

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ С ЗАДАНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСЛОЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

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

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: eputilin@yandex.ru

Исследована возможность создания четвертьволновых пленок с заданным показателем преломления с использованием нанослоев. Такие системы позволяют расширить класс используемых пленкообразующих материалов. Рассмотрена возможность создания просветляющих покрытий, один или несколько слоев которых образованы набором симметричных систем нанослоев. Симметричные системы нанослоев состоят из двух диэлектриков с различными показателями преломления. Достоинство таких покрытий заключается в том, что на их основе могут быть изготовлены четвертьволновые просветляющие покрытия, имеющие широкую область минимального отражения, ранее не реализовавшиеся из-за отсутствия пленкообразующих материалов с необходимыми показателями преломления.

Ключевые слова: нанослои, просветляющие покрытия, оптическая толщина, показатель преломления.

Коды OCIS: 310.0310

Поступила в редакцию 12.04.2011

Для создания многослойных диэлектрических систем с заданными параметрами необходимо иметь набор пленкообразующих материалов с непрерывно меняющимся в широком диапазоне показателем преломления. В настоящее время пленкообразующие материалы, используемые для создания многослойных диэлектрических систем, имеют дискретный набор показателей преломления [1]. Для устранения этого недостатка можно представить слой в виде набора тонких (толщиной много меньшей длины волны) слоев с различающимися показателями преломления. В простейшем случае для этого необходимо использовать понятие “эффективного показателя преломления” для симметричной системы слоев [2], образо-

ванной чередующимися слоями диэлектриков с отличающимися показателями преломления и оптическими толщинами. Симметричная система слоев, как правило, состоит из трех слоев, у которых оптические толщины и показатели преломления крайних слоев одинаковы и равны $n_1 d_1$ и n_1 , а оптическая толщина и показатель преломления среднего слоя, соответственно $n_2 d_2$ и n_2 . Фазовые толщины слоев: $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$ и $\varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 / \lambda$, кроме того, $\varphi_2 = \alpha \varphi_1$, где α – любое число. Для определения эффективного показателя преломления необходимо определить матрицу интерференции этой системы слоев, выраженную через матрицы интерференции отдельных слоев

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 & \frac{i \sin \varphi_1}{n_1} \\ i n_1 \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \varphi_2 & \frac{i \sin \varphi_2}{n_2} \\ i n_2 \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 & \frac{i \sin \varphi_1}{n_1} \\ i n_1 \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Элементы матрицы интерференции симметричной системы слоев соответственно равны

$$\begin{cases} m_{11} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - 0,5(n_1 n_2^{-1} + n_2 n_1^{-1}) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2, \\ m_{12} = \frac{1}{n_1} \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_2^{-1} \cos^2 \varphi_1 - n_2 n_1^{-2} \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2, \\ m_{21} = n_1 \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_2 \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 n_2^{-1} \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2, \\ m_{22} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - 0,5(n_1 n_2^{-1} + n_1^{-1} n_2) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (2)$$

Как видно из (2), $m_{11} = m_{22}$, и тогда матрицу интерференции можно записать в виде

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & iN^{-1} \sin \theta \\ iN \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $\cos \theta = m_{11} = m_{22}$,

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta &= m_{12} m_{21}, \\ N^2 &= m_{21} m_{12}^{-1}. \end{aligned}$$

$$N^2 = \frac{m_{21}}{m_{12}} = n_1 \frac{n_1 n_2 \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_2^2 \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2}{n_1 n_2 \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_1^2 \cos^2 \varphi_1 - n_2^2 \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2}.$$

$$\begin{aligned} \theta &= \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - \\ &- 0,5(n_1 n_2^{-1} + n_2 n_1^{-1}) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2. \end{aligned}$$

Эта формальная запись удобна при рассмотрении многослойных систем. При многократном повторении для систем, содержащих l симметричных слоев, матрица интерференции будет иметь вид

$$M = \begin{vmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{vmatrix}^l = \begin{vmatrix} \cos l\theta & iN^{-1} \sin l\theta \\ iN \sin l\theta & \cos l\theta \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Эффективный показатель преломления многократно повторенной симметричной системы слоев равен эффективному показателю прелом-

ления симметричной системы слоев, а ее фазовая толщина $l\theta$.

В предположении, что толщина слоя, входящего в симметричную систему слоев много меньше $0,25\lambda_0$, где λ_0 – длина волны, на которой четвертьволновый слой имеет особенности (максимум или минимум коэффициента отражения), т. е. $\sin \varphi_1 \approx \varphi_1 \ll 1$, $\sin \varphi_2 \approx \varphi_2 \ll 1$ после представления его в виде ряда по степеням $2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1}$ эффективный показатель преломления может быть представлен в виде

$$N^2 = n_1 n_2 \frac{\alpha n_2 + 2n_1}{\alpha n_1 + 2n_2} \times \left[1 - \alpha^2 \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \right)^2 \frac{(\alpha n_1 n_2 + 2n_1^2 + 2n_2^2)(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)}{n_1 n_2 (\alpha n_1 + 2n_2)(\alpha n_2 + 2n_1)} \right]. \quad (5)$$

В этом выражении членами с более высокими степенями по величине $2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1}$ мы пренебрегаем. Если пренебречь так же членами второго порядка по величине $2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1}$, то из (5) можно определить величину α

$$\alpha = 2 \frac{n_2}{n_1} \frac{n_1^2 - N_1^2}{N_1^2 - n_2^2}. \quad (6)$$

Эффективная фазовая толщина симметричной системы слоев в этих же предположениях будет определяться зависимостью

$$\rho = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \sqrt{2 \left[2 + 0,5\alpha^2 + \alpha \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1 n_2} \right) \right]}. \quad (7)$$

Если, как мы уже упоминали, эта симметричная система слоев повторяется l раз, то фазовая толщина ее будет определяться как

$$\Gamma = l\rho. \quad (8)$$

Для создания четвертьволнового слоя будем использовать многократно повторяющуюся систему симметричных слоев.

Из выражения (5) видно, что эффективный показатель преломления является действительной величиной, обладающей слабой дисперсией, причем дисперсия показателя преломления имеет квадратичный характер. Кроме того, знак дисперсии определяется, как это видно из вышеприведенного соотношения, различием в показателях преломления n_1 и n_2 . На рис. 1 (фрагмент “а”) приведены зависимости эффективного показателя преломления симметричной системы слоев для сред, сформированных из материалов с показателями преломления n_1 и n_2 , равными соответственно 1,45 и 2,0 (кривая 1) и наоборот 2,0 и 1,45 (кривая 2). На фрагменте “б” – аналогичные зависимости в случае, если $n_1 = 1,35$ и $n_2 = 4,0$ (кривая 1) и наоборот 4,0 и 1,35 (кривая 2).

Как видно из этого рисунка, использование слоев нанометровой оптической толщины позволяет получать четвертьволновые слои с любым, лежащим в интервале между n_1 и n_2 , показателем преломления. Кроме того, в зависимости от разности значений показателей преломления материалов, формирующих симметричную систему слоев, дисперсия эффективного показателя преломления может иметь разный знак.

Чтобы оценить возможность создания слоев с заданным показателем преломления, необходимо знать, какое количество симметричных слоев требуется для его получения. Для этого необходимо воспользоваться выражениями (7) и (8). Пусть, величина $\Gamma = \pi/2$, т. е. мы рассматриваем четвертьволновый слой. Тогда

использованное нами приближение будет выполняться при значении величины l порядка 20. Это позволит нам оценить толщины слоев, образующих симметричную систему, в разных диапазонах спектра

$$\frac{n_1 d_1}{\lambda_0} = \left\{ 4l \sqrt{2 \left[2 + 0,5\alpha^2 + \alpha(n_1 n_2)^{-1} (n_1^2 + n_2^2) \right]} \right\}^{-1}. \quad (9)$$

В представленной таблице приведены значения оптических толщин крайних слоев симметричной системы для различных значений λ_0 , величина оптической толщины среднего слоя по определению равна $\alpha(n_1 d_1)$.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что для получения слоев с заданным

Оптическая толщина крайних слоев симметричной системы, образованной слоями с показателями преломления: 2,40 и 1,45 для видимой области ($\lambda_0 = 500$ нм) и 4,0 и 1,35 для ИК области ($\lambda_0 = 5000$ нм) в нанометрах при разных l и α

$\alpha \backslash \lambda_0$	1	5	10	20
$l = 20$				
500	2,0	0,9	0,5	0,3
5000	18	8	5	3
$l = 10$				
500	4	1,7	1	0,6
5000	37	16	10	5
$l = 5$				
500	8,1	3,5	2,0	1,1
5000	73	32	19	11

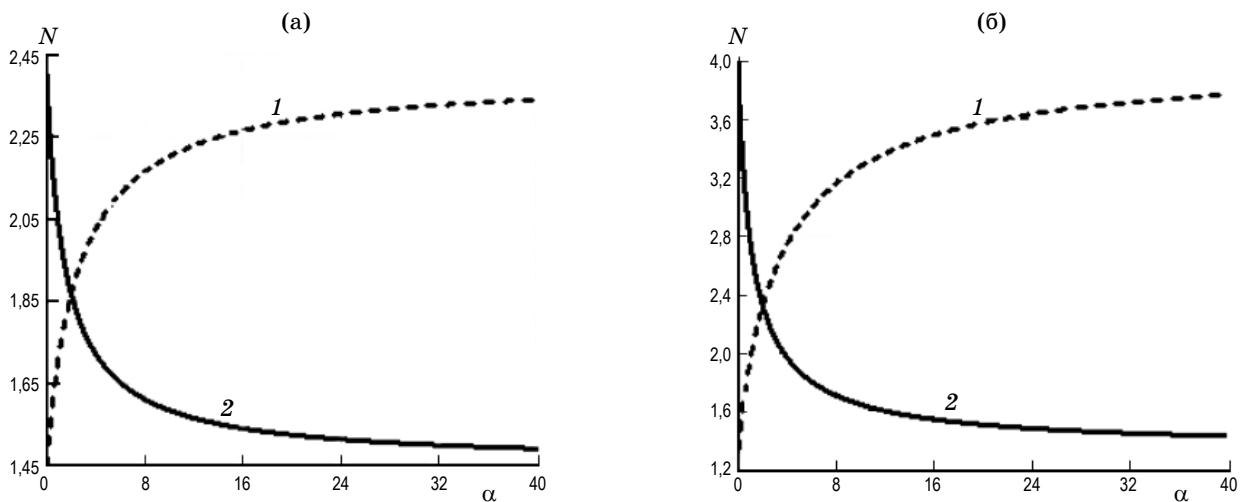


Рис. 1. а – зависимость эффективного показателя преломления N от числа симметричных систем нанослоев α . 1 – $n_1 < n_2$ для $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,40$, 2 – $n_1 > n_2$, для $n_1 = 2,40$, $n_2 = 1,45$, б – зависимость N от α , 1 – $n_1 < n_2$ для $n_1 = 1,35$, $n_2 = 4,00$, 2 – $n_1 > n_2$ для $n_1 = 4,00$, $n_2 = 1,35$.

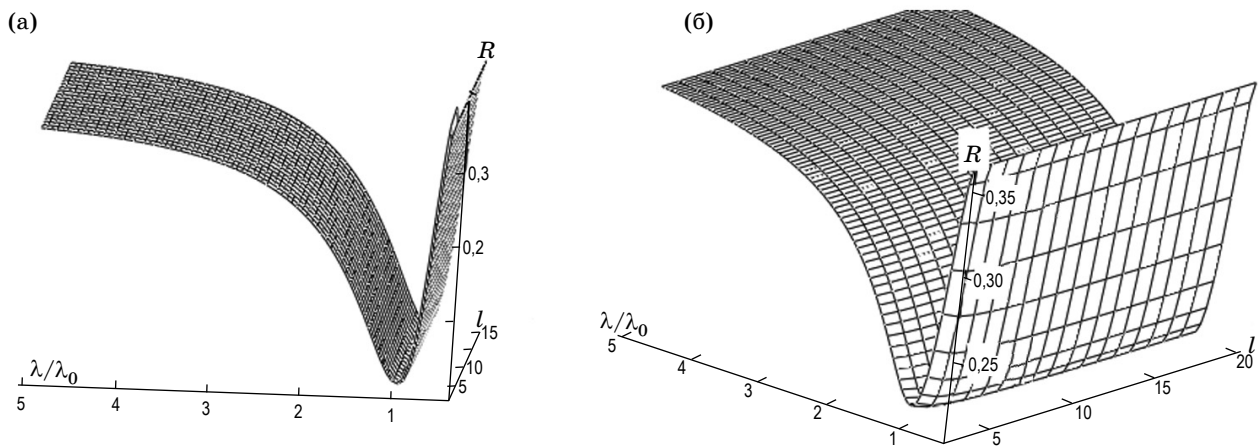


Рис. 2. Спектральные характеристики четвертьволновых покрытий, сформированных системами симметричных нанослоев при фиксированном значении отношения толщин нанослоев, входящих в систему, в зависимости от числа подсистем l : а – отношение толщин слоев $\alpha = 0,2$, б – $\alpha = 5,0$.

показателем преломления, лежащем в диапазонах от 2,40 до 1,45 и от 4,0 до 1,35, необходимо, чтобы оптические толщины слоев, входящих в симметричную систему слоев, отличались не более, чем в 20 раз. Для этого элементарная толщина слоя симметричной системы слоев должна иметь значения 0,3 нм для $\lambda_0 = 500$ нм и 2 нм для $\lambda_0 = 5000$ нм. Осаждение слоев с толщинами менее 1 нм представляет сложности при экспериментальной реализации, что сужает диапазон изменения показателя преломления.

Для проверки полученных результатов были проведены компьютерные расчеты спектральных характеристик четвертьволновых диэлектрических покрытий в области главного экстремума, т. е. вблизи длин волн, соответствующих λ_0 . Рассмотренные покрытия образованы слоями с показателями преломления $n_1 = 4,0$, $n_2 = 1,35$ на подложке с показателем преломления $n_m = 4,0$ для падения излучения по нормали из среды с показателем преломления $n_0 = 1$. Энергетический коэффициент отражения рассчитывался по известным формулам [3]

$$R = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2}.$$

На рис. 2 приведены зависимости спектральных характеристик многослойных систем при фиксированном значении отношения толщин

нанослоев, входящих в систему, в зависимости от числа подсистем l .

Изображенные на рис. 2 зависимости демонстрируют постоянство эффективного показателя преломления, а в нашем случае и действительного показателя преломления, определяющего энергетический коэффициент отражения в минимуме. Энергетический коэффициент отражения в минимуме, характеризующий многослойную систему, сохраняется, начиная с $l > 5$, что позволяет расширить достигаемый с помощью систем нанослоев интервал изменения показателей преломления формируемых четвертьволновых покрытий. Коэффициент отражения в минимуме, как это следует из вышесказанного, определяется эффективным показателем преломления симметричной ячейки слоев.

На рис. 3 представлена спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения при фиксированном числе подсистем $l = 10$ в зависимости от отношения толщин слоев α .

Как видно из рис. 3, в зависимости от отношения толщин слоев, входящих в подсистему, коэффициент отражения в минимуме изменяется в интервале от 0 до 40%, что соответствует изменению эффективного показателя преломления от 2 до 4. Аналогичные результаты получены для материалов, прозрачных в видимом диапазоне спектра для $n_1 = 1,45$ и $n_2 = 2,4$.

Для иллюстрации приведенных выше результатов необходимо рассмотреть возмож-

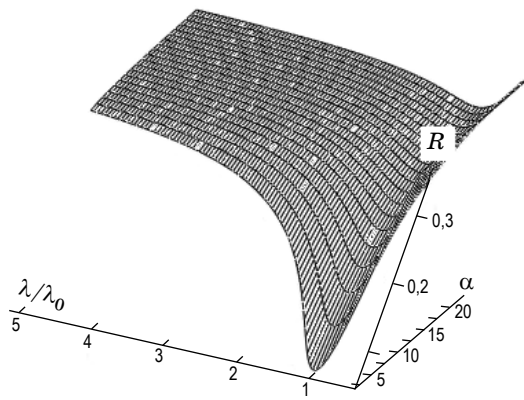


Рис. 3. Спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения четвертьволнового покрытия при фиксированном числе подсистем $l = 10$ в зависимости от отношения толщин слоев α при $n_1 = 4,0$ и $n_2 = 1,35$.

ность формирования просветляющих покрытий, предназначенных для работы в широкой области спектра. Постоянно возрастающие требования к этому виду покрытий связаны с расширением спектрального рабочего диапазона оптических приборов, уменьшением остаточного отражения, когда часто необходимо создавать конструкции покрытий, обеспечивающие коэффициент отражения, значение ко-

торого близко к нулю. Создание просветляющих покрытий с необходимыми свойствами усложняется из-за отсутствия материалов с заданными показателями преломления. Кроме того, представляет интерес возможность создания просветляющих покрытий, образованных чередующимися слоями, состоящими из двух пленкообразующих материалов.

Как известно [4], для обеспечения условия просветления при использовании четвертьволновых покрытий, необходимо выполнение строгого соотношения между показателями преломления слоя (слоев) и показателем преломления подложки, т. е. материала, на котором находится покрытие. Для однослойного покрытия $n_1 = \sqrt{n_0 n_m}$, где n_1, n_0, n_m – показатели преломления слоя, воздуха и подложки, соответственно. Для трехслойной системы, образованной слоями, толщины которых одинаковы и равны $\lambda_0/4$, соотношение между показателями преломления, формирующими это покрытие, выглядит следующим образом: $n_0 n_m n_2^2 = (n_1 n_3)$, n_1, n_2, n_3 – показатели преломления слоев, входящих в состав данного покрытия. При дополнительном условии $n_2^2 = n_0 n_m$ и $n_1 n_3 = n_0 n_m$ такое покрытие имеет три минимума отражения, расположенные в длинах волн $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$. Конкретные значения λ_1 и λ_2 определяются величинами n_1 и n_3 или только n_1 и имеют следующие значения

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{2} \lambda_0 \left[\arctg \left(\frac{(n_0 - n_m) n_0 n_1^2}{2(n_0^2 - n_1^2) n_1 n_0^{0,5} n_m^{0,5} + (n_0^3 n_m - n_1^4)} \right) \right]^{0,5} \quad (10)$$

$$\lambda_2 = \frac{\pi}{2} \lambda_0 \left[\pi - \arctg \left(\frac{(n_0 - n_m) n_0 n_1^2}{2(n_0^2 - n_1^2) n_1 n_0^{0,5} n_m^{0,5} + (n_0^3 n_m - n_1^4)} \right) \right]^{0,5}$$

На рис. 4 представлены спектральные зависимости трехслойной просветляющей системы, иллюстрирующие эволюцию коротковолнового (рис. 4а) и длинноволнового (рис. 4б) минимумов отражения, $\lambda_0 = 3$ мкм. Как видно из этого рисунка, они хорошо отражают поведение этих двух минимумов отражения в шкале длин волн. Кроме того, как видно из этих же рисунков, по мере увеличения показателя преломления первого слоя существенно увеличивается отражение в максимумах и увеличивается

спектральное расстояние между коротковолновым и длинноволновым минимумами отражения. Интегральный коэффициент отражения в широком спектральном интервале при увеличении n_1 существенно увеличивается. Если необходимо обеспечить отражение, близкое к нулевому, при заданных величинах λ_1, λ_0 и λ_2 , то это не имеет значения. Однако выполнение этого условия требует соблюдения определенных значений n_1 и n_2 . При фиксированном наборе показателей преломления пленкообразую-

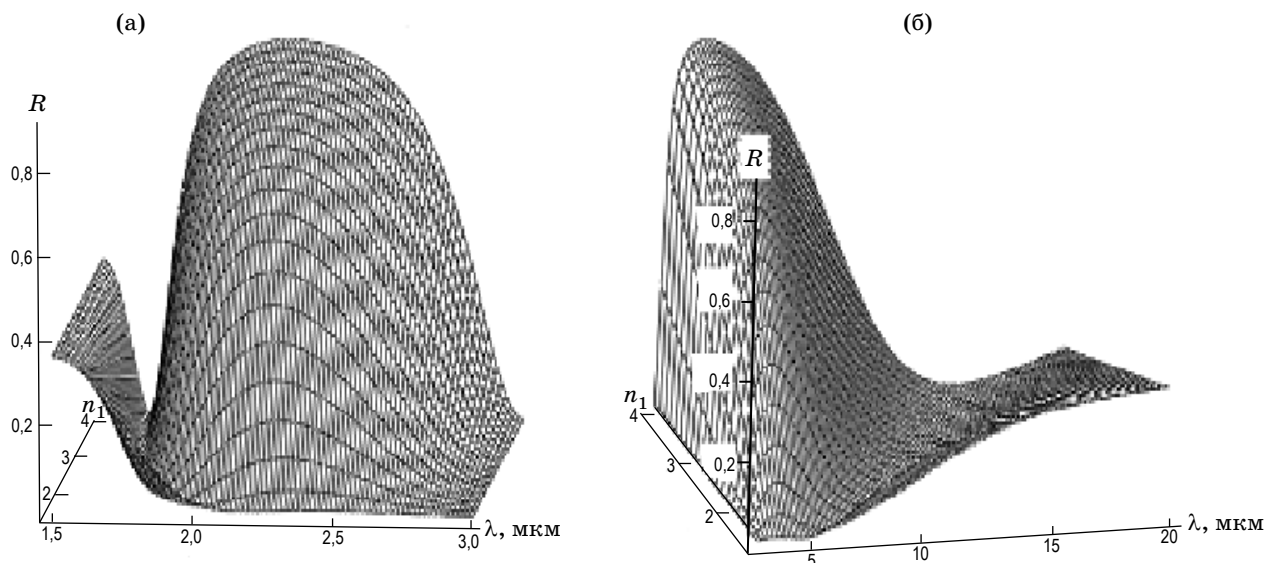


Рис. 4. Спектральные зависимости трехслойной четвертьволновой просветляющей системы на подложке с показателем преломления $n_m = 4,0$. Излучение падает из среды с показателем преломления $n_0 = 1$, показатель преломления второго слоя $n_2 = 2$, $n_3 = n_0 n_m / n_1$, при n_1 лежащем в интервале от 1,35 до 4,0; а – эволюция коротковолнового минимума отражения; б – длинноволнового.

щих материалов ясно, что возможности создания просветляющих систем с интересующими параметрами не могут быть реализованы.

Для строгого выполнения условий, накладываемых на показатели преломления, рассмотрим систему, образованную слоями с показателями преломления $n_1 = 1,35$, $n_2 = 2,0$, $n_3 = 2,96$, которые удовлетворяют приведенным выше условиям: $n_2^2 = n_0 n_m$ и $n_1 n_3 = n_0 n_m$. Материал с показателем преломления $n_3 = 2,96$ отсутствует. Мы предлагаем рассмотреть систему четвертьволновых слоев, в которой один или несколько слоев сформированы из набора тонких симметричных ячеек, оптические параметры которых описаны формулами (5) и (7). Параметры и количество нанометровых слоев, образующих симметричную комбинацию, определялись из соотношений (6)–(9).

При создании двухкомпонентной системы слоев использовались пленкообразующие материалы с показателями преломления $n_1 = 1,35$, $n_2 = 4,0$, прозрачные в инфракрасной области спектра. Для получения просветляющей системы, обладающей свойствами, эквивалентными приведенным на рис. 4 (первый слой с показателем преломления 1,35, второй – 2,0 и третий 2,96), необходимо определить число слоев, входящих в подсистемы, формирующие слои с показателями преломления 2,0 и 2,96. Для

определения числа подсистем необходимо воспользоваться ограничениями, которые определяются экспериментальными возможностями формирования пленок. На начальном этапе по формуле (6) рассчитывалась величина α для заданных значений $N = 2,0, 2,96$ при $l = 10$. Затем по формулам (8), (9) рассчитывалась величина $n_1 d_1(\lambda_0)^{-1}$ для $\Gamma = 0,5\pi$, что соответствует четвертьволновому слою. В нашем случае это симметричные системы слоев с оптическими толщинами 35,7 нм, 38,4 нм, 35,7 нм для $N = 2,0$ и 14,6 нм, 82,7 нм, 14,6 нм соответственно для $N = 2,96$ при $n_1 = 1,35$, $n_2 = 4,0$ и симметричные системы слоев, с оптическими толщинами 19,2 нм, 71,4 нм, 19,2 нм для $N = 2,0$ и 41,3 нм, 153,8 нм, 41,3 нм соответственно для $N = 2,96$ при $n_1 = 4,0$, $n_2 = 1,35$. Анализируя полученный результат с точки зрения его экспериментальной реализации, видно, что для получения четвертьволнового слоя с показателем преломления $N_2 = 2,0$ целесообразно использовать симметричные подсистемы с $n_1 = 1,35$, $n_2 = 4,0$, а для $N_3 = 2,96 - n_1 = 4,0$, $n_2 = 1,35$.

Спектральные кривые покрытий, состоящих из трех слоев ($n_1 = 1,35$, $n_2 = 2,00$, $n_3 = 2,96$), и системы, в которую входят симметричные системы слоев, сформированных из материалов с показателями преломления 1,35 и 4,00, пред-

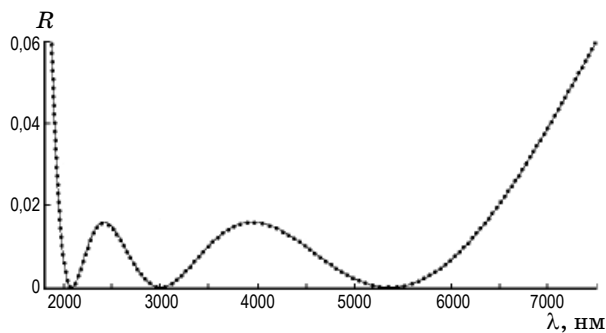


Рис. 5. Спектральные зависимости просветляющих покрытий: сплошная линия – покрытие, образованное четвертьволновыми слоями с показателями преломления $n_1 = 1,35$, $n_2 = 2,0$, $n_3 = 2,96$, • – покрытие, образованное системой нанослоев, сформированных из материалов с показателями преломления $n_1 = 1,35$, $n_2 = 4,0$. Оба покрытия сформированы на подложке с показателем преломления ($n_m = 4,0$), излучение падает из воздуха ($n_0 = 1,0$), $\lambda_0 = 3000$ нм.

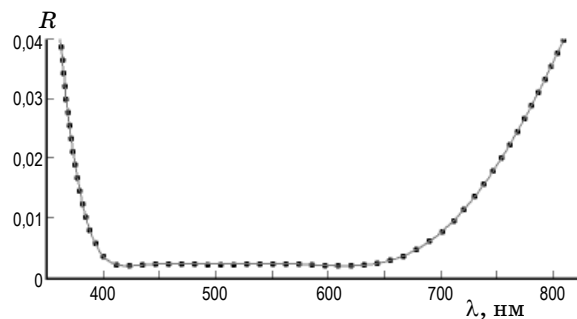


Рис. 6. Спектральные зависимости просветляющих покрытий: сплошная линия – покрытие, образованное четвертьволновыми слоями с показателями преломления $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,20$, $n_3 = 1,70$, • – покрытие, образованное системой нанослоев, сформированных из материалов с показателями преломления $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,40$. Оба покрытия сформированы на подложке с показателем преломления ($n_1 = 1,51$), излучение падает из воздуха ($n_0 = 1,0$), $\lambda_0 = 500$ нм.

ставлены на рис. 5. Такая система обеспечивает снижение коэффициента отражения в широком спектральном диапазоне в инфракрасной области спектра. Одним из ее преимуществ является то, что она позволяет достичь желаемого результата просветления с использованием двух материалов. Для формирования четвертьволновых слоев с показателями преломления 2,00 и 2,96 использованы многократно повторенные симметричные системы слоев, параметры которых приведены выше. Здесь необходимо отметить, что для иллюстрации работоспособности предложенной методики использовано два пленкообразующих материала, хотя материал с показателем преломления 2,0 имеется, а с показателем преломления 2,96 в настоящее время отсутствует [1]. Как видно из сравнения кривых на рис. 5, совпадение спектральных зависимостей просветляющих систем, образованных четвертьволновыми слоями и слоями, содержащими симметричные системы нанометровых слоев, практически идеально.

При создании двухкомпонентной системы слоев, предназначенной для работы в видимой области спектра, использовались пленкообразующие материалы с показателями преломления $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,20$. Для получения просветляющей системы, имеющей широкую область минимального отражения в видимой области спектра, которая имеет структуру $0,25\lambda_0-0,5\lambda_0-0,25\lambda_0$ и показатели преломле-

ния соответствующих слоев 1,45–2,20–1,70 необходимо определить число слоев, входящих в подсистему, формирующую слой с показателем преломления 1,70. Для определения числа подсистем необходимо, так же как и выше, воспользоваться ограничениями, определяемыми экспериментальными возможностями формирования пленок. На начальном этапе по формуле (6) рассчитывалась величина α для $N = 1,70$ при $l = 10$. Затем по формулам (8), (9) рассчитывалась величина $n_1 d_1(\lambda_0)^{-1}$ для $\Gamma = 0,5\pi$, что соответствует четвертьволновому слою. В нашем случае это симметричные системы слоев с оптическими толщинами 3,8 нм, 4,7 нм, 3,8 нм при $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,20$ и 2,3 нм, 7,6 нм, 2,3 нм при $n_1 = 2,20$, $n_2 = 1,45$. Анализируя полученный результат с точки зрения его экспериментальной реализации, видно, что для получения четвертьволнового слоя с показателем преломления $N = 1,70$ целесообразно использовать симметричные подсистемы с $n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,20$.

Спектральные кривые покрытий, состоящих из трех слоев ($n_1 = 1,45$, $n_2 = 2,20$, $n_3 = 1,70$) и системы, в которую входят симметричные системы слоев, сформированных из материалов с показателями преломления 1,45 и 2,20, представлены на рис. 6. Такая система обеспечивает снижение коэффициента отражения в широком спектральном диапазоне в видимой области спектра. Одним из ее преимуществ

является то, что она позволяет достичь желаемого результата просветления с использованием двух материалов, поскольку пленкообразующий материал с показателем преломления 1,70 [1] в настоящее время отсутствует. Как видно из сравнения кривых на рис. 6, совпадение спектральных зависимостей просветляющих систем, образованных четвертьволновыми слоями, и слоями, содержащими симметричную систему нанометровых слоев, практически идеально.

Выводы

Показана возможность создания четвертьволновых пленок с любым, наперед заданным показателем преломления, лежащим в некотором интервале. Такие четвертьволновые пленки образованы набором, состоящим из повторяющихся симметричных нанометровых си-

стем слоев. Нанометровые слои образованы из прозрачных в данном спектральном диапазоне диэлектрических пленок. Интервал, в котором может изменяться величина показателя преломления четвертьволновых пленок, определяется значениями показателей преломления нанометровых слоев.

Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить оптические толщины системы симметричных нанометровых слоев, а также число симметричных систем нанослоев, необходимых для создания четвертьволнового слоя с заданным показателем преломления при использовании двух материалов с различными показателями преломления.

На примере широкополосных просветляющих покрытий, предназначенных для работы как в видимой, так и в инфракрасной областях спектра, продемонстрирована возможность использования таких систем нанометровых слоев.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А.* Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань: ФЭН, 2003. 424 с.
2. *Телен А.* Конструирование многослойных интерференционных светофильтров / *Физика тонких пленок.* Т. 5 / Под ред. Г. Хасса и Р.Э. Туна. М.: Мир, 1972. С. 46–83.
3. *Бернинг П.Х.* Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок. *Физика тонких пленок* / Под ред. Г. Хасса. М.: Мир, 1967. Т. 1. С. 91–151.
4. *Кокс Дж.Т., Хасс Г.* Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра / Под ред. Г. Хасса. М.: Мир, 1967. Т. 2. С. 186–253.