

К ТЕОРИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ ЗЕРКАЛ

А. С. Никитин, Е. А. Несмелов, Ю. Н. Марков и И. С. Гайнутдинов

Теоретически показана возможность создания высокоотражающих диэлектрических зеркал, удовлетворяющих условию изотропии, на двух- и трехкомпонентных системах с показателями преломления слоев по величинам, принципиально реализуемым, и числом слоев, имеющем место в обычном технологическом изготовлении покрытий. Исследовано влияние выбора подложки двухкомпонентных четно- и нечетно-слоистых систем на формирование изотропного зеркала.

В ряде задач для наклонного падения излучения на диэлектрическое многослойное покрытие возникает проблема устранения наблюдающейся при этом анизотропии коэффициентов отражения и сдвигов фаз для s - и p -компонент поляризации (индексом s будем обозначать перпендикулярную поляризацию, индексом p — параллельную). В случае использования толщин слоев равными четверти рабочей длины волны λ_0 для заданного угла θ падения излучения достигается равенство сдвигов фаз для s - и p -поляризаций отраженного излучения на длине волны λ_0 , а выбором значений показателей преломления слоев системы можно добиться, чтобы величины коэффициентов отражения R_s и R_p удовлетворяли определенным заданным условиям [1]. На этом пути были синтезированы поляризаторы [2] и неполяризующие светоделители [3-5]. Однако возможности таких систем в отношении обеспечения равенства R_s и R_p , либо заданной их разности, с одновременным сохранением высокой величины коэффициента отражения в настоящее время недостаточно изучены, что осложняет вопросы практического осуществления изотропных зеркал. Можно отметить лишь работу [6], где рассматривались трехкомпонентные зеркальные системы и было показано, что для получения высоких отражений при условии $R_s = R_p$ требуется очень большое число слоев.

В настоящей работе двух- и трехкомпонентные зеркальные системы исследуются с единой точки зрения. Результаты позволяют определять предельные соотношения между значениями параметров конструкции зеркала и его характеристиками. В частности, исследовано влияние выбора подложки двухкомпонентных четно- и нечетно-слоистых систем на формирование изотропного зеркала, что в предшествующих работах по данной проблеме не находило отражения. Показана возможность удовлетворения условия $R_s = R_p$ с одновременным сохранением достаточно высокого отражения на двухкомпонентной системе с показателями преломления слоев по величинам принципиально реализуемым и числом слоев, имеющем место в обычном технологическом изготовлении покрытий.

Рассмотрим следующие двухкомпонентные системы:

$$\left. \begin{array}{l} 1) D(BA)^m S, \\ 2) D(AB)^m AS, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где D — обозначение подложки с показателем преломления n , S — обозначение исходной среды с показателем преломления n_0 , A и B — обозначения слоев системы с показателями преломления n_A и n_B соответственно. Параметр кратности m , характеризующий общее число слоев N системы, определяется из условия $N = 2m$ для системы 1) и из условия $N = 2m + 1$ для системы 2). Если показатели преломления ограничивающих сред n и n_0 , угол падения θ и число N слоев считать заданными, то при заданных значениях коэффициентов отражения R_s и R_p условия на показатели преломления слоев можно записать в виде [1]

$$n_A = \varepsilon \left[\frac{1 - P_{1,2} Q_{1,2}^2}{(1 - P_{1,2}) Q_{1,2}^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$n_B = n_A Q_{1,2}, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P_{1,2} &= \exp \left[\frac{1}{m} (L_p - L_s) \right] Y_{1,2}^{1/m}, \\ Q_{1,2} &= \exp \left[-\frac{1}{2m} (L_p + L_s) \right] X_{1,2}^{1/m}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

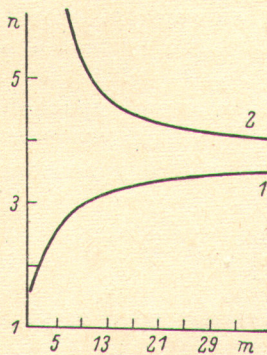


Рис. 1. Зависимость показателей преломления n_A (1) и n_B (2) от параметра m для системы $D(AB)^m AS$.

$$R_s = R_p = 99.9\%, \quad \theta = 30^\circ, \quad n = 1.45, \quad n_0 = 1.$$

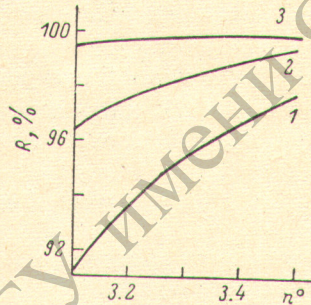


Рис. 2. Графическое решение уравнения (8) для углов 30 (1), 45 (2) и 60° (3).

$$L_p = \pm \text{Arth } R_p^{1/2}, \quad L_s = \pm \text{Arth } R_s^{1/2}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \left(\frac{n}{n_0} \right)^{1/2}, \quad Y_1 = \left(\frac{a}{a_0} \right)^{1/2}, \\ X_2 &= \left(\frac{n_A^2}{nn_0} \right)^{1/2}, \quad Y_2 = \left(\frac{a_A^2}{aa_0} \right)^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$a_A = 1^2 - \varepsilon/n_A^2, \quad a = 1 - \varepsilon^2/n^2, \quad a_0 = \cos^2 \theta, \quad \varepsilon = n_0 \sin \theta.$$

Индексы 1, 2 при величинах P, Q, X, Y в выражениях (2) — (6) относятся к системам 1) и 2) соответственно.

Анализ выражений (2), (3) показывает (рис. 1), что с ростом величины параметра кратности m значения n_A и n_B стремятся к общему пределу n_∞ , причем n_A увеличивается, а n_B уменьшается. При превышении значений n_∞ некоторого уровня, характер этой закономерности становится ограничивающим фактором использования рассматриваемых систем в качестве изотропных высокоотражающих зеркал. Действительно, для заданных высоких R_s, R_p (рис. 1) предпочтительный выбор показателей преломления системы соответствует высокой величине параметра кратности m и, наоборот, приемлемому числу слоев в системе ($m \leq 12$) соответствуют принципиально не реализуемые величины показателей преломления ($n_B > 4.5$). В связи с этим целесообразно исследование характеристики n_∞ как функ-

ции переменных R_s, R_p, θ, n_0, n с целью нахождения оптимального ее значения. Уменьшение величины n_∞ приводит к смещению кривых зависимостей $n(m)$ и $n_B(m)$ в область более низких значений и, следовательно, к некоторому ослаблению критичности условий, связывающих предельные значения числа слоев и величин показателей преломления покрытия.

Вычисляя, согласно (2), (3), предел n_A, n_B при $m \rightarrow \infty$, получаем для случая сочетания знаков (— —) в (5) следующее выражение:

$$n_\infty = \varepsilon \left[1 + \frac{\ln(\delta X_{1,2\infty}^2)}{\ln(\gamma Y_{1,2\infty})} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где

$$\delta = (\alpha\beta)^{1/2}, \quad \gamma = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{1/2},$$

$$\alpha = \frac{1 + R_p^{1/2}}{1 - R_p^{1/2}}, \quad \beta = \frac{1 + R_s^{1/2}}{1 - R_s^{1/2}}.$$

Величины $X_{2\infty}, Y_{2\infty}$ получаются из X_2, Y_2 заменой $n_A \rightarrow n_\infty$.

Из выражения (7) следует, что с увеличением угла падения θ излучения на покрытие величина характеристики n_∞ снижается. Этот факт может быть учтен в случае, если допускается известный произвол в выборе угла падения. При заданных значениях θ, R_s, R_p, n_0 исследуем характеристику n_∞ на экстремум как функцию показателя преломления подложки [7]. В случае полной изотропии $R_e = R_p = R$ из условия $dn_\infty^1/dn = 0$ получаем, согласно (7), для системы 1) следующее уравнение [верхний индекс 1) при n_∞ относится к системе 1)]:

$$n = \varepsilon \left[1 + \frac{\ln(\delta X_1^2)}{\ln Y_1} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Предположим, что значение $n = n^0$ является решением уравнения (8). Так как выполняется условие

$$\frac{d^2 n_\infty^1}{dn^2} \Big|_{n^0} = \frac{\varepsilon^2}{n^0(n^0{}^2 - \varepsilon^2)} \frac{1}{\ln Y_1} > 0, \quad (9)$$

то n^0 соответствует значению показателя преломления подложки, при котором для заданных θ, R, n_0 величина n_∞^1 принимает минимальное значение, причем, как видно из выражений (7) и (8), $n_\infty^1 \max = n^0$.

Для системы 2) необходимо исследовать на экстремум неявную функцию $F(n, n_\infty) = 0$, где для случая полной изотропии, согласно (7), имеем

$$F(n, n_\infty) = \varepsilon \left[1 + \frac{\ln(\delta X_{2\infty}^2)}{\ln Y_{2\infty}} \right]^{1/2} - n_\infty. \quad (10)$$

Анализ выражения (10) показывает, что функция $n_\infty(n)$ в случае системы 2) имеет максимум в точке $n = n^0$, определяемой решением уравнения (8), причем выполняется $n_\infty^2 \max = n^0$. Таким образом, справедливо следующее равенство:

$$n_\infty^1 \min = n_\infty^2 \max = n^0. \quad (11)$$

Из равенства (11) следует, что с целью получения изотропных зеркал с заданным отражением R при фиксированном угле θ падения излучения на системы 1) и 2) необходимо делать такой выбор материалов подложки из имеющихся в распоряжении, при котором разность $|n - n^0|$ была бы наименьшей для системы 1) и наибольшей для системы 2). При таком выборе подложки величина n_∞ будет уменьшаться и выбор пары n_A, n_B , определяемый согласно (2), (3), будет наиболее предпочтительным в смысле практического осуществления покрытия на возможно меньшем числе слоев. Приведем численные примеры. На рис. 2 показана зависимость $R(n^0)$, полученная из уравнения (8) для нескольких углов падения. Из этого рисунка видно, что для получения на системе 1) отражений $R =$

=99.76% при угле $\theta=60^\circ$, $n_0=1$ необходим выбор подложки с показателем преломления $n=3.25$. Задавая $n=3.25$, находим, согласно (2), (3), параметры покрытия: $n_A=2.67$, $n_B=4.1$, $m=10$. Аналогично для получения отражения $R=98.97\%$ при угле $\theta=45^\circ$, $n_0=1$ выбираем $n=3.4$ и получаем $n_A=2.87$, $n_B=4.12$, $m=10$. Используя систему 2), можно получить более высокие отражения. Некоторые примеры расчета системы 2) при выборе $n=1.45$, $n_0=1$ приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

θ , град.	M	n_A	n_B	R , %
30 {	10	2.8	4.1	99.975
	12	2.92	4.1	99.32
45 {	10	2.695	4.1	99.54
	12	2.82	4.1	99.726
60 {	10	2.53	4.1	99.886
	12	2.656	4.1	99.94

В работе [6] были подробно рассмотрены два типа трехкомпонентных четвертьволновых под углом систем

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } D(CBCA)^m S, \\ \text{II. } D(BCAC)^m S, \end{array} \right\} \quad (12)$$

где C — обозначение слоя с показателем преломления n_C . Для заданных n_A и n_B из условия $R_s=R_p$ определялся показатель преломления n_C . В качестве n_A и n_B выбирались показатели преломления веществ, нашедших широкое применение в изготовлении диэлектрических зеркал ($n_A=2.2$, $n_B=1.38$). Однако при таком выборе показателей преломления удовлетворить требованию высокого отражения ($R > 99\%$) оказалось возможным лишь на очень большом числе слоев ($m > 22$).

Целесообразно исследовать трехкомпонентные системы методом, примененным выше в исследовании двухкомпонентных покрытий, т. е. при заданных значениях R_s , R_p , θ , m , n , n_0 и значении одного из показателей преломления, например n_A , определить из системы двух уравнений значения n_B и n_C . Для покрытия типа I при заданном n_A получаем решение в виде

$$n_B = \frac{\varepsilon^2 \pm \beta'_{1,2} \varepsilon [\varepsilon^2 - \alpha'_{1,2} (1 - \beta'^2_{1,2})]^{1/2}}{\alpha'_{1,2} (1 - \beta'^2_{1,2})}, \quad (13)$$

$$n_C = (\alpha'_{1,2} n_B)^{1/2}, \quad (14)$$

где

$$\alpha'_{1,2} = n_A Q_{1,2},$$

$$\beta'_{1,2} = (a_A P_{1,2})^{1/2}.$$

Индексы 1, 2 при α' и β' относятся к системам I и нечетнослойной системе $D(ACBC)^m AS$ соответственно.

Для того чтобы значения показателей преломления n_B и n_C получались действительными, необходимо, согласно (13), (14), выполнение следующих неравенств:

$$n_A^2 \geq \varepsilon^2 \frac{1 - P_{1,2} Q_{1,2}^2}{(1 - P_{1,2}) Q_{1,2}^2}, \quad \text{если } P_{1,2} > 1, \quad (15)$$

$$n_A^2 \leq \varepsilon^2 \frac{1 - P_{1,2} Q_{1,2}^2}{(1 - P_{1,2}) Q_{1,2}^2}, \quad \text{если } P_{1,2} < 1. \quad (16)$$

Случай равенства в (15), (16) соответствует переходу от трехкомпонентной системы к двухкомпонентной, так как выражения (15), (16) при этом переходят в (2) и выполняется $n_B = n_C = n_A Q_{1,2}$.

Таблица 2

m	n_A	n_B	n_C
5	3.6	1.34	1.84
6	1.4	3.44	1.89
7	3	1.348	1.77
18	2.2	1.38	1.658

Таблица 3

m	n_A	n_B	n_C
4	1.38	4.05	1.6785
5	1.38	3.54	1.68
18	1.38	2.2	1.6146

Используя выражения (13), (14), можно получить решения, рассмотренные в [6], а также другие решения, соответствующие значительно меньшим значениям параметра кратности m . Например, задавая $R_s = R_p = 92.7\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем для системы I следующие результаты (табл. 2).

Таблица 4

m	n_A	n_B
6	1.33	2.56
7	1.37	2.416
8	1.406	2.315

Случай $m=18$ в табл. 2 соответствует примеру, рассмотренному в [6].

Аналогичное рассмотрение легко проводится для системы II. Не приводя аналитических выражений, рассмотрим численные примеры. Задавая $R_s = R_p = 97.54\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем следующие решения (табл. 3).

Аналогичное рассмотрение легко проводится для системы II. Не приводя аналитических выражений, рассмотрим численные примеры. Задавая $R_s = R_p = 97.54\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем следующие решения (табл. 3).

Аналогичное рассмотрение легко проводится для системы II. Не приводя аналитических выражений, рассмотрим численные примеры. Задавая $R_s = R_p = 97.54\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем следующие решения (табл. 3).

Аналогичное рассмотрение легко проводится для системы II. Не приводя аналитических выражений, рассмотрим численные примеры. Задавая $R_s = R_p = 97.54\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем следующие решения (табл. 3).

Аналогичное рассмотрение легко проводится для системы II. Не приводя аналитических выражений, рассмотрим численные примеры. Задавая $R_s = R_p = 97.54\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$, получаем следующие решения (табл. 3).

В случае $m=18$ приходим к примеру, рассмотренному в [6]. При $R_s = R_p = 99.9\%$, $\theta = 45^\circ$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$ получаем для системы II: $n_A = 1.4$, $n_B = 3.516$, $n_C = 1.744$, $m = 9$.

Выше рассматривался случай полной изотропии $R_s = R_p$. Однако соотношения (2)–(3), (13)–(14) позволяют получать решения для любых заданных значений коэффициентов отражения R_s и R_p . На рис. 3 показана зависимость R_p (n_∞), построенная, согласно (7), для двухкомпонентной

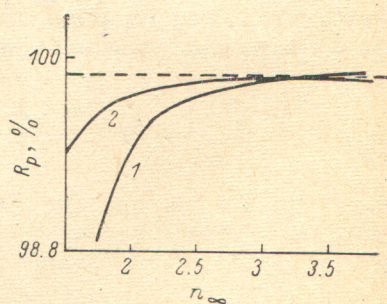


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения R_p от величины n_∞ для системы $D(AB)^m AS$. Углы: 1 — 45° , 2 — 30° ; $R_s = 99.9\%$, $n = 1.45$, $n_0 = 1$.

системы 2) при заданном $R_s = 99.9\%$. Например, если $R_p = 99.65\%$, $\theta = 30^\circ$, находим $n_\infty = 1.75$. Значения показателей преломления n_A и n_B , полученные для этого случая, согласно (2), (3), приведены в табл. 4.

В заключение отметим, что предложенное выше теоретическое исследование показывает принципиальную возможность практического получения высокоотражающих изотропных диэлектрических зеркал в предположении наличия пленкообразующих веществ, величины показателей преломления которых заключены в интервал (2.4, 4.2). Таким образом, результаты работы могут быть использованы в получении покрытий, предназначенных для работы в ближней и средней инфракрасной областях спектра излучения [8].

Литература

- [1] Z. K n i t t l. Optics of Thin Films. 359. New York, 1976.
- [2] П. Г. К а р д. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. «Валгус», Таллин, 1971.
- [3] P. V a u m e i s t e r. Optica Acta, 8, 105, 1961.
- [4] A. T h e l e n. Appl. Optics, 15, № 12, 1976.
- [5] H. F. M a h l e i n. Optica Acta, 12, № 7, 1974.
- [6] И. М. М и н к о в. Опт. и спектр., 33, 332, 1972.
- [7] И. Н. Б р о н ш т е й н, К. А. С е м е н д я е в. Справочник по математике. ГИТТЛ, М., 1954.
- [8] Н. А. Б о р и с е в и ч, В. Г. В е р е щ а г и н, М. А. В а л и д о в. Инфракрасные фильтры. «Наука и техника», Минск, 1971.

Поступило в Редакцию 7 декабря 1978 г.
В окончательной редакции 6 августа 1979 г.



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ