

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.621

## РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК, ОСАЖДЕННЫХ НА ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПОДЛОЖКИ

© 2009 г. **Е. Н. Котликов\***, док. физ.-мат. наук; **В. А. Иванов\*\***;  
**В. Н. Прокашев\***, канд. техн. наук; **А. Н. Тропин\*\***

\* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург  
E-mail: ekotlikov@mail.ru, prokashev@aanet.ru

\*\* НИИ “Гириконд”, Санкт-Петербург  
E-mail: tropal@km.ru, vonavi-07@yandex.ru

При промышленном изготовлении многослойных оптических покрытий существенное значение имеет равномерность нанесения оптических пленок на большие по размеру (до 200 мм) детали или кассеты с большим количеством подложек. В настоящей статье рассмотрена зависимость распределения толщины осажденной пленки по радиусу подложки большого размера от геометрических параметров планетарного механизма вращения подложек. Показано, что при некотором соотношении этих параметров неравномерность по толщине нанесенной пленки может не превышать 0,05% на всей поверхности подложки.

Коды OCIS: 140.3410.

*Поступила в редакцию 17.03.2008.*

### Введение

Со времени своего возникновения технология изготовления многослойных интерференционных покрытий, занимающая целую отрасль в оптическом приборостроении, претерпела значительные изменения. Современные средства откатки, прецизионные системы контроля толщины, новые методы изготовления оптических пленок позволяют получать пленки тех материалов, которые до недавнего времени еще не были освоены, и дают возможность существенно расширить не только рабочий спектральный диапазон получаемых оптических покрытий, но и улучшить множество их спектральных характеристик. При реализации на практике, наряду с оптическими и эксплуатационными свойствами, особое внимание уделяется равномерности осаждаемого покрытия по толщине, а при промышленном производстве этот фактор становится наиболее значимым. Возможность получения однородных по толщине покрытий на подложках значительной площади, а также реализация за один технологический цикл большого количества некрупных оптических деталей с идентичными оптическими характеристиками существенно расширяют область их применения и снижают себестоимость.

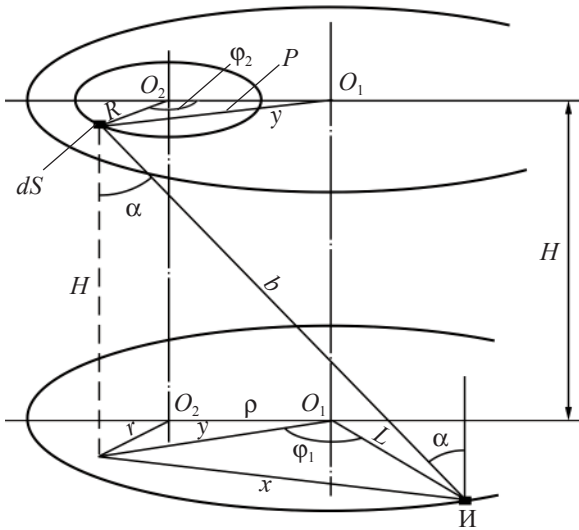
Основная часть публикаций, посвященных проблеме получения равномерных по толщине оптических

пленок [1–7], зачастую либо не отражает тех реальных особенностей, которые возникают при промышленном производстве, либо не дает однозначных и удобных для интерпретации рекомендаций относительно условий получения однородных покрытий.

Не ставя перед собой задачи опровергнуть результаты, полученные предшественниками, авторы предприняли попытку выявить зависимость однородности толщины осаждаемого слоя от геометрических параметров механизма вращения подложек и показать существование оптимального набора параметров, обеспечивающих минимальный разброс по толщине осаждаемого слоя. По результатам работы можно оценить равномерность получаемых покрытий при заданной геометрии, а в случае проектирования оснастки вакуумной камеры – определить ее оптимальные геометрические параметры.

### Метод расчета распределения толщины осаждаемого слоя по радиусу вращающейся подложки

Одним из самых распространенных и наиболее часто реализуемых на практике способов, позволяющих получать равномерные пленки на больших площадях, является планетарное вращение подложек, когда подложка вращается вокруг своей оси в



**Рис. 1.** Геометрия расчёта при планетарном вращении подложек.  $dS$  – площадка на которую производится напыление,  $I$  – испаритель,  $O_1O_1$  – ось вращения карусели,  $O_2O_2$  – ось вращения подложки,  $L$  – расстояние от испарителя до оси карусели,  $H$  – высота площадки  $dS$  над испарителем.

плоскости, перпендикулярной оси вращения оснастки [2, 5] (рис. 1). Исходя из общепринятых соображений, был составлен оригинальный метод расчета распределения толщины по радиусу подложки, в основных положениях совпадающий с описанными ранее подходами [2, 4].

В работе приняты следующие обозначения (см. рис. 1):  $dS$  – площадка, на которую производится напыление,  $I$  – испаритель,  $O_1O_1$  – ось вращения карусели,  $O_2O_2$  – ось вращения подложки,  $P$  – расстояние между осями вращения  $O_1O_1$  и  $O_2O_2$ ,  $L$  – расстояние от испарителя до оси карусели,  $H$  – расстояние по нормали от испарителя до плоскости вращения подложки,  $b$  – расстояние от испарителя до площадки  $dS$ ,  $\alpha$  – угол между нормалью и направлением на  $dS$ .

Толщина  $D$  пленки, наносимой на площадку  $dS$  за малый промежуток времени  $dt$ , прямо пропорциональна косинусу угла падения  $\alpha$  испаряемого вещества на площадку  $dS$ , индикатрисе тигля  $F(\alpha)$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния от площадки до тигля ( $1/b^2$ ):

$$D = F(\alpha)\cos\alpha(1/b^2). \quad (1)$$

Полагаем, что за время напыления интенсивность и индикатриса испарителя не меняются. Тогда функция толщины  $D$  является чисто геометрической, т. е. зависит только от взаимного расположения площадки  $dS$  и испарителя. В наших расчетах мы полагали, что испаритель малый поверхностный, а его индикатриса нормирована и имеет вид

$F(\alpha) = \cos\alpha$  или  $F(\alpha) = \cos^2\alpha$ , где  $\alpha$  – угол, отсчитываемый от вертикали.

Далее, считаем, что за время напыления  $t$  площадка  $dS$  движется равномерно и многократно проходит по своей траектории  $X$ , что обычно выполняется на практике. При равномерном движении площадки  $dS$  по траектории  $X$ , т. е.  $dx/dt = \text{const}$ , толщину  $T$  слоя, нанесенного за время  $t$ , можно вычислить, заменив переменную интегрирования, –

$$T = \int_t D dt = \frac{1}{\text{const}} \int_x D dx. \quad (2)$$

Представив испаритель в виде тонкого кольца радиуса  $L$ , каждая точка которого имеет соответствующую индикатрису испарения [2], можно исключить вращение вокруг оси  $O_1O_1$ , т. е. считать, что площадка  $dS$  вращается только вокруг оси подложки  $O_2O_2$  с радиусом  $R$ , а испаритель имеет вид тонкого кольца радиуса  $L$  с центром на оси карусели  $O_1O_1$ .

Толщина  $T(R)$  слоя, нанесенного на площадку  $dS$  при ее многократном вращении вокруг оси  $O_2O_2$ , с точностью до константы равна общей толщине пленки, нанесенной на кольцо радиуса  $R$ , деленной на длину окружности радиуса  $R$ .

Таким образом, толщина нанесенного слоя  $T(R)$  вычисляется двойным интегрированием – по длине окружности кольцевого испарителя и по длине окружности радиуса  $R$ , по которой движется площадка  $dS$ . В цилиндрических координатах выражение имеет вид

$$\begin{aligned} T(R) &= \frac{1}{2\pi r} \int_0^{2\pi} \left[ L \int_0^{2\pi} D d\varphi_1 \right] r d\varphi_2 = \\ &= \frac{L}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} D d\varphi_1 d\varphi_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Функцию толщины  $D$  вида (1) можно получить из геометрических соотношений (рис. 1). Для индикатрисы испарителя вида  $F(\alpha) = \cos\alpha$ , имеем

$$D = H^2/b^4, \quad (4)$$

где  $b^2 = x^2 + H^2 = H^2 + L^2 + y^2 - 2yL \cos(\varphi_1)$ ,

$$y^2 = r^2 + P^2 - 2PR\cos(\varphi_2). \quad (5)$$

Перейдем к нормированным параметрам, полагая  $L = 1$ ,  $h = H/L$ ,  $r = R/L$ ,  $\rho = P/L$ . Тогда интеграл (3) примет вид

$$T(r) = \frac{h^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi_1 d\varphi_2}{(1 + h^2 + y^2 - 2y \cos\varphi_1)^2}. \quad (6)$$

Для перехода к относительной толщине вычислим толщину слоя  $T_C$  на свидетеле в центре карусели, полагая  $\rho = 0$  и  $r = 0$

$$T_C = \frac{2\pi h^2}{(1+h^2)^2}. \quad (7)$$

Относительная толщина  $T_0(r) = T(r)/T_C$  окончательно определится выражением

$$T_0(r) = \frac{(1+h^2)^2}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\phi_1 d\phi_2}{(1+h^2+y^2-2y\cos\phi_1)^2}. \quad (8)$$

Аналогичные выражения можно получить для испарителей с индикатрисами другого вида. Например, для испарителя  $F(\alpha) = \cos^2\alpha$  получим

$$T_0(r) = \frac{\sqrt{1+h^2}^5}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\phi_1 d\phi_2}{\sqrt{1+h^2+y^2-2y\cos\phi_1}^5}, \quad (9)$$

где  $y$  определяется соотношением (5).

### Распределение толщины пленки по подложке и определение оптимальной геометрии оснстки

Полученные выражения (8) и (9) определяют значения относительной толщины пленки на расстоянии  $r$  от центра подложки при заданных  $h$  и  $\rho$  для испарителей  $\cos\alpha$  и  $\cos^2\alpha$  соответственно. На рис. 2 показаны рассчитанные зависимости относительной толщины  $T_0(r)$  напыляемого слоя по радиусу при планетарном вращении для некоторых значений нормированной высоты  $h$ . Расстояние между осями вращения  $\rho = 0,5$ . Индикатрисы испарителя  $\cos\alpha$  (а) и  $\cos^2\alpha$  (б).

При планетарном движении подложки, в отличие от простого вращения, распределение толщины напыляемого слоя более ровное. Кроме того, характер кривой и абсолютное значение изменения толщины слабее изменяются с изменением параметра высоты  $h = H/L$ . Достаточно сильно изменяется толщина слоя по отношению к центральному свидетелю: 0,95–1,2 для индикатрисы  $\cos^2\alpha$ . Для различных индикатрис испарения оптимальной является относительная высота  $h \approx 1,0$ –1,1. При этом максимальное изменение толщины  $T$  в диапазоне  $r$  от 0 до 0,4 составляет менее 1%.

При возрастании высоты  $h$  кривые распределения толщины  $T_0(r)$  сближаются и стремятся к некоторому одинаковому распределению, слабо зависящему от индикатрисы тигля (для обеих индикатрис испарителя  $T = 0,96$ –0,92 для  $r = 0$ –0,5 при  $h = 2$ ).

Кроме расчета распределения толщины пленки по радиусу подложки, практический интерес представляет определение оптимальной геометрии оснстки, обеспечивающей наилучшую равномерность получаемых слоев.

В качестве критерия для оценки равномерности мы выбрали функцию отклонения толщины  $\delta(h, \rho)$

$$\delta(h, \rho) = \frac{\max(T(h, \rho, r_0)) - \min(T(h, \rho, r_0))}{T(h, \rho, r_0 = 0)}, \quad (10)$$

где  $r_0$  – принимает значения от 0 до  $r$ ,  $T(h, \rho, r_0)$  определяется выражениями (8) или (9).

Используя численные расчеты, можно построить функцию максимального отклонения толщины  $\delta(h, \rho)$ , зависящую от геометрических параметров планетарного механизма  $h, \rho$  и радиуса подложки  $r$ . По построенной таким образом функции можно определить область возможных значений  $h$  и  $\rho$ , при

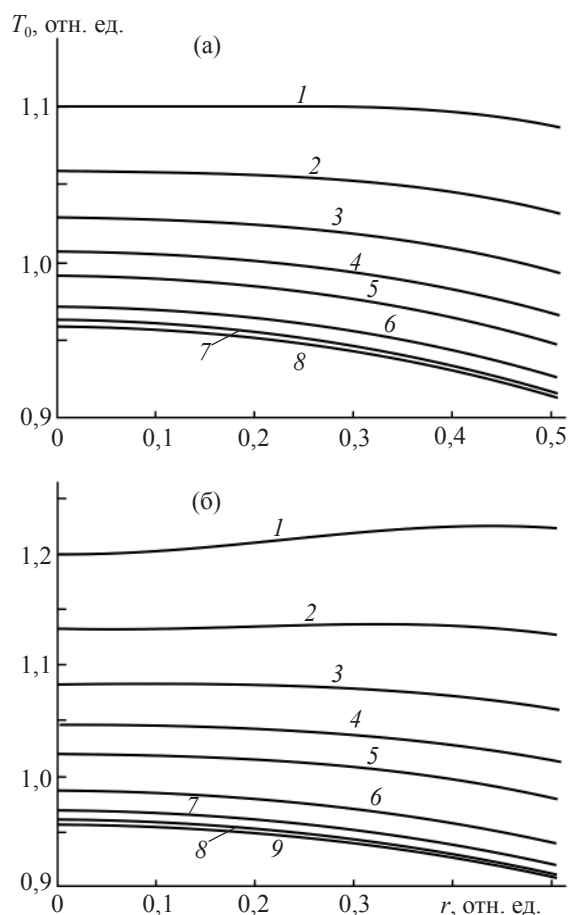
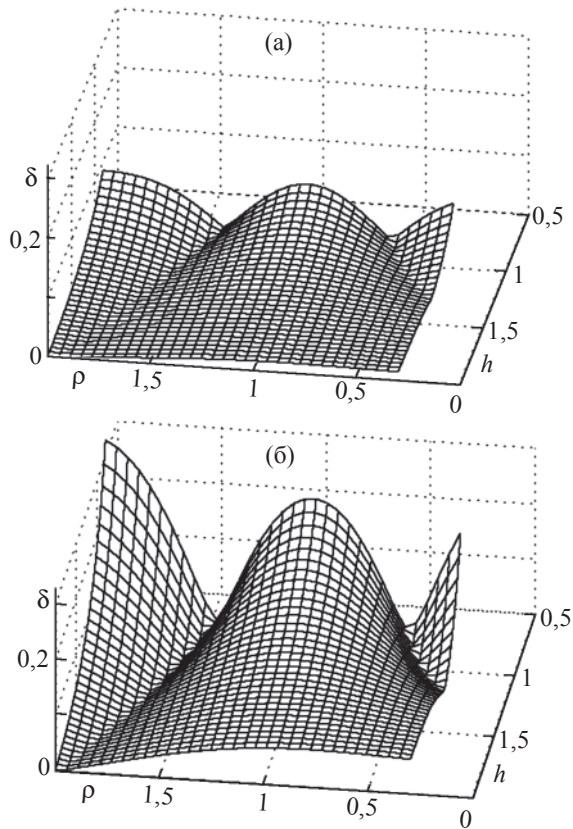


Рис. 2. Зависимости толщины напыляемого слоя по радиусу  $T_0(r)$ ,  $r = R/L$ , при планетарном вращении для различных значений нормированной высоты  $h = H/L$ . 1 –  $h = 1$ , 2 – 1,1, 3 – 1,2, 4 – 1,3, 5 – 1,4, 6 – 1,6, 7 – 1,8, 8 – 2,0, 9 – 2,2. Расстояние между осями вращения  $\rho = 0,5$ . Индикатриса испарителя  $F(\alpha) = \cos\alpha$  – а,  $\cos^2\alpha$  – б.



**Рис. 3.** Трехмерные изображения функции  $\delta(h, \rho)$ . Индикатриса испарителя  $F(\alpha) = \cos\alpha$ . Радиус подложки  $r = 0,3$  (а) и  $0,6$  (б).

которых отклонение толщины слоя минимально на заданном радиусе подложки  $r$ .

На рис. 3 представлены трехмерные изображения функции  $\delta(h, \rho)$  при  $r = 0,3$  и  $0,6$  для косинусового источника. Хорошо заметны две области – “долины”, при которых функция отклонения толщины  $\delta(h, \rho)$  минимальна. Первая область с меньшими значениями  $h$  и  $\rho$  соответствует более компактному планетарному механизму, вторая – подразумевает большие размеры устройства. Области расширяются с ростом высоты  $h$  и, как следствие, функция  $\delta(h, \rho)$  становится более устойчивой к малым вариациям параметров  $h$  и  $\rho$ , а минимальное значение  $\delta(h, \rho)$  уменьшается с ростом  $h$ .

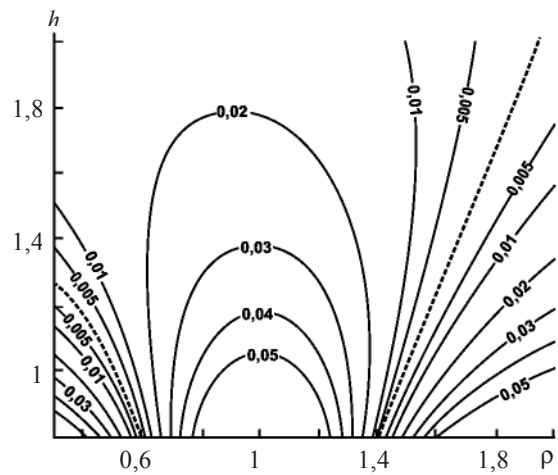
Из рис. 3 и 4 можно видеть, что изменение радиуса подложки качественно не меняет характерный вид функции  $\delta(h, \rho)$ , заметно меняется лишь ее величина. Общее значение отклонения толщины на данной области изменения параметров может достигать довольно больших значений, например, при  $h = 1$  и  $\rho = 1$  отклонение составляет около  $0,09\%$  на радиусе  $0,3$  и около  $0,25\%$  на радиусе  $0,6$ .

Построенные в плоскости  $(h, \rho)$  линии уровня и соответствующие им значения для функции откло-

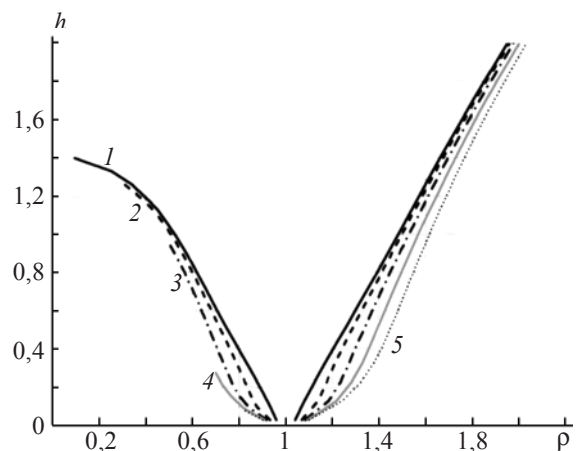
нения толщины  $\delta(h, \rho)$ , изображенной на рис. 3а, представлены на рис. 4. Штриховой линией показано расположение минимумов этой функции; ориентировочное значение их отклонений  $\delta = 0,001 - 0,003$  (убывает с ростом  $h$ ).

Общий вид функции  $\delta(h, \rho)$  накладывает ограничение на пределы изменения параметров  $h$  и  $\rho$ , в первую очередь  $\rho$ . Например, значениям  $\rho = 0,7 - 1,3$  при фиксированной высоте соответствуют отклонения толщины  $3 - 8\%$ .

Положение минимумов функции  $\delta(h, \rho)$  определяется некоторыми кривыми в плоскости  $(h, \rho)$  (штриховые кривые на рис. 4), вид которых зависит от значения  $r$ . На рис. 5 показаны кривые расположения минимума функции  $\delta(h, \rho)$  для различных значений  $r$ .



**Рис. 4.** Линии уровня функции отклонения толщины слоя  $\delta(h, \rho)$  при  $r = 0,3$ . Жирным шрифтом показаны соответствующие значения функции  $\delta(h, \rho)$ .



**Рис. 5.** Линии расположения минимума функции  $\delta(h, \rho)$  для различных значений радиуса подложки  $r$ . 1 –  $r = 0,1$ , 2 –  $0,3$ , 3 –  $0,5$ , 4 –  $0,7$ , 5 –  $0,9$ .



Таким образом, для совокупности параметров  $r$ ,  $h$  и  $\rho$ , описывающих геометрию оснастки, имеется возможность установить однозначные соотношения, позволяющие получать пленки с оптимальной равномерностью по толщине. Точные значения величины неравномерности могут быть получены по выражениям (8) и (9).

### Заключение

В рамках рассматриваемой модели плоского планетарного вращения проведены расчеты распределения толщины по радиусу подложек при различных геометрических параметрах механизма планетарного вращения. Рассчитаны оптимальные соотношения между параметрами, характеризующими геометрию оснастки, позволяющие минимизировать отклонения толщины слоя на заданном радиусе. Показано, что при соблюдении определенных соотношений между основными геометрическими параметрами механизма планетарного вращения возможно получение однородных по толщине пленок на больших площадях с общей неравномерностью до  $5 \times 10^{-4}$ .

Для рассмотренной геометрии механизма вращения существуют две узкие области на параметрической плоскости, в которых достигается оптимизация, соответствующие меньшим и большим значениям параметров механизма вращения. С увеличением относительной высоты возрастает устойчивость функции отклонения толщины как к малому изменению геометрических параметров, так и к изменению индикатрисы испарителей. Поэтому, с этой точки зрения, использование геометрических схем планетарного механизма с большими относи-

тельными высотами и большим расстоянием между осями вращения является более предпочтительным, однако возможно использование и более компактных моделей, требующих меньших габаритов установки и меньших расходов вещества и времени при напылении оптических покрытий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. Пер. с англ. М.: Госэнергоиздат, 1962. 608 с.
2. Берндт К.Г. Методы контроля и измерения толщины пленок и способы получения пленок, однородных по толщине // Физика тонких пленок / Пер. с англ. Под ред. Сандомирского В.Б. и Ждана А.Г. М.: Мир, Т. 3. 1972. С. 7–57.
3. Behrndt K. Thickness Uniformity on Rotating Substrates // Trans. 100th Nat. Vac. Symp. 1963. P. 379–384.
4. Большанин А.Ф., Жиглинский А.Г., Парчевский С.Г., Путилин Э.С. Формирование пленок постоянной толщины на осесимметричной подложке // ОМП. 1978. № 3. С. 39–42.
5. Бубис И.Я., Вейденбах В.А., Духопел И.И., Зубаков В.Г., Качкин С.С., Кузнецов С.М., Лисицын Ю.В., Окатов М.А., Петровский Г.Т., Придатко Г.Д., Сергеев Л.В., Смирнов В.И., Суйковская Н.В., Торбин И.Д., Чунин Б.А. Справочник технолога–оптика / Под общ. ред. Кузнецова С.М. и Окатова М.А. Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
6. Жиглинский А.Г., Путилин Э.С. Оптимальные условия формирования однородных тонких пленок // ОМП. 1971. № 9. С. 46–49.
7. Чжон Суп Ким, Путилин Э.С. Формирование толщины слоев вакуумным испарением // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 10. С. 108–112.