T$ ,  $\varphi$  – угловая координата оси вращения оптической детали,  $\beta$  – коэффициент конденсации,  $g$  – плотность образовавшегося слоя,  $m$  – масса осаждаемого вещества.

Для того, чтобы определить толщину слоя, необходимо определить  $\cos \theta$ ,  $\cos \theta'$ , расстояние  $P_A$  между исследуемой точкой  $A$  и испарителем  $P$  и период обращения  $T$ . Три первых параметра вычисляются таким образом:

$$\begin{cases} P_A = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \\ \cos \theta = \frac{H_\rho}{P_A} = \frac{H \pm (R - \sqrt{R^2 - \rho^2})}{P_A}, \\ \cos \theta' = \frac{n_x P_x + n_y P_y + n_z P_z}{P_A}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $(n_x, n_y, n_z)$  – составляющие единичного вектора  $O_{RA}$  и  $(P_x, P_y, P_z)$  – составляющие вектора  $AP$ , определяющиеся при известных координатах точек  $A$ ,  $P$  и  $O_R$ , описанных в выражениях (1), (2) и (3) соответственно:

$$\begin{cases} n_x = \pm \frac{\rho \cos(\varphi + \psi + \psi_0)}{R}, \\ n_y = \pm \frac{\rho \sin(\varphi + \psi + \psi_0)}{R}, \\ n_z = -\frac{\sqrt{R^2 - \rho^2}}{R}, \\ P_x = -(a + r \cos(\varphi + \varphi_0) + \rho \cos(\varphi + \psi + \psi_0)), \\ P_y = -(r \sin(\varphi + \varphi_0) + \rho \sin(\varphi + \psi + \psi_0)), \\ P_z = -(H \pm (R - \sqrt{R^2 - \rho^2})). \end{cases} \quad (6)$$

Вычисление последнего параметра  $T$  вызывает некоторые трудности: во-первых, любая точка на поверхности оптической детали имеет начальную угловую координату  $\psi_0$  и движется по своей траектории при двойном вращении детали; во-вторых, скорости вращения оптической детали и подложкодержателя разные, они могут быть кратными или некратными друг другу, то есть коэффициент  $\alpha$  может быть целым или дробным числом; в-третьих, использование диафрагмы, которая перекрывает часть потока испаряемого вещества, падающего на поверхность детали, приводит к тому, что при движении вокруг оси  $OZ$  точка  $A$  может быть частично, а не полностью видна из испарителя.

Действительно, при анализе системы уравнений (6) в программе MatLab удаётся моделировать и наглядно рассмотреть траекторию движения точки  $A$ , расположенной на поверхности оптической детали, имеющей радиальную координату  $\rho$ . На рис. 4а представлена траектория движения некоторых точек радиальной координаты  $\rho = 6$  мм на выпуклой сферической поверхности детали, ось вращения которой расположена на расстоянии  $r = 30$  мм от оси вращения подложкодержателя. Параметры оптической детали:  $R = 10$  мм,  $\rho_0 = 10$  мм; вакуумной установки:  $H = 460$  мм,  $a = 230$  мм. Кривая 1 соответствует точке, начальная угловая координата которой  $\psi_0 = 0^\circ$ , кривая 2 –  $\psi_0 = 90^\circ$  и кривая 3 –  $\psi_0 = 180^\circ$  соответственно. В данном случае коэффициент  $\alpha = 2$ , то есть скорость вращения оптической детали вдвое больше скорости вращения подложкодержателя. Как видно из графика, представленного на рис. 4а, при разных начальных угловых координатах  $\psi_0$  эти точки движутся по разным траекториям движения, но форма траекторий

не меняется, так как отношение углов поворота подложкодержателя и оптической детали не меняется. Если меняется значение величины коэффициента  $\alpha$ , то форма траектории движения точки меняется (рис. 4б).

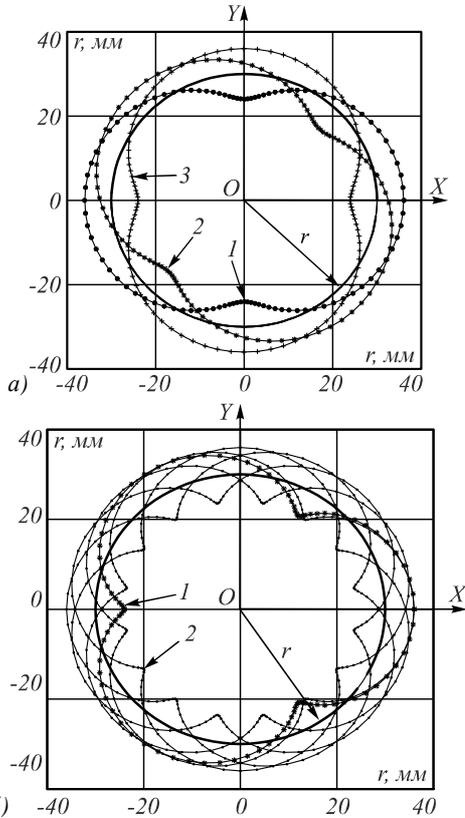


Рис. 4. Вид сверху на траекторию движения некоторых точек, имеющих радиальную координату 6 мм. Параметры оптической детали:  $R = 10$  мм,  $\rho_0 = 10$  мм; ВУ:  $H = 460$  мм,  $a = 230$  мм. Коэффициент  $\alpha = 2$ ,  $T = 2\pi$ , кривые: 1 –  $\psi_0 = 0^\circ$ , 2 –  $\psi_0 = 90^\circ$ , 3 –  $\psi_0 = 180^\circ$  (а); кривые: 1 – коэффициент  $\alpha = 3$ ,  $T = 2\pi$ ; 2 – коэффициент  $\alpha = 3,2$ ,  $T = 10\pi$  (б)

Кривая 1 отображает траекторию движения, соответствующую коэффициенту  $\alpha = 3$ , кривая 2 –  $\alpha = 3,2$  соответственно, в данном случае период обращения  $T = 2\pi$  при коэффициенте  $\alpha = 3$  и  $T = 10\pi$  при  $\alpha = 3,2$ . В общем случае с помощью программы MatLab и математического анализа период обращения  $T$  определяется наименьшим общим кратным двух чисел  $2\pi/|\alpha|$  и  $2\pi/|\alpha-1|$ , так как величина  $\alpha$  может принимать как отрицательные, так и положительные значения. В случае, когда подложкодержатель и оптическая деталь вращаются в противоположные стороны, при определении периода  $T$  находится абсолютное значение коэффициента  $\alpha$ .

Далее определим для ниже найденного периода  $T$ , в каком интервале угловой координаты  $\varphi$  точка  $A$  будет видна от испарителя. Для нахождения зоны видимости от испарителя под интеграл вводим функции ограничения, идея которых была рассмотрена в работе [15]. Первая функция соответствует тому, что если исследуемая точка  $A$  на поверхности детали находится

внутри окружности, являющейся проекцией окружности круглой диафрагмы, то есть данная точка видна от испарителя (рис. 3б), тогда функция принимает значение, равное единице. Вне этой зоны она будет равна нулю. Таким образом, данная функция определяется так:

$$F_1 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{AO'_d - r_d \frac{H_p}{h}}{\left| AO'_d - r_d \frac{H_p}{h} \right|} \right), \quad (7)$$

где  $AO'_d$  – расстояние от исследуемой точки до центра проекции окружности круглой диафрагмы на плоскости, в которой расположена точка  $A$ .  $AO'_d$  определяется следующим образом:

$$AO'_d = \sqrt{\rho^2 + (O''O'_d)^2 - 2\rho O''O'_d \cos(\varphi + \psi + \psi_0 - \beta)},$$

$$O''O'_d = \frac{H_p - h}{h} \sqrt{(a + r \cos(\varphi + \varphi_0))^2 + (r \sin(\varphi + \varphi_0))^2},$$

$$\beta = \arcsin \left( \frac{r \sin(\varphi + \varphi_0)}{\sqrt{(a + r \cos(\varphi + \varphi_0))^2 + (r \sin(\varphi + \varphi_0))^2}} \right).$$

На рис. 5 показаны три зоны, в которых точка  $A$ , расположенная на поверхности детали и имеющая радиальную координату  $\rho = 6$  мм, частично видна из испарителя. Параметры оптической детали и ВУ приведены выше, диафрагма радиусом  $r_d = 5,56$  мм расположена на расстоянии  $h = 443,34$  мм от плоскости, в которой расположен испаритель, ось вращения сферической поверхности детали расположена на расстоянии  $r = 30$  мм от оси вращения подложкодержателя, коэффициент  $\alpha = 2$ . Кривые: 1 – траектория точки  $A$ , 2 – траектория центра проекции окружности диафрагмы, 3 – траектория радиуса  $r'_d$  проекции окружности диафрагмы; 4 – три зоны, в которых точка  $A$  видна из испарителя.

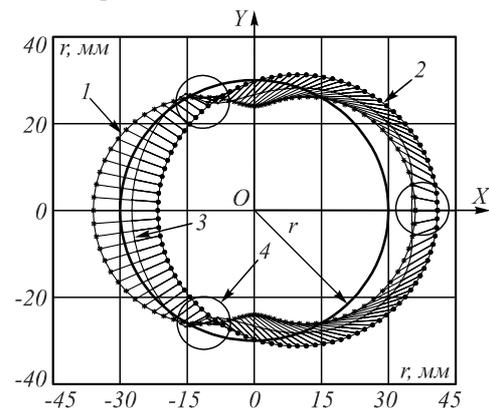


Рис. 5. Зоны, в которых точка  $A$  видна из испарителя при её движении вокруг оси вращения подложки через период  $T$

Вторая функция соответствует моменту касания молекулярного пучка плёнкообразующего материала сферической поверхности. Если угол  $\theta'$  (рис. 3а) превышает  $\pi/2$ , то осаждения слоя не происходит, т.е.

значение этой функции равно нулю, в противоположном случае оно будет равно единице.

$$F_2 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\theta' - 0,5\pi}{|\theta' - 0,5\pi|} \right). \quad (8)$$

Третья функция определяет возможную зону формирования слоя, т.е. ситуацию, когда осаждение слоя происходит только внутри габаритного радиуса детали. Вне этой зоны осаждения не будет.

$$F_3 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{R^2 - \rho^2} - \sqrt{R^2 - \rho_0^2}}{|\sqrt{R^2 - \rho^2} - \sqrt{R^2 - \rho_0^2}|} \right). \quad (9)$$

При вычислении толщины слоя для удобства часто используют понятие относительной толщины, под которой понимается отношение толщины слоя в зоне с радиальной координатой  $\rho$  к толщине слоя, полученного в центре подложки при отсутствии диафрагмы. Таким образом, относительная толщина может быть определена таким образом [19]:

$$d/d_0 = \frac{\int_0^r \frac{F_1 F_2 F_3 \cos \theta \cos \theta'}{P^2} d\phi}{\int_0^r \frac{H^2}{(H^2 + a^2)^2} d\phi}. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет нам получить распределение дополнительной толщины слоя по поверхности оптической детали большой кривизны, совершающей двойное вращение в вакуумной установке, с целью увеличения зоны просветления.

На рис. 6а проведено распределение относительной толщины слоя по поверхности детали, сформированного в вакуумной установке с параметрами  $H, h, r, a, r_d, R, \rho_0$ , представленными выше, коэффициент  $\alpha=2$ , при разных начальных угловых координатах  $\psi_0=0^\circ, 90^\circ$  и  $180^\circ$ .

Как видно из рис. 6а, при разных начальных угловых координатах  $\psi_0$  распределение относительной толщины слоя в каком-то диапазоне радиальной координаты  $\rho$  имеет небольшое отклонение. Это объясняется разными траекториями движения в разных значениях  $\psi_0$ , как показано на рис. 4а. На рис. 6б показано распределение относительной толщины слоя в виде 3D-графика. Данное распределение обладает симметричным характером, что является преимуществом при формировании слоя в системе двойного вращения оптической детали по сравнению с формированием при одинарном вращении.

#### **Применение метода формирования переменного слоя для увеличения зоны просветления на сферических поверхностях оптической детали большой кривизны**

Выше был рассмотрен метод формирования слоя с заданным распределением толщины в области сферической поверхности большой кривизны, удаленной от центра, в которой энергетический коэффициент от-

ражения быстро увеличивается с целью увеличения зоны просветления.

В качестве примера рассмотрим формирование просветляющего однослойного покрытия для увеличения зоны просветления на выпуклой поверхности оптической детали радиусом  $R=10$  мм и  $\rho_0=10$  мм, в вакуумной установке с геометрическими параметрами:  $H=460$  мм,  $a=230$  мм, коэффициент  $\alpha=2$ . Как было описано выше, сначала формируется слой, показатель преломления которого  $n_1=1,35$  (*MgF2*) на поверхности оптической детали, изготовленной из оптического материала с показателем преломления  $n_m=1,65$  (*TΦI*), потом на краю оптической детали формируется дополнительный слой с заданным распределением толщины и таким же показателем преломления  $n_1$  при использовании круглой диафрагмы с радиусом  $r_d=5,56$  мм, которая расположена на расстоянии  $h=443,34$  от плоскости, в которой расположен испаритель.

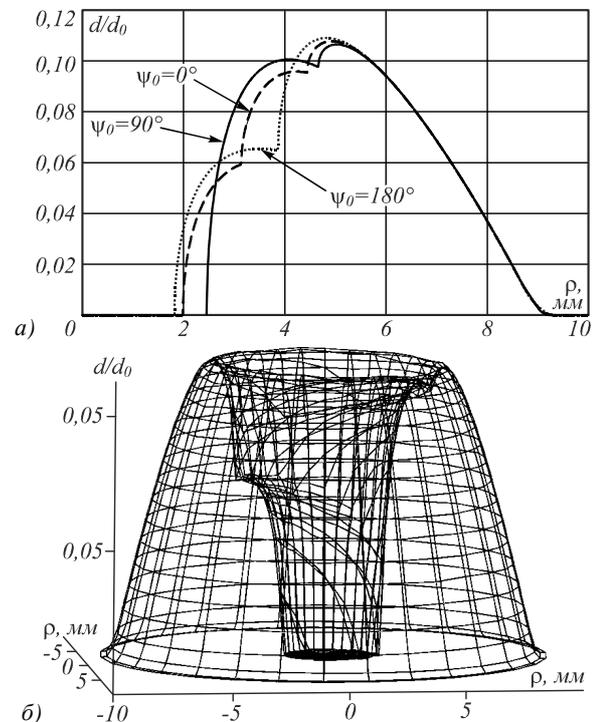


Рис. 6. Распределение относительной толщины слоя на выпуклой поверхности подложки при разных начальных угловых координатах (а); 3D-распределение относительной толщины слоя (б)

На рис. 7 показано распределение геометрической толщины комбинированного слоя просветляющего однослойного покрытия на поверхности оптической детали при разных начальных угловых координатах  $\psi_0=0^\circ, 90^\circ$  и  $180^\circ$ .

Как показано на рис. 7, в центральной зоне оптической детали формируется слой, оптическая толщина которого удовлетворяет условию просветления для однослойного покрытия, то есть  $n_1 d_1 = \lambda_0/4$ , где  $\lambda_0=550$  нм. На краю оптической детали формируется слой с заданным распределением толщины, который накладывается на ранее полученный слой, толщина

последнего определяется количеством  $N=200$  периодов обращения  $T=2\pi$ . Распределение энергетического коэффициента отражения по поверхности оптической детали, на которую планируется нанесение вышеописанного покрытия термическим методом в вакуумной промышленной установке типа ВУ-2М, представлено на рис. 8. Очевидно, что зона просветления, в которой энергетический коэффициент отражения меньше 1%, увеличивается при формировании комбинированного слоя. В данном случае эта зона составляет  $\rho/R=65,9\%$ , в случае без применения диафрагмы она составляет примерно  $\rho/R=51,5\%$ , то есть зона просветления увеличивается на 14,4% на одной поверхности.

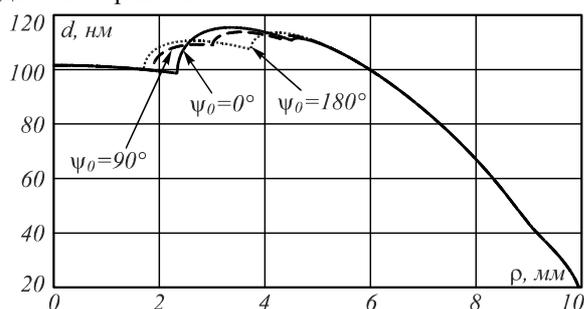


Рис. 7. Распределение геометрической толщины слоя однослойного покрытия на выпуклой сферической поверхности оптической детали

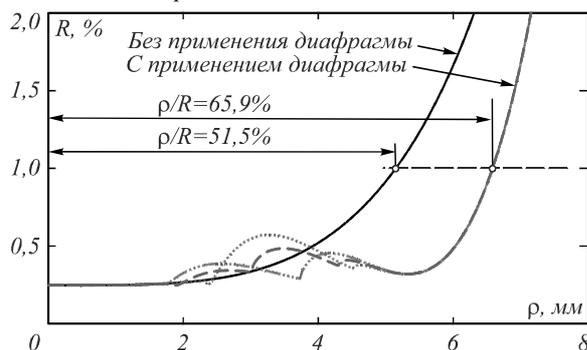


Рис. 8. Распределение энергетического коэффициента отражения по поверхности оптической детали радиусом 10 мм

### Заключение

В данной работе представлен разработанный метод увеличения зоны просветления при использовании системы двойного вращения оптической детали большой кривизны в вакуумной установке. Данный метод заключается в том, что на краю сферической поверхности оптической детали, в зоне которого энергетический коэффициент отражения существенно увеличивается, формируется дополнительный слой с заданным распределением толщины с целью коррекции фазовой толщины слоя в этой зоне, что позволяет увеличить зону просветления на сферических поверхностях. Приведено математическое моделирование траектории движения произвольной точки на сферической поверхности оптической детали, которое позволяет определить период обращения подынтегральной функции.

В работе рассмотрено формирование комбинированного однослойного просветляющего покрытия на поверхности оптической детали, изготовленной из оптического материала с показателем преломления  $n_m = 1,65$  ( $T\Phi I$ ), и показано, что при формировании данного покрытия можно увеличить зону просветления на 14,4%.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

### Литература

1. **Yang, S.W.** Wide-angle lens design / S.W. Yang, K.L. Huang, C.Y. Chen, R.S. Chang // Classical Optics 2014, OSA Technical Digest (online). – 2014. – JTU5A.27. – DOI: 10.1364/COSI.2014.JTu5A.27.
2. **Herzig, H.P.** Micro-optics: elements, systems and applications / H.P. Herzig. – London, Philadelphia: Taylor & Francis, 1997. – 370 p. – ISBN: 978-0748404810.
3. **Guo, C.** Optimization of the spectral performance of an antireflection coating on a micro-spherical substrate / C. Guo, M. Kong, W. He // Chinese Optics Letters. – 2016. – Vol. 14, Issue 9. – 093101. – DOI: 10.3788/COL201614.093101.
4. **Yamamoto, K.** Application of anti-reflection structures on curved surfaces / K. Yamamoto, T. Yamamoto, T. Takaoka, M. Seigo, S. Kitagawa // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8255. – 82551R. – DOI: 10.1117/12.906640.
5. **Gharghi, M.** Design of anti-reflection coating for spherical silicon photovoltaic devices / M. Gharghi, S. Sivoththaman // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 7045. – 704509. – DOI: 10.1117/12.795698.
6. **Martinu, L.** Plasma deposition of anti-reflective coatings on spherical lenses / L. Martinu, O. Zabeida, A. Amassian, S. Larouche, C. Lavigne, J.E. Klemberg-Sapieha, D.E. Morton, F. Zimone // Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series. – 2001. – WA7. – DOI: 10.1364/OIC.2001.WA7.
7. **Holland, L.** The distribution of thin films condensed on surfaces by the vacuum evaporation method / L. Holland, W. Steckelmacher // Vacuum. – 1952. – Vol. 2, Issue 4. – P. 346-364. – DOI: 10.1016/0042-207X(52)93784-6.
8. **Kyogoku, T.** Ion beam assisted deposition of a thin film coating on a gradient-index lens array / T. Kyogoku, T. Suzuki, M. Mino // Applied Optics. – 1990. – Vol. 29, Issue 28. – P. 4071-4076. – DOI: 10.1364/AO.29.004071.
9. **Oliver, J.B.** Analysis of a planetary-rotation system for evaporated optical coatings / J.B. Oliver // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, Issue 30. – P. 8550-8555. – DOI: 10.1364/AO.55.008550.
10. **Oliver, J.B.** Impact of a counter-rotating planetary rotation system on thin-film thickness and uniformity / J.B. Oliver // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Issue 18. – P. 5121-5124. – DOI: 10.1364/AO.56.005121.
11. **Ramprasad, B.S.** Uniformity of film thickness on rotating planetary planar substrates / B.S. Ramprasad, T.S. Radha // Thin Solid Films. – 1973. – Vol. 15, Issue 1. – P. 55-64. – DOI: 10.1016/0040-6090(73)90203-4.
12. **Tomofuji, T.** A new coating technique for lenses which have steep curved surface / T. Tomofuji, N. Okada, S. Hiraki, A. Murakami, J. Nagatsuka // Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series. – 2001. – MD2. – DOI: 10.1364/OIC.2001.MD2.

13. Sun, J. Optimization of thickness uniformity of coatings on spherical substrates using shadow masks in a planetary rotation system / J. Sun, W. Zhang, K. Yi, J. Shao // Chinese Optics Letters. – 2014. – Vol. 12, Issue 5. – 053101. – DOI: 10.3788/COL201412.053101.
14. Губанова, Л.А. Увеличение зоны просветления оптического элемента малого радиуса путём нанесения покрытий с заданным распределением толщины / Л.А. Губанова, Т.Л. Хоанг // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 860-866. – DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-860-866.
15. Губанова, Л.А. Формирование градиентных слоёв на сферических подложках / Л.А. Губанова, Э.С. Путилин // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 4. – С. 87-91.
16. Милованов, Н.П. Формирование неравнотолщинных тонкоплёночных покрытий на сферической подложке напылением из наклонного испарителя / Н.П. Милованов // ОМП. – 1987. – № 5. – С. 27-30.
17. Губанова, Л.А. Исследование распределения коэффициента отражения просветляющих покрытий на оптических деталях малого радиуса / Л.А. Губанова, Т.Л. Хоанг, Т.Т. До // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 2(96). – С. 234-240. – DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-234-240.
18. Путилин, Э.С. Оптические покрытия / Э.С. Путилин, Л.А. Губанова. – СПб.: Издательство «ЛАНЬ», 2016. – 268 с. – ISBN: 978-5-8114-2005-6.
19. Gubanova, L.A. The use of movable stops when forming layers of variable thickness / L.A. Gubanova, V.B. Karasev, É.S. Putilin // Journal of Optical Technology. – 2003. – Vol. 70, Issue 11. – P. 802-805. – DOI: 10.1364/JOT.70.000802.
20. Baumeister, P.W. Optical coating technology / P.W. Baumeister. – Bellingham: SPIE Press, 2004. – 840 p. – ISBN: 9780819453136.

### Сведения об авторах

**Хоанг Тхань Лонг**, 1987 года рождения, в 2015 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО) по специальности «Оптотехника». Является аспирантом факультета фотоники и оптоинформатики университета ИТМО. Область научных интересов: обработка оптических деталей, физика тонких плёнок, программирование.

E-mail: [dragonitmo@gmail.ru](mailto:dragonitmo@gmail.ru).

**Губанова Людмила Александровна**, доктор технических наук, профессор, окончила Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО), кафедра оптоинформационных технологий и материалов. Область научных интересов: оптика тонких плёнок, физика тонких плёнок, технология изготовления оптических покрытий.

E-mail: [La7777@mail.ru](mailto:La7777@mail.ru).

**Нгуен Ван Ба**, 1987 года рождения, в 2015 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО) по специальности «Оптотехника». Является аспирантом факультета фотоники и оптоинформатики университета ИТМО. Область научных интересов: физика тонких плёнок, обработка оптических систем.

E-mail: [thulavang@gmail.ru](mailto:thulavang@gmail.ru).

ГРНТИ: 29.19.16.

Поступила в редакцию 6 июля 2017 г. Окончательный вариант – 17 октября 2017 г.

## EXTENDING THE ANTIREFLECTION ZONE OF HIGHLY CURVED OPTICS

T.L. Hoang<sup>1</sup>, L.A. Gubanova<sup>1</sup>, V.B. Nguyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

### Abstract

We propose a method for extending the antireflection zone of highly curved spherical optical components via applying a combined layered coating synthesized in a vacuum chamber with use of a circular diaphragm. The motion path of an arbitrary point on the spherical optical component involved in a dual rotation is numerically simulated and the antireflection zone formed by a combined single-layer coating on the optical component surface is determined.

**Keywords:** antireflection coating, highly curved optics, antireflection zone.

**Citation:** Hoang TL, Gubanova LA, Nguyen VB. Extending the antireflection zone of highly curved optics. Computer Optics 2017; 41(6): 856-863. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-856-863.

### References

- [1] Yang SW, Huang KL, Chen CY, Chang RS. Wide-angle lens design. Classical Optics 2014, OSA Technical Digest (online) 2014: JTU5A.27. DOI: 10.1364/COSI.2014.JTU5A.27.
- [2] Herzig HP. Micro-Optics: Elements, Systems and Applications. London, Philadelphia: Taylor & Francis; 1997. ISBN: 978-0748404810.
- [3] Guo C, Kong M, He W. Optimization of the spectral performance of an antireflection coating on a micro-spherical substrate. Chin Opt Lett 2016; 14(9): 093101. DOI: 10.3788/COL201614.093101.

- [4] Yamamoto K, Yamamoto T, Takaoka T, Seigo M, Kitagawa S. Application of anti-reflection structures on curved surfaces. Proc SPIE 2012; 8255: 82551R. DOI:10.1117/12.906640.
- [5] Gharghi M, Sivoththaman S. Design of anti-reflection coating for spherical silicon photovoltaic devices. Proc SPIE 2008; 7045: 704509. DOI: 10.1117/12.795698.
- [6] Martinu L, Zabeida O, Amassian A, Larouche S, Lavigne C, Klemberg-Sapieha JE, Morton DE, Zimone F. Plasma deposition of anti-reflective coatings on spherical lenses. Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series 2001: WA7. DOI: 10.1364/OIC.2001.WA7.
- [7] Holland L, Steckelmacher W. The distribution of thin films condensed on surfaces by the vacuum evaporation method. Vacuum 1952; 2(4): 346-364. DOI: 10.1016/0042-207X(52)93784-6.
- [8] Kyogoku T, Suzuki T, Mino M. Ion beam assisted deposition of a thin film coating on a gradient-index lens array. Appl Opt 1990; 29(28): 4071-4076. DOI: 10.1364/AO.29.004071.
- [9] Oliver JB. Analysis of a planetary-rotation system for evaporated optical coatings. Appl Opt 2016; 55(30): 8550-8555. DOI: 10.1364/AO.55.008550.
- [10] Oliver JB. Impact of a counter-rotating planetary rotation system on thin-film thickness and uniformity. Appl Opt 2017; 56(18): 5121-5124. DOI: 10.1364/AO.56.005121.
- [11] Ramprasad BS, Radha TS. Uniformity of film thickness on rotating planetary planar substrates. Thin Solid Films 1973; 15(1): 55-64. DOI: 10.1016/0040-6090(73)90203-4.
- [12] Tomofuji T, Okada N, Hiraki S, Murakami A, Nagatsuka J. A new coating technique for lenses which have steep curved surface. Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series 2001: MD2. DOI: 10.1364/OIC.2001.MD2.
- [13] Sun J, Zhang W, Yi K, Shao J. Optimization of thickness uniformity of coatings on spherical substrates using shadow masks in a planetary rotation system. Chin Opt Lett 2014; 12(5): 053101. DOI: 10.3788/COL201412.053101.
- [14] Gubanova LA, Hoang TL. Extending enlightenment area of small-size optical element by coating with a specified thickness distribution [In Russian]. Journal of Instrument Engineering 2016; 59(10): 860-866. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-860-866.
- [15] Gubanova LA, Putilin ES. Forming gradient layers on spherical substrates. Journal of Optical Technology. J Opt Technol 2008; 75(4): 278-281. DOI: 10.1364/JOT.75.000278.
- [16] Milovanov NP. Synthesis of varied thickness thin-film coatings on a spherical substrate by oblique sputtering [In Russian]. OMP 1987; 5: 27-30.
- [17] Gubanova LA, Hoang TL, Do TT. Study of reflection coefficient distribution for anti-reflection coatings on small-radius optical parts [In Russian]. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 2015; 15(2): 234-240. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-234-240.
- [18] Putilin ES, Gubanov LA. Optical coatings [In Russian]. Saint-Petersburg: "LAN" Publisher; 2016.
- [19] Gubanova LA, Karasev VB, Putilin ES. The use of movable stops when forming layers of variable thickness. J Opt Technol 2003; 70(11): 802-805. DOI: 10.1364/JOT.70.000802.
- [20] Baumeister PW. Optical coating technology. Bellingham: SPIE Press; 2004. ISBN: 9780819453136.

#### Authors' information

**Thanh Long Hoang**, (b.1987) graduated from St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University) in 2015, majoring in Optotechnics. Currently he is a graduate student of Photonics and Optoinformatics faculty at ITMO University. Research interests: processing of optical parts, physics of thin films, and programming. E-mail: [dragonitmo@gmail.com](mailto:dragonitmo@gmail.com).

**Ludmila Aleksandrovna Gubanova**, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Optical Information Technologies and Materials department, Professor. Research interests: physics of thin films, optic of thin films, manufacture technology of thin films. E-mail: [La7777@mail.ru](mailto:La7777@mail.ru).

**Van Ba Nguyen**, (b.1987) graduated from St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University) in 2015, majoring in Optotechnics. Currently he is a graduate student of Photonics and Optoinformatics faculty at ITMO University. Research interests: physics of thin films, processing of optical systems. E-mail: [thulavang@gmail.com](mailto:thulavang@gmail.com).

*Received July 6, 2017. The final version – October 17, 2017.*