

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ИСПАРЕНИИ ДВУХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

© 2012 г. Л.А. Губанова, доктор техн. наук; Э.С. Путилин, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург.

E-mail: eputilin@yandex.ru

Рассмотрена возможность формирования покрытий при одновременном испарении двух различных диэлектриков с постоянными по радиальной координате толщиной и показателем преломления. Приведено распределение толщины и показателя преломления покрытия, образованного при одновременном испарении двух плёнообразующих материалов из источников, находящихся на одинаковых расстояниях от оси вращения подложки.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, одновременное испарение, два источника, диэлектрики, толщина, показатель преломления.

Коды OCIS: 310.0310.

Поступила в редакцию 21.02.2013.

Основными особенностями оптических покрытий является возможность формирования энергетических характеристик отражённого или прошедшего излучения. Для этого используют покрытия, состоящие из чередующихся плоскопараллельных слоёв диэлектриков с различающимися показателями преломления. Однако, если использовать слои, толщина (или показатель преломления) которых является функцией радиальной координаты на поверхности оптического элемента, то в этом случае, как было нами показано ранее [1], возможно формирование не только спектральных, но и фазовых характеристик отражённого или прошедшего излучения.

Для создания слоёв с такими параметрами необходимо использовать совместное осаждение двух или нескольких плёнообразующих материалов методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Решение подобной проблемы изложено в ряде работ [2–4]. Они посвящены исследованию свойств композитных покрытий, получаемых при совместном осаждении двух или нескольких плёнообразующих материалов, в качестве которых могут быть использованы металлы, полупроводники и диэлектрики, в зависимости от концентрации одного из компонентов. В нашей работе рассмотрена

возможность осаждения покрытий, у которых толщина и показатели преломления слоёв являются функциями радиальной координаты. Для получения таких слоёв используют одновременное испарение двух плёнообразующих материалов методом электронно-лучевого или резистивного испарения.

Рассмотрим процесс одновременного осаждения двух плёнообразующих материалов на подложки, совершающие планетарное вращение. На рис. 1 изображена схема испарения. Как было показано ранее [5], толщина слоя при осаждении из плоского поверхностного испарителя на подложку, совершающую планетарное вращение, определяется выражением

$$t = \frac{\beta v N}{2\pi g \omega} \int_0^T \frac{H^2}{P^4} d\varphi, \quad (1)$$

где: $P^2 = H^2 + a^2 + r^2 + \rho^2 - 2ar \cos(\varphi - \varphi_1) - 2a\rho \cos(\alpha\varphi + \varphi_1) + 2r\rho \cos[(\alpha - 1)\varphi + \psi_1 - \varphi_1]$,
 $\alpha = \frac{\psi}{\varphi}$,

H — расстояние от плоскости испарителя до подложки,

a — расстояние от оси вращения подложкодержателя до испарителя,

r — расстояние между осями вращения подложки и подложкодержателя,
 ρ, φ — координаты точки на подложке,
 ω — скорость вращения подложки,
 ω — скорость вращения подложкодержателя,
 r, ψ — координаты центра подложки,
 φ_1 — положение точки на подложке в момент начала осаждения,
 ψ_1 — положение центра подложки в момент начала осаждения,
 v — скорость осаждения плёнкообразующего материала,
 g — плотность формируемой плёнки,
 β — коэффициент конденсации осаждаемого материала,
 T — период подынтегральной функции, определяемый как наименьшее общее кратное чисел: $2\pi, 2\pi \cdot |\alpha|^{-1}, 2\pi \cdot |\alpha - 1|^{-1}$.

Если испарение происходит одновременно из нескольких испарителей, то общая толщина слоя, равна сумме толщин слоёв, осаждаемых из каждого испарителя, т.е. $t = \sum_{i=1}^k t_i$. Как видно из выражения (1) толщина слоя зависит от параметров, характеризующих процесс осаждения: коэффициент конденсации осаждаемого материала, скорость испарения материала, плотность образующейся плёнки, угловая скорость вращения подложки, а также относительное расположение подложки, на кото-

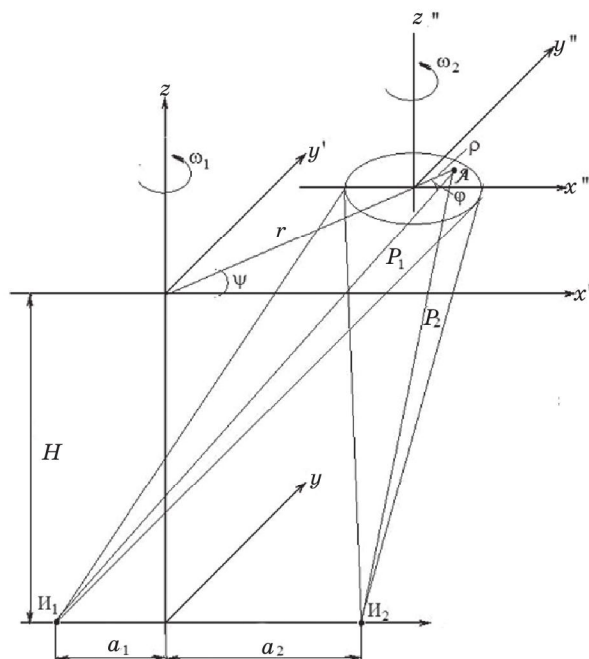


Рис. 1. Схема одновременного испарения двух плёнкообразующих материалов.

рую происходит осаждение слоёв, и испарителей.

Если формирование слоя на подложке происходит испарением из двух испарителей, то общая толщина слоя определяется выражением

$$t = \frac{N}{2\pi\omega} \left[\frac{\beta_1 v_1}{g_1} \int_0^T \frac{H_1^2}{P_1^4} d\varphi + \frac{\beta_2 v_2}{g_2} \int_0^T \frac{H_2^2}{P_2^4} d\varphi \right], \quad (2)$$

где индексы у величин β, v, g, H, P означают, что испарение происходит из первого и второго испарителей, содержащих разные плёнкообразующие материалы.

Поскольку в эксперименте, при исследовании свойств плёнок с переменной по поверхности элемента толщиной, производится измерение относительной толщины слоя (отношение толщин слоя в зоне с координатой на подложке к толщине слоя в центре подложки), то необходимо привести выражение, определяющее эту величину. Относительная толщина слоя в соответствии с этим и учётом (2) равна

$$\frac{t}{t_0} = \frac{\frac{\beta_1 v_1}{g_1} \int_0^T \frac{H_1^2}{P_1^4} d\varphi + \frac{\beta_2 v_2}{g_2} \int_0^T \frac{H_2^2}{P_2^4} d\varphi}{\frac{\beta_1 v_1}{g_1} \int_0^T \frac{H_1^2}{P_{01}^4} d\varphi + \frac{\beta_2 v_2}{g_2} \int_0^T \frac{H_2^2}{P_{02}^4} d\varphi}, \quad (3)$$

где P_{01} и P_{02} — расстояния от испарителей до центра вращения подложки.

Плёнки, полученные одновременным осаждением плёнкообразующих материалов испарением из двух испарителей, обладают, кроме распределения толщины по радиальной координате, переменным показателем преломления. Показатель преломления, как известно, определяется диэлектрической и магнитной проницаемостью материала. Поскольку мы рассматриваем немагнитные материалы, то показатель преломления будет зависеть только от диэлектрической проницаемости плёнки. Диэлектрическая проницаемость среды, образованной смесью диэлектриков, в соответствии с выражением, приведённым в работе [5] равна

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_1 + \frac{1-c_1}{1-L} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) - \varepsilon_2 \frac{L}{1-L} + \left[\left(\varepsilon_2 \frac{L}{1-L} - \varepsilon_1 - \frac{1-c_1}{1-L} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2 + 4\varepsilon_2 \varepsilon_1 \frac{L}{1-L} \right) \right]^{0.5} \right\} \quad (4)$$

где L — форм-фактор, определяющий форму сфероидальных частиц с диэлектрической проницаемостью ε_1 , погружённых в среду с диэлектрической проницаемостью ε_2 ,
 c_1 — концентрация первого материала.

При определении концентрации одного из материалов в плёнке будем исходить из того, что количество молекул плёнкообразующего материала, осаждаемого из первого испарителя на элементарную площадку dS , составляет

$$N_{m_1} = \frac{g_1 dV}{\mu_1} = \frac{g_1 t_1 dS}{\mu_1},$$

где μ_1 — молярная масса первого пленкообразующего материала.

Аналогично и для второго плёнкообразующего материала. В силу аддитивности общее количество молекул, осаждаемых на площадке dS равно сумме молекул первого и второго материала. В соответствии с этим концентрация одного из материалов в плёнке равна

$$c_1 = \frac{\frac{\beta_1 v_1}{\mu_1} \int_0^T \frac{H_1^2}{P_1^4} d\varphi}{\frac{\beta_1 v_1}{\mu_1} \int_0^T \frac{H_1^2}{P_1^4} d\varphi + \frac{\beta_2 v_2}{\mu_2} \int_0^T \frac{H_2^2}{P_2^4} d\varphi} = \left(1 + \frac{\beta_2 v_2 \mu_1}{\beta_1 v_1 \mu_2} \frac{H_2^2 \int_0^T P_2^{-4} d\varphi}{H_1^2 \int_0^T P_1^{-4} d\varphi} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Зная концентрацию одного из материалов нетрудно определить величину показателя преломления для двух значений форм-фактора L . Так для $L = 0$

$$n_{n,l}^2 = n_1^2 + (1 - c_1)(n_2^2 + n_1^2), \quad (6)$$

а для $L = 1$

$$n_{n,l} = \frac{n_1 n_2}{[n_1^2 + c_1(n_2^2 - n_1^2)]^{1/2}}. \quad (7)$$

При совместном осаждении плёнок концентрация одного из материалов определяется выражением (5).

Наиболее простой результат может быть получен при осаждении плёнок на подложку, вращающуюся вокруг оси, проходящей через её центр. В этом случае $r = 0$ и

$$t = \sum_{i=1}^2 \frac{\beta_i v_i N}{2\pi g_i \omega} \frac{H_i^2 + \rho^2 + a_i^2}{[H_i^2 + (a_i + \rho)^2]^{3/2} \cdot [H_i^2 + (a_i - \rho)^2]^{3/2}} \quad (8)$$

Если испарители находятся в одной плоскости, то толщина осаждаемого слоя зависит только от расстояния между осью вращения подложки и испарителями, т.к. $H_1 = H_2$, то концентрация одной из компонент в этом случае равна

$$c_1 = \left(1 + \frac{\beta_2 v_2 g_1}{\beta_1 v_1 g_2} \left(\frac{H^2 + \rho^2 + a_2^2}{H^2 + \rho^2 + a_1^2} \right) \left(\frac{H^2 + (a_1 + \rho)^2}{H^2 + (a_2 + \rho)^2} \right)^{3/2} \left(\frac{H^2 + (a_1 - \rho)^2}{H^2 + (a_2 - \rho)^2} \right)^{3/2} \right)^{-1} \quad (9)$$

Относительная толщина слоя при этом

$$\frac{\left(\frac{(H^2 + \rho^2 + a_1^2)(H^2 + (a_1 - \rho)^2)^{-1.5}}{(H^2 + (a_1 + \rho)^2)^{1.5}} \frac{\beta_2 v_2}{\beta_1 v_1} \frac{(H^2 + \rho^2 + a_2^2)(H^2 + (a_2 - \rho)^2)^{-1.5}}{(H^2 + (a_2 + \rho)^2)^{1.5}} \right)}{(H^2 + a_1^2)^{-2} + \frac{\beta_2 v_2}{\beta_1 v_1} (H^2 + a_2^2)^{-2}}$$

Если $a_1 = a_2 = a$, то относительная толщина слоя будет определяться выражением

$$\frac{t}{t_0} = \frac{(H^2 + a^2)^2}{(H^2 + (a + \rho)^2)^{1.5} (H^2 + (a - \rho)^2)^{1.5}}. \quad (10)$$

Концентрация вещества, испаряемого из первого испарителя, будет равна:

$$c_1 = \left(1 + \frac{\beta_2 v_2 \mu_1}{\beta_1 v_1 \mu_2} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Как видно из выражений (10) и (11) относительная толщина слоя в этом случае не зависит от скоростей испарения, коэффициентов конденсации и плотности материалов, испаряемых из различных испарителей. Концентрация материала, а, следовательно, и показатель преломления формируемой плёнки будет определяться скоростями осаждения плёнкообразующих материалов и коэффициентами конденсации материалов.

На рис. 2 изображены распределения толщины и показателя преломления слоя при формировании его испарением из двух испарителей, удалённых от оси вращения на одинаковые расстояния с одинаковыми скоростями формирования слоя. Расстояние от испарителей до поверхности подложкодержателя 475 мм, расстояние от оси вращения 230 мм, коэффициенты конденсации осаждаемых материалов диоксидов кремния и титана (SiO_2 , TiO_2) одинаковы и равны единице, а скорости их осаждения пропорциональны отношению их молярных масс. Как видно из этого рисунка концентрация одного из осаждаемых материалов равна 50%, а показатель преломления смеси в предположении, что форм-фактор для них равен единице, должен составлять 1,64, а для форм-фактора, равного нулю, соответственно 1,48. Экспериментально полученное значение показателя преломления смеси равно 1,52. Отличие в показателе преломления смеси от расчётных значений обусловлено тем, что величина форм-фактора для использованных диэлектриков, по-видимому, не очень сильно отличается от нуля.

Определение величины форм-фактора в

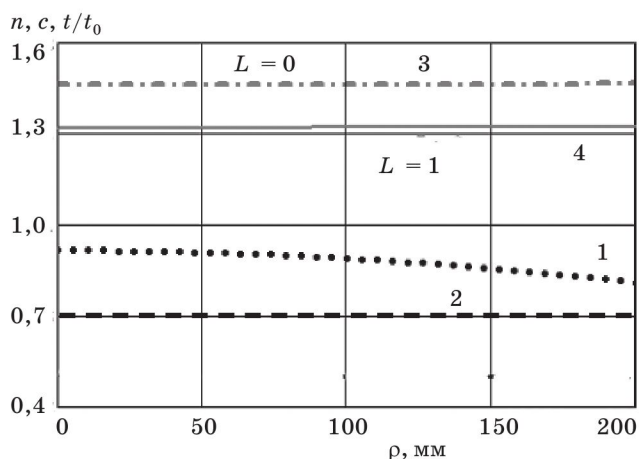


Рис. 2. Зависимости относительной толщины слоёв (1), концентрации (2) одного из испаряемых материалов (MgF_2), показателей преломления смеси ($\text{MgF}_2 + \text{ZrO}_2$) (3,4) от координаты на поверхности плоской подложки. Осаждение слоя проводилось при вращении подложки вокруг оси. Расстояние от оси вращения подложки до испарителей 235 мм, от плоскости испарителя до поверхности подложки 465 мм.

нашу задачу не входило, поскольку в данной работе авторов интересовало возможное изменение распределения толщины слоя и показателя преломления получаемой смеси по радиаль-

ной координате. Интересующих нас изменений в ходе экспериментальной реализации замечено не было или эти изменения были в пределах экспериментальной ошибки измерений.

Выводы

Показано, что при одновременном испарении двух плёнкообразующих материалов распределение толщины получаемых плёнок определяется взаимным расположением испарителей и вращающейся подложки в вакуумной камере. При одинаковом расстоянии от оси вращения подложки до испарителей распределение толщины слоя по её поверхности не зависит от скоростей испарения и молярных масс испаряемых материалов. Концентрация отдельных компонентов смеси и её показатель преломления в этом случае определяется только отношением скоростей испарения. Экспериментально измеренный показатель преломления полученной плёнки позволят определить величину форм-фактора, характеризующего смесь данных диэлектриков.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Губанова Л.А., Путилин Э.С. Интерференционные фильтры, формирующие фазовые и амплитудные характеристики отраженного и прошедшего излучения // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 8. С. 72–77.
2. Губанова Л.А., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Влияние примесей окисла на поглощение металлических плёнок // Оптико-механическая промышленность. 1991. Т. 56. № 3. С. 19–21.
3. Р.Якобсон. Неоднородные и совместно напылённые однородные плёнки для оптических применений // Физика тонких плёнок // под ред. Г.Хасса. М.: Мир. 1978. Т. 8. С. 61–66.
4. K. Robbie, Yan Cui, C. Elliott, K. Kaminska. Oxidation of evaporated porous silicon rugate lters // Applied Optics, 2006, V. 45, № 10. P. 8298–8303.
5. Жиглинский А.Г., Путилин Э.С. Оптимальные условия формирования однородных плёнок // Оптико-механическая промышленность. 1971. № 9. С. 27–30.