

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ СОВМЕСТНЫМ ИСПАРЕНИЕМ ДВУХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМУ

© 2014 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: la7777@mail.ru

Описано формирование интерференционных диэлектрических покрытий с изменяющимися по радиальной координате показателем преломления и толщиной. Такие покрытия могут быть получены при одновременном осаждении пленкообразующих веществ из двух испарителей с разной скоростью через диафрагму, расположенную параллельно плоскости испарителей. Исследовано распределение показателя преломления покрытия, образованного при одновременном испарении двух пленкообразующих веществ из источников, находящихся на разных расстояниях от оси вращения подложки. Представлены экспериментальные данные о показателе преломления пленок при совместном испарении двух оксидов. Показано, что форм-факторы этих пар отличаются: у оксидов титана и кремния он равен единице, а у оксидов гафния и кремния равен нулю.

Ключевые слова: одновременное испарение, диэлектрик, показатель преломления, толщина слоя, неоднородные слои, распределение показателя преломления, распределение толщины слоя.

Коды OCIS: 310.0310

Поступила в редакцию 15.12.2013

Ранее авторами статьи было рассмотрено формирование пленок методом электронно-лучевого испарения при совместном испарении из двух испарителей [1]. Создание покрытий с большими градиентами толщины и показателя преломления является одной из возможностей определения параметров пленок, формируемых на подложке в одинаковых условиях. Это позволит достаточно корректно определить влияние концентраций пленкообразующих веществ, скоростей испарения (осаждения) на распределение толщины и показателя преломления слоев.

Для того чтобы получить пленки с большими градиентами толщины и показателя преломления по радиальной координате, необходимо рассмотреть формирование пленки при испарении двух пленкообразующих веществ через круглую диафрагму, расположенную между двумя испарителями и вращающейся подложкой. Относительное расположение испарителей, подложки и диафрагмы приведено на рис. 1.

Формирование толщины слоя на поверхности подложки будет определяться видимостью испарителей из точки А (рис. 1) через круглую диафрагму радиусом r_d . Ранее было показано [2],

что толщина слоя в этом случае определяется как

$$t_i(\rho) = t(0) \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{(H^2 + a_i^2)^2 (H^2 + a_i^2 + \rho^2)}{\left[(H^2 + a_i^2 + \rho^2)^2 - (2a_i \rho)^2 \right]^{3/2}} \times 2 \arctg \left[\frac{\sqrt{H^2 + a_i^2 + \rho^2} - 2a_i \rho}{\sqrt{H^2 + a_i^2 + \rho^2} + 2a_i \rho} \right] \arctg \left(\frac{\varphi_{0i}(\rho)}{2} \right) - \frac{(H^2 + a_i^2)^2}{(H^2 + a_i^2 + \rho^2)^2 - (2a_i \rho)^2} \times \frac{2a_i \rho \sin[\varphi_{0i}(\rho)]}{H^2 + a_i^2 + \rho^2 + 2a_i \rho \cos[\varphi_{0i}(\rho)]} \right], \quad (1)$$

$$\varphi_{0i} = \arccos \frac{(r_d^2 H^2 - \rho^2 h^2)}{2a_i h \rho (H - h)},$$

где a_i – расстояние от i -го испарителя до оси вращения подложки, $i = 1, 2$, h – расстояние между плоскостями, в которых расположены испарители и диафрагма, H – расстояние

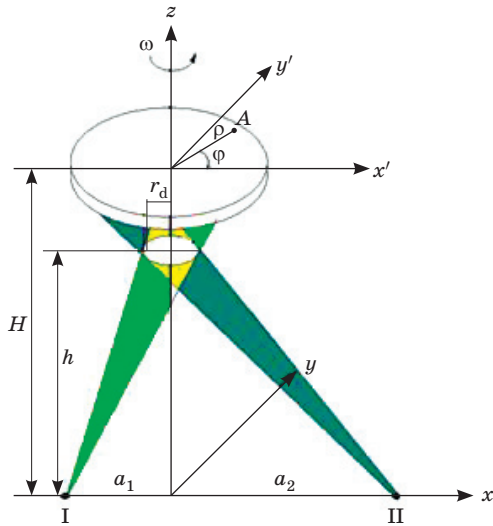


Рис. 1. Относительное расположение испарителей, диафрагмы и вращающейся подложки в вакуумной камере.

от плоскости, в которой размещены испарители, до плоскости, в которой размещена подложка, r_d – радиус диафрагмы, ρ – радиальная координата точки A на поверхности подложки.

Толщина пленки в центре подложки в отсутствии диафрагмы

$$t_0(\mathbf{0}) = (2\beta_i v_i / g_i) \omega N \left[H^2 / (H^2 + a_i^2) \right]^2, \quad (2)$$

где N – число периодов подынтегральной функции, ω – угловая скорость вращения подложки, v_i – скорость осаждения пленкообразующего материала, g_i – плотность формируемой пленки, β_i – коэффициент конденсации материала, осаждаемого из i -го испарителя.

Выражение (1) получается слишком громоздким и поэтому в такой записи вряд ли может быть использовано для дальнейшего анализа. При формировании слоя из двух испарителей толщина слоя в точке на поверхности подложки с координатой ρ будет определяться следующим выражением:

$$t(\rho) = t_1(\rho) + t_2(\rho), \quad (3)$$

где $t_1(\rho)$, $t_2(\rho)$ – толщины слоев, формируемых первым и вторым испарителями, и определяемые согласно соотношениям (1) и (2).

Толщина слоя в центре подложки t_0 рассчитывается как сумма толщин, формируемых из каждого испарителя

$$t_0 = 2H^2 \omega N \sum_{i=1}^2 A_i \frac{\beta_i v_i}{g_i} (H^2 + a_i^2)^{-2}, \quad (4)$$

где $A_i = 0,5[1 - (f_i - f)/|f_i - f|^{-1}]$ – функция, определяющая возможность осаждения слоя в центре подложки при наличии диафрагмы, равная 0 или 1, $f = rH/(H - h)$ – параметр, ответственный за эту возможность.

Концентрация вещества, осажденного из первого испарителя, как функция координаты определяется следующим выражением:

$$c(\rho) = t_1(\rho) / t(\rho). \quad (5)$$

Концентрация вещества, осажденного из первого испарителя в центре подложки, рассчитывается как

$$c(\mathbf{0}) = A_i \left(\frac{\beta_1 v_1}{g_1} \right) (H^2 + a_1^2)^{-2} \times \left[\sum_{i=1}^2 A_i \frac{\beta_i v_i}{g_i} (H^2 + a_i^2)^{-2} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Выражение (6) определено, если толщина слоя в центре подложки имеет конечное значение, отличное от нуля.

Как видно из зависимости (6), концентрация в центре подложки зависит от относительного расположения испарителей, скоростей осаждения веществ, их коэффициентов конденсации и плотности.

Распределение концентрации веществ, осаждаемых на поверхности подложки при совместном испарении из двух испарителей, по поверхности будет определяться теми же параметрами и зависеть от расстояния до центра подложки.

Показатель преломления как функция координаты по поверхности подложки будет определяться не только распределением концентраций веществ, но и форм-фактором L [3], определяющим форму сфероидальных частиц с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , погруженных в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 .

Авторами данной статьи были рассчитаны значения показателей преломления пленок, полученных при совместном испарении из двух испарителей через диафрагму, расположенную параллельно плоскости испарителей и плоскости, в которой находятся подложка. В качестве испаряемых веществ использовались пары оксидов циркония и кремния, а также титана и кремния. При определении показателя преломления полученной пленки в зависимости от радиальной координаты были учтены следующие факторы: плотности,

коэффициенты конденсации веществ (в данном случае равные единице), скорости испарения.

Для двух крайних значений форм-фактора $L = 0$ и $L = 1$ были рассчитаны распределения показателей преломления слоев, сформированных при указанных выше условиях.

Для $L = 0$ показатель преломления определялся из соотношения

$$n_0(\rho) = \sqrt{n_2^2(1 - C(\rho)) + n_1^2 C(\rho)}, \quad (7)$$

для $L = 1$

$$n_1(\rho) = \frac{n_1 n_2}{\sqrt{n_1^2 + C(\rho)(n_2^2 - n_1^2)}}. \quad (8)$$

Как видно из выражений (5)–(8), при испарении из двух испарителей можно получить пленку с различающимися по радиальной координате подложки концентрацией одного из веществ и показателями преломления. Для корректного анализа экспериментальных результатов необходимо, чтобы градиенты показателей преломления, а также толщины

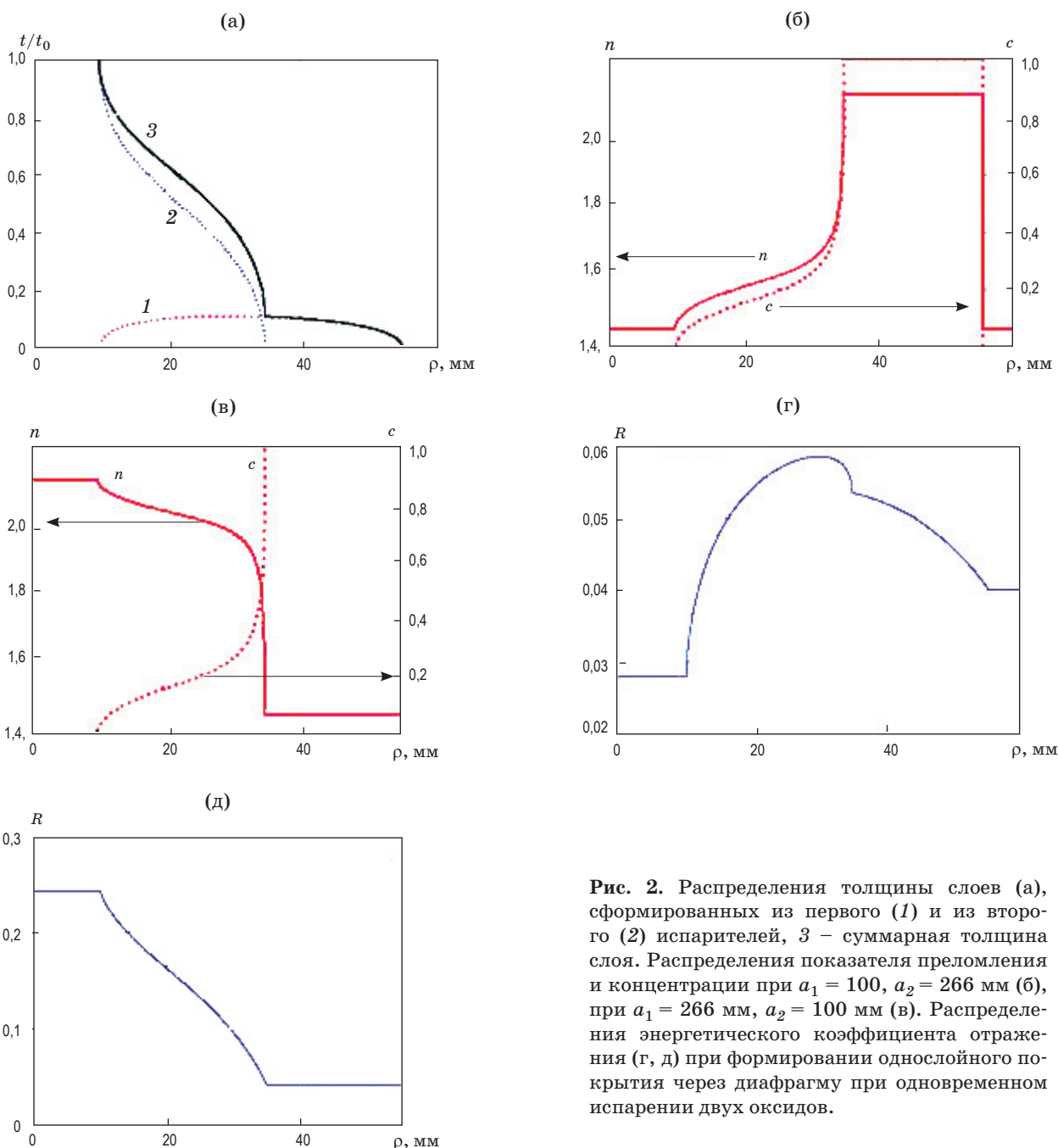


Рис. 2. Распределения толщины слоев (а), сформированных из первого (1) и из второго (2) испарителей, 3 – суммарная толщина слоя. Распределения показателя преломления и концентрации при $a_1 = 100$, $a_2 = 266$ мм (б), при $a_1 = 266$ мм, $a_2 = 100$ мм (в). Распределения энергетического коэффициента отражения (г, д) при формировании однослойного покрытия через диафрагму при одновременном испарении двух оксидов.

формируемых слоев и их коэффициентов отражения по поверхности подложки были бы минимальными. Поэтому измерение интересующих нас параметров (показатель преломления, толщина слоя, коэффициент отражения) необходимо проводить в области, где они линейно зависят от радиальной координаты. Эти зоны определяются геометрическими условиями осаждения (расстояниями от оси вращения подложки до испарителей, от плоскости, в которой размещены испарители, до плоскостей, в которых находятся диафрагма и оптический элемент, а также радиусом диафрагмы).

На рис. 2 представлено типичное распределение толщины слоя (рис. 2а) при испарении из двух испарителей (кривая 3), кривые 1 и 2 соответствуют распределению толщины слоя, получаемому при формировании слоя из каждого испарителя. Условия осаждения соответствуют удалению испарителей от оси вращения подложки на расстояния $a_1 = 100$ и $a_2 = 266$ мм, диафрагме диаметром $r_d = 20$ мм, расположенной на оси вращения подложки на расстоянии $h = 147$ мм от плоскости, в которой расположены испарители. Подложка расположена в плоскости, находящейся на расстоянии $H = 165$ мм от плоскости испарителей.

На рис. 2б, в представлены распределения показателей преломления и концентраций первого материала по поверхности подложки при приведенных выше условиях формирования для случая, когда из первого испарителя формируется слой пленкообразующего вещества с малым (SiO_2) – рис. 2б, а на рис. 2в с большим показателем преломления (TiO_2). На рис. 2г, д – распределения энергетического коэффициента отражения.

Рис. 2б, г отражают ситуацию, когда из первого испарителя происходит формирование слоя с показателем преломления 1,45, а из второго – 2,10. Рис. 2в, д иллюстрируют ситуацию, когда в первом испарителе помещено вещество с показателем преломления 2,10, а во втором – 1,45. Как видно из этих рисунков, при таком формировании слоев по поверхности подложки будет наблюдаться некоторый градиент коэффициента отражения.

Кроме того, при одинаковом распределении толщины слоев зависимости показателя преломления, энергетического коэффициента отражения по поверхности подложки от радиальной координаты различаются и являются функцией расположения испаряемых веществ

в камере. Рис. 2а также показывает, что существуют зоны, формируемые при испарении только одним из испарителей. Это позволяет считать эти зоны референтными и определять показатель преломления испаряемых веществ в зависимости от условий осаждения (давление и состав остаточной атмосферы, скорости испарения веществ, температура подложки во время осаждения). Помимо этого, распределения показателя преломления, толщины слоя, коэффициента отражения обладают осевой симметрией, поэтому, измерив коэффициент отражения, определив показатель преломления в разных симметричных зонах и усреднив эти значения, можно устранить влияние энергетического потенциала поверхности подложки.

На рис. 3 изображены зависимости показателя преломления смеси от концентрации одного из испаряемых веществ двух пар пленкообразующих оксидов: титана + кремния и гафния + кремния. Как видно из этого рисунка, зависимость показателя преломления пары веществ $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ от концентрации оксида кремния имеет довольно сложный вид. Ошибка в вычислениях показателя преломления в интервале концентраций, где n – линейная функция, составляет $\pm 0,05$. В интервале концентраций оксида титана от 10 до 80% значение форм-фактора, как видно из этого рисунка,

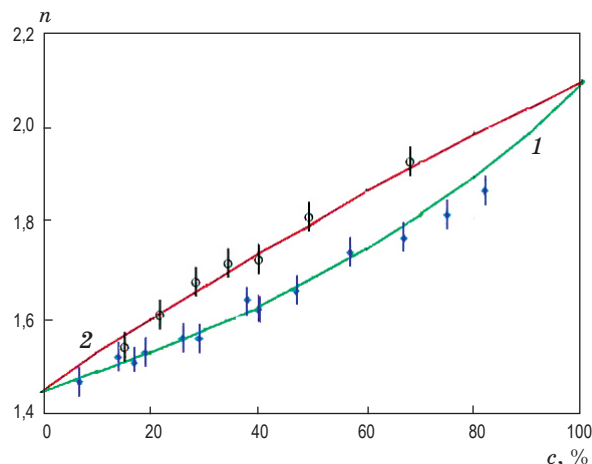


Рис. 3. Зависимости показателя преломления от концентрации одного из испаряемых веществ пар оксидов титана и кремния (1) и гафния и кремния (2). Экспериментально определенные значения с учетом погрешности распределения показателя преломления слоев из оксидов титана и кремния – форм-фактор $L = 1$ (1), оксидов гафния и кремния – форм-фактор $L = 0$ (2).

равно единице, а показатель преломления слоя из оксида титана в зоне, свободной от присутствия оксида кремния, составляет 2,1. Значения показателей преломления пленок из оксида кремния и оксида титана в зонах, где они являются единственными компонентами, составляет 1,45 и 2,1 соответственно.

На этом же рисунке изображены зависимости показателей преломления пленок, образованных парой оксидов гафния и кремния. В отличие от зависимости, соответствующей паре оксидов титана и кремния, эта зависимость соответствует форм-фактору $L = 0$ и изображается плавной линией. Показатель преломления слоя из оксида гафния в зоне, свободной от оксида кремния, равен 2,1. Измерения показателя преломления пленок из пар оксидов проводились на длине волны, соответствующей излучению гелий-неонового лазера.

* * * * *

В результате проделанной работы показано, что при совместном испарении двух диэлектриков через диафрагму, расположенную между испарителями и подложкой, возможно получение слоев, у которых толщина и показатель преломления слоя меняются по радиальной координате. В разных зонах поверхности подложки, на которой формировался слой, полученный при совместном испарении двух диэлектриков ($\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ и $\text{HfO}_2 + \text{SiO}_2$), экспериментально измерен показатель преломления пленки в различных точках подложки, в которых известна концентрация одного из пленкообразующих веществ. По этим данным получена зависимость показателя преломления пленки от концентрации одного из пленкообразующих компонентов. Показано, что форм-факторы этих пар различны: у “оксид титана + оксид кремния” он равен единице, а у “оксид гафния + оксид кремния” – нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Формирование покрытий при одновременном испарении из двух испарителей // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 8. С. 73–80.
2. 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.
3. Якобсон Р. Физика тонких пленок / Под ред. Хасса Г. М.: Мир, 1978. Т. 8. 221 с.