ISSN 0868–5886 НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2010, том 20, № 1, с. 59–64

ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МЕТОДИКИ

УДК 535.621

© Е. Н. Котликов, В. А. Иванов, В. Н. Прокашев, А. Н. Тропин

ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНАСТКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

При промышленном изготовлении многослойных оптических покрытий существенное значение имеет равномерность нанесения оптических пленок на большие по размеру детали или кассеты с большим количеством подложек. В настоящей статье рассмотрены зависимости геометрических параметров оснастки вакуумной установки, обеспечивающие наилучшую однородность по толщине осаждаемого слоя по поверхности крупногабаритных деталей. Показано существование оптимального набора геометрических параметров вакуумной оснастки для получения наилучшей равномерности осаждаемого слоя. При некотором взаимном соотношении величин этих параметров неравномерность по толщине нанесенной пленки может не превышать 10^{-4}–10^{-6} на всей поверхности подложки.

Кл. сл.: покрытие, интерференция, вакуумное осаждение, вращение, однородность, испарение

ВВЕДЕНИЕ

При реализации оптических покрытий наряду с их оптическими и эксплуатационными свойствами особое внимание уделяется равномерности осаждаемого покрытия по толщине, а при промышленном производстве этот фактор становится наиболее значимым. Получение равномерных по толщине покрытий на подложках значительной площади, а также реализация за один технологический цикл большого количества некрупных оптических деталей с идентичными оптическими характеристиками позволяет расширить технологические возможности производства и снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Основная часть публикаций, посвященных проблеме получения однородных по толщине оптических пленок [1–8], 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 оптических покрытий.

В работе предпринята попытка выявить взаимосвязь основных конструктивных параметров различных конструкций оснастки вакуумной установки при условии получения наилучшей однородности по толщине получаемых слоев. По результатам работы имеется возможность оценить равномерность получаемых покрытий при заданной геометрии, а в случае проектирования оснастки вакуумной камеры — определить оптимальный набор геометрических параметров.

1. МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОСАЖДАЕМОГО СЛОЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОДЛОЖКИ

В процессе вакуумного осаждения заданная равномерность по толщине осаждаемых покрытий достигается за счет эксцентричного расположения испарителя и вращения подложек [1]. Обычно применяют схемы одинарного и двойного (планетарного) вращения.

Исходя из общепринятых соображений в работе предлагается оригинальный алгоритм расчета распределения толщины осаждаемого слоя по поверхности подложки, в основных положениях совпадающий с описанными ранее подходами [3, 5].

Пусть испарение вещества происходит из поверхностного (косинусного) источника А, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до подложки. Тогда толщина D в некоторой точке выражается формулой [3]

$$D = \frac{\eta m}{\pi g} \frac{\cos(\theta)\cos(\alpha)}{b^2}. \qquad (1)$$

Здесь m — масса испарившегося вещества; η — коэффициент аккомодации; g — плотность образовавшегося слоя; α — угол между нормалью к поверхности испарителя и направлением АВ от испарителя в исследуемую точку подложки В (рис. 1); θ — угол между нормалью n к поверхности подложки в точке В и направлением АВ; b — расстояние от испарителя до исследуемой точки подложки [9].

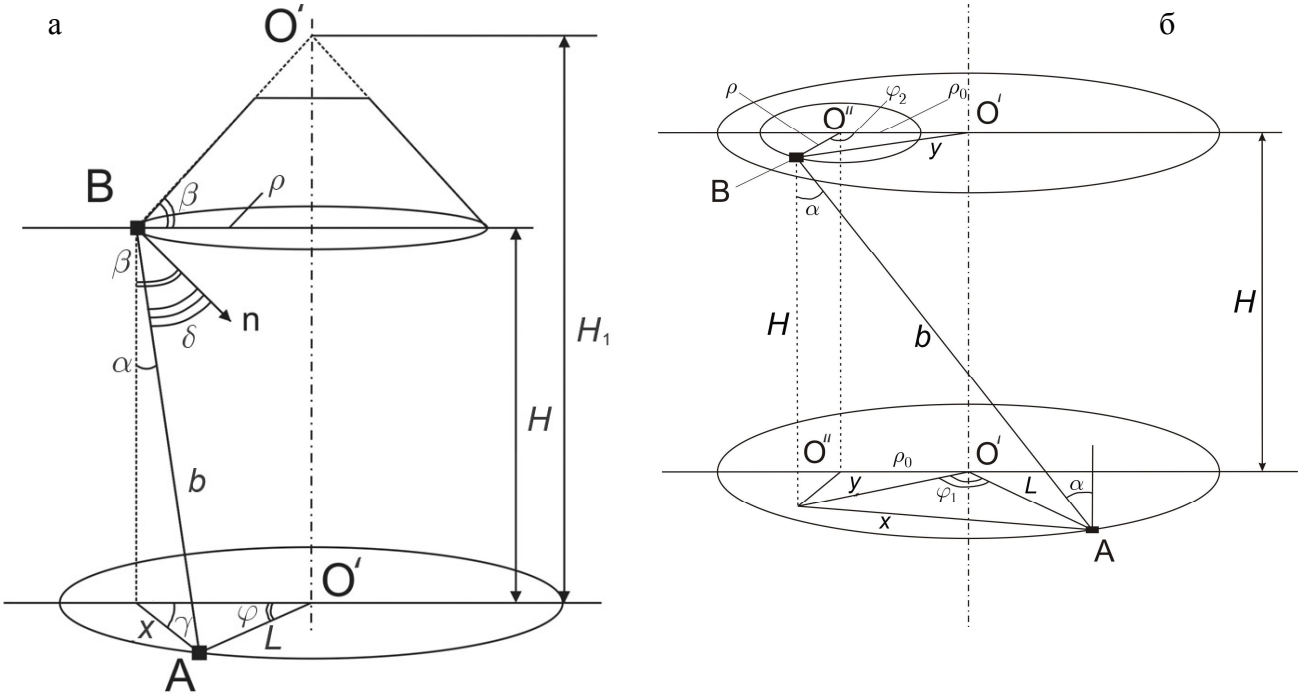


Рис. 1. Одинарная (а) и планетарная (б) модели вращения подложек.
O'O' — ось вращения оснастки; *O"O"* — ось вращения подложки; β — угол между образующей конуса и плоскостью вращения точки B; *L* — расстояние от испарителя до оси вращения оснастки; ρ — расстояние от оси вращения подложки до точки B; *H* — расстояние по нормали от испарителя до плоскости вращения точки B; ρ_0 — расстояние между осями вращения *O'O'* и *O"O"*

Здесь следует отметить, что в случае испарителя с эмиссионной характеристикой, отличной от косинусной, в выражении (1) вместо $\cos(\alpha)$ следует подставить соответствующую зависимость для индикатрисы, как это сделано, например, в работе [9].

В предположении, что за время напыления скорость испарения и индикатриса испарителя не меняются, функция толщины *D* зависит только от взаимного расположения площадки d*S* и испарителя. За время напыления *t* площадка d*S* движется равномерно и многократно проходит по своей траектории *X*, что обычно выполняется на практике. При равномерном движении площадки d*S* по траектории *X*, т.е. d*x* / d*t* = const, толщину слоя *T*, нанесенного за время *t*, можно вычислить, заменив переменную интегрирования:

$$T = \int_{t} D\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\mathrm{const}} \int_{X} D\,\mathrm{d}x\,. \qquad (2)$$

Величины θ и *b* зависят от геометрии оснастки и от механизма вращения подложек. Ниже будет представлен расчет толщины пленки для одинарного вращения при осаждении пленок на конусную (рис. 1, а) и сферическую поверхности, а также при планетарном вращении подложек в плоскости, перпендикулярной оси вращения оснастки (рис. 1, б).

1.1. Осаждение на конусную и сферическую поверхности при одинарном вращении

В случае конусной поверхности местоположение точки B на поверхности конуса определяется расстоянием до оси вращения ρ (рис. 1, а). Высота над плоскостью испарителя $H = H_1 - \rho \cdot \mathrm{tg}(\beta)$. Расстояние *b* определяется $b^2 = x^2 + H^2 = L^2 + \rho^2 - L\rho\cos(\varphi) + H^2$. Нормируем все линейные параметры величиной *L*, тогда расстояние *b* в единицах *L* выражается: $b^2 = 1 + \rho^2 - \rho\cos(\phi) + H^2$. Угол δ определим из тригонометрических соображений:

$$\cos(\delta) = \cos(\alpha)\cos(\beta) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma)\,,$$

где $\cos(\alpha) = \dfrac{H}{b}$, тогда $\sin^2(\alpha) = 1 - \left(\dfrac{H}{b}\right)^2$. Также $\cos(\gamma) = \dfrac{\rho - \cos(\varphi)}{x}$.

В случае вогнутой сферической поверхности высота над плоскостью испарителя — $H = H_1 - R + \sqrt{R^2 - \rho^2}$, а синус и косинус угла β соответственно: $\sin(\beta) = \dfrac{\rho}{R}$ и $\cos(\beta) = \sqrt{1 - \dfrac{\rho^2}{R^2}}$.

Испаритель представим в виде тонкого кольца радиуса L, каждый малый отрезок которого имеет соответствующую индикатрису испарения [3].

В цилиндрических координатах интеграл (2) примет вид

$$T(\rho) = \int_0^{2\pi} DL\,\mathrm{d}\varphi = L\int_0^{2\pi} D\,\mathrm{d}\varphi = H\int_0^{2\pi} \frac{\cos(\delta)\mathrm{d}\varphi}{b^3}. \qquad (3)$$

Отметим, что интерес представляет не абсолютное значение толщины в точке, а распределение толщины слоя по поверхности подложки. Поэтому анализу будет подвергаться безразмерная толщина $\Delta(\rho) = T(\rho)/T(0)$. В этом случае величина $\Delta(\rho)$ примет вид

$$\Delta(\rho) = \frac{T(\rho)}{T_0} = \frac{H(1+H_1^2)^2}{2\pi H_1^2}\int_0^{2\pi} \frac{\cos(\delta)\mathrm{d}\varphi}{b^3}. \qquad (4)$$

Таким образом, выражение (4) определяет относительную толщину в точке на расстоянии ρ от оси вращения конусной или сферической поверхности.

1.2. Планетарное вращение

В общем виде вывод выражения для расчета распределения толщины слоя при планетарном вращении плоской подложки (рис. 1, б) подобен приведенному выше.

Аналогичным образом, представив испаритель в виде тонкого кольца радиуса L, каждая точка которого имеет соответствующую индикатрису испарения [3], можно исключить вращение вокруг оси $O'O'$. То есть точка B вращается только вокруг оси подложки $O''O''$ с радиусом ρ, а испаритель имеет вид тонкого кольца радиуса L с центром на оси карусели $O'O'$.

Таким образом, толщина нанесенного слоя $T(\rho)$ вычисляется двойным интегрированием: по длине окружности кольцевого испарителя и по длине окружности радиуса ρ, по которой движется точка B. В цилиндрических координатах выражение имеет вид

$$T(\rho) = \frac{1}{2\pi\rho}\int_0^{2\pi}\left[L\int_0^{2\pi} D\,\mathrm{d}\varphi_1\right]\rho\,\mathrm{d}\varphi_2 = \frac{L}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int D\,\mathrm{d}\varphi_1\,\mathrm{d}\varphi_2. \qquad (5)$$

Функцию толщины D вида (1) можно получить из геометрических соотношений (рис. 1, б): $D = H^2 / b^4$, где $b^2 = x^2 + H^2 = H^2 + L^2 + y^2 - 2yL\cos(\varphi_1)$, $y^2 = \rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho_0\rho\cos(\varphi_2)$.

Перейдем к нормированным параметрам, тогда относительная толщина $\Delta(\rho) = T(\rho) / T(0)$ окончательно определится выражением

$$\Delta(\rho) = \frac{(1+H^2)^2}{4\pi^2}\int_0^{2\pi}\int \frac{\mathrm{d}\varphi_1\,\mathrm{d}\varphi_2}{(1+H^2+y^2-2y\cos\varphi_1)^2}. \qquad (6)$$

В основе предложенной модели расчета для планетарного вращения подложек лежит положение об отсутствии взаимосвязи между величинами φ_1 и φ_2. На самом деле это не так. В силу практической реализации планетарного механизма в подынтегральном выражении возникает составляющая, одновременно содержащая φ_1 и φ_2, существенным образом усложняющая анализ выражения для расчета толщины слоя [5]. Однако, как показали наши расчеты, при небольших межосевых расстояниях с сохранением достаточной точности вычислений величины φ_1 и φ_2 можно принимать независимыми.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ОСНАСТКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАВНОМЕРНЫХ ПО ТОЛЩИНЕ СЛОЕВ

В предыдущем разделе были получены выражения для определения толщины пленки по поверхности подложки для различных механизмов вращения. На самом деле, кроме расчета распределения толщины пленки по поверхности подложки, практический интерес представляет определение оптимальной геометрии оснастки, обеспечивающей наилучшую равномерность получаемых слоев.

Для случая конусной поверхности независимыми параметрами будут относительная высота H и угол β, для сферической поверхности — высота H и радиус R, для планетарного вращения — также высота H и межосевое расстояние ρ_0.

В качестве критерия для оценки равномерности для каждого из рассматриваемых случаев были выбраны следующие функции отклонения толщины.

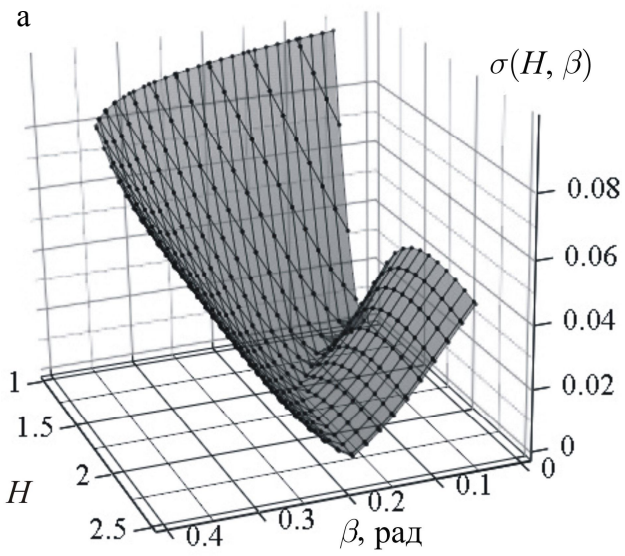
1. Для конусной поверхности:

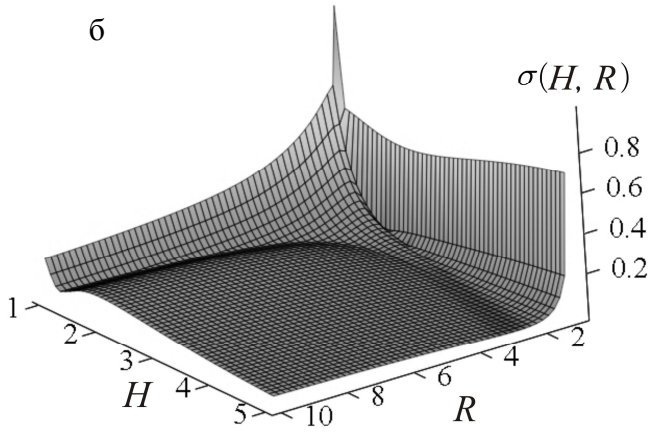
$$\sigma(H,\beta) = \frac{\max(\Delta(\rho_i,H,\beta)) - \min(\Delta(\rho_i,H,\beta))}{\Delta(\rho_{\min},H,\beta)},$$

где ρ_i принимает значения от $\rho_{\min}$ до $\rho_{\max}$, которые в свою очередь определяются геометрией расположения и размерами подложки.

2. Для сферической поверхности:

$$\sigma(H,R) = \frac{\max(\Delta(\rho_i,H,R)) - \min(\Delta(\rho_i,H,R))}{\Delta(\rho_{\min},H,R)},$$





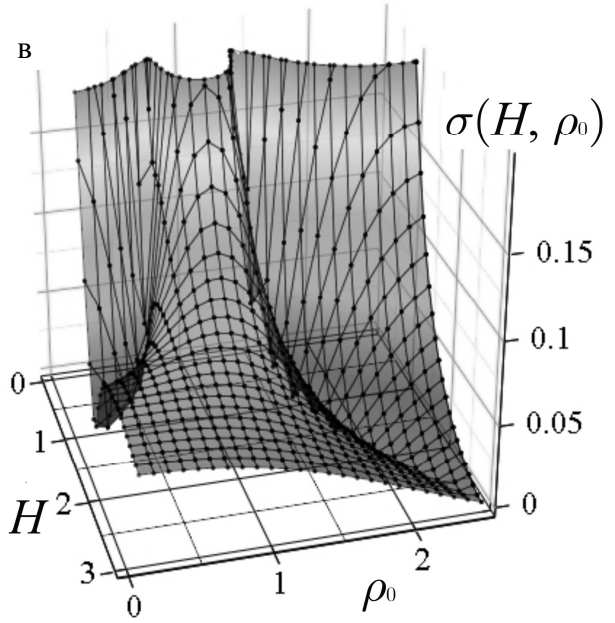


Рис. 2. Трехмерное изображение функции отклонения толщины.
а — для конусной поверхности при $0.335 \le \rho_i \le 0.677$;
б — для сферической поверхности при $0 \le \rho_i \le 1$;
в — для планетарного вращения при $\rho = 0.3$

где ρ_i также принимает значения от $\rho_{\min}$ до $\rho_{\max}$.

3. Для планетарного вращения:

$$\sigma(H,\rho_0) = \frac{\max\left[\Delta(\rho_i,H,\rho_0)\right] - \min\left[\Delta(\rho_i,H,\rho_0)\right]}{\Delta(0,H,\rho_0)},$$

где ρ_i принимает значения от 0 до ρ.

Трехмерное изображение функций отклонения толщины для рассматриваемых случаев представлены на рис. 2. Во всех случаях отчетливо видна область на поверхности, соответствующая минимуму функции. Это означает, что, во-первых, существует оптимальная совокупность геометрических параметров, обеспечивающая наилучшую однородность слоя, во-вторых, имеется возможность однозначно определить связь между независимыми геометрическими параметрами, значения которых дают минимальный разброс по толщине на вращающейся подложке.

Значения функции σ в некоторых точках, а также проекции областей минимальных значений этой функции на плоскость конструктивных параметров представлены на рис. 3.

Истинное значение неравномерности определяется по выражениям (4) и (6) и в случае оптимизированной геометрии составляет $5\cdot10^{-3}$–$5\cdot10^{-6}$ при одинарном вращении и до 10^{-4} для планетарного механизма для подложек размером до 200 мм.

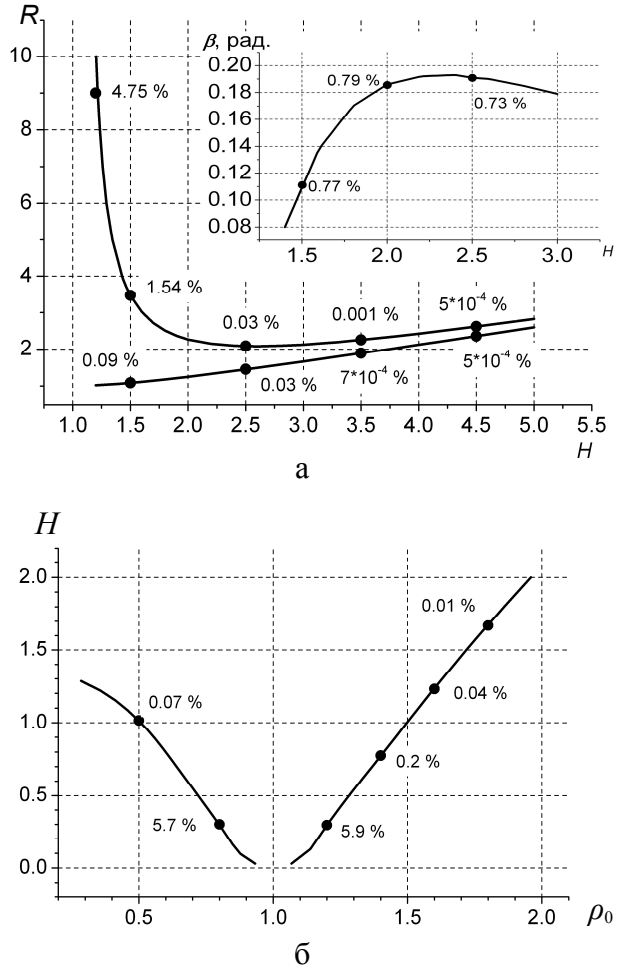


Рис. 3. Оптимальные соотношения геометрических параметров вакуумной оснастки.
а — для случая сферической поверхности (на вставке — для конусной поверхности); б — для планетарного вращения

Для конусной поверхности малым значениям относительной высоты соответствуют небольшие углы наклона подложки к горизонтальной плоскости, в пределе стремящиеся к нулю, т. е. при высотах, близких к 1, наименьший разброс по толщине будет на подложке, расположенной горизонтально. Для сферической поверхности для одной из областей малым значениям относительной высоты соответствуют большие значения радиуса кривизны, в пределе стремящиеся к бесконечности, т. е. при высотах, близких к 1, наименьший разброс по толщине будет, как и в случае с конической поверхностью, на подложке, расположенной горизонтально.

Для планетарной модели первая область с меньшими значениями H и ρ_0 соответствует более компактному планетарному механизму, вторая — подразумевает большие размеры устройства. Области расширяются с ростом высоты H, и как следствие функция $\sigma(H, \rho_0)$ становится более устойчивой к малым вариациям параметров H и ρ_0, а минимальное значение $\sigma(H, \rho_0)$ уменьшается с ростом H.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках рассматриваемых моделей одинарного и планетарного вращений подложек проведены расчеты распределения толщины слоя по радиусу подложек при различных геометрических параметрах механизма вращения. А также рассчитаны оптимальные соотношения между параметрами, характеризующими геометрию оснастки, позволяющие минимизировать отклонения толщины слоя при заданном размере детали. Показано, что при соблюдении определенных соотношений между основными геометрическими параметрами механизма вращения возможно получение однородных по толщине пленок на крупногабаритных деталях с общей неравномерностью до 10^{-4}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майссел Л., Глэнг Р.* Технология тонких пленок. Справочник. Т. 1–2. М.: Советское радио, 1977. 1429 с.
2. *Холлэнд Л.* Нанесение тонких пленок в вакууме. Пер. с англ. М.: Госэнергоиздат, 1962. 608 с.
3. *Берндт К.Г.* Физика тонких пленок. Т. 3. М.: Мир, 1972. 331 с.
4. *Behrndt K.* Thikness Unifirmity on Rotating Substrates // Trans. 100th Nat. Vac. Symp. 1963. P. 379–384.
5. *Большанин А.Ф., Жиглинский А.Г., Парчевский С.Г., Путилин Э.С.* Формирование пленок постоянной величины на осесимметричной подложке // ОМП. 1978. № 3. С. 39–42.
6. *Бубис И.Я., Вейденбах В.А., Духопел И.И. и др.* Справочник технолога-оптика. Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
7. *Жиглинский А.Г., Путилин Э.С.* Оптимальные условия формирования тонких пленок // ОМП. 1971. № 9. С. 46–49.
8. *Ким Чжон Суп, Путилин Э.С.* Формирование толщины слоев вакуумным испарением // Оптический журнал. 1998. Т. 65, № 10. С. 108–112.
9. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Прокашев В.Н., Тропин А.Н.* Равномерность толщины пленок, осажденных на вращающиеся подложки // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 2. С. 58–62.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
(*Котликов Е.Н., Прокашев В.Н.*)

НИИ "Гириконд", Санкт-Петербург
(*Иванов В.А., Тропин А.Н.*)

Контакты: *Котликов Евгений Николаевич*,
ekotlikov@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17.06.2009.

OPTIMIZATION OF THE VACUUM CHAMBER MECHANISM AT MANUFACTURING OPTICAL COATINGS

E. N. Kotlikov[1], V. A. Ivanov[2], V. N. Prokashev[1], A. N. Tropin[2]

[1]*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
[2]*Scientific Research Institute "Giricond", Saint-Petersburg*

Uniformity of optical films thickness deposited on large details or cartridges with a lot of substrates has vital importance at industrial manufacturing of multilayered optical coatings. In this paper the dependence of geometrical parameters of the vacuum chamber mechanism providing the best uniformity on thickness of a deposited layer is considered. Existence of an optimum set of geometrical parameters of the vacuum chamber providing the best uniformity of the layer is shown. Non-uniformity on thickness of the film can not exceed 10^{-4}–10^{-6} on all surface of a substrate at some positional relationship of these geometrical parameters.

Keywords: coating, interference, vacuum deposition, rotation, uniformity, evaporation