

Г. В. НИКАНДРОВ, Э. С. ПУТИЛИН

ФАЗОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Исследован новый класс многослойных диэлектрических систем, обладающих постоянным коэффициентом отражения при изменяющейся в широких пределах оптической толщине слоев. Показано, что, используя подобные системы, можно формировать волновой фронт в оптической системе для одной или нескольких длин волн.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, асферическая оптика, лазерный резонатор.

При формировании волнового фронта отраженной или прошедшей волны от оптического элемента с помощью интерференционных многослойных покрытий используются зависимости амплитудных коэффициентов отражения r или пропускания t от оптической толщины и показателей преломления слоев, образующих покрытия. Действительно, если представить эти коэффициенты в виде $r = |r|e^{i\rho}$ и $t = |t|e^{i\tau}$, где ρ — разность фаз между отраженной и падающей, τ — разность фаз между прошедшей и падающей волнами, то, изменив оптическую толщину одного или нескольких слоев по поверхности оптического элемента, можно увидеть, что величины ρ , τ , а также $|r|$ и $|t|$ будут изменяться. Это свойство интерференционных покрытий используется при формировании волнового фронта отраженного или прошедшего излучения [1].

При решении различных задач оптики требования к характеру изменения величин $|r|$, $|t|$, ρ и τ , следовательно, и к изменению оптической толщины слоев могут быть различными. При создании асферических поверхностей, компенсации осесимметричных дефектов поверхности подложек или формировании фронта лазерного излучения с использованием многослойных покрытий значения $|r|$ и $|t|$ должны быть постоянными для излучения с одной длиной волны (например — элементы лазерной оптики) или некоторого спектрального интервала, в то время как величины ρ и τ должны изменяться по заданному закону. При формировании волнового фронта лазерного излучения используются системы, у которых все значения $|r|$, ρ , $|t|$, τ различаются для разных точек поверхности оптического элемента — выходного зеркала лазерного резонатора [2, 3].

Фазокомпенсирующие покрытия — это диэлектрические системы слоев, у которых при изменении оптической толщины одного или нескольких слоев коэффициент отражения или пропускания (амплитудный или энергетический) остается постоянным. Нами были рассмотрены

рены двух-, трех- и многослойные системы с одним градиентным слоем, а также системы с чередующимися градиентными слоями.

Пусть двуслойная система образована слоями с показателями преломления n_1 и n_2 . Оптическая толщина слоя, лежащего на подложке, — $0,25\lambda_0$, а толщина слоя, граничащего со средой, из которой поступает свет, изменяется по произвольному закону. Показатели преломления внешних (обрамляющих) сред n_0, n_m . Свет поступает из среды с показателем преломления n_0 по нормали к поверхности. Поскольку $r = \text{const}$, энергетический коэффициент отражения системы $R = |r|^2$ не зависит от толщины первого слоя для излучения с длиной волны $\lambda = \lambda_0$.

Определим значение амплитудного коэффициента отражения такой двуслойной диэлектрической системы, у которой оптическая толщина первого слоя изменяется в широких пределах, а оптическая толщина второго слоя равна $0,25\lambda_0$. Для этого воспользуемся матричным аппаратом, приведенным в работах [4, 5]:

$$r = \left[(n_0 M_{11} - n_m M_{22}) + (n_0 n_m M_{12} - M_{21}) \right] \times \\ \times \left[(n_0 M_{11} + n_m M_{22}) + (n_0 n_m M_{12} + M_{21}) \right]^{-1} = |r| e^{i\rho}, \quad (1)$$

где φ_1 — фазовая толщина 1-го слоя $M_{11} = (n_2/n_1) \sin \varphi_1$, $M_{12} = (i/n_2) \cos \varphi_1$, $M_{21} = (in_2) \cos \varphi_1$, $M_{22} = (n_1/n_2) \sin \varphi_1$, $\varphi_1 = 2\pi k (\lambda_0/\lambda)$, k — безразмерный коэффициент, определяющий оптическую толщину градиентного слоя. С учетом этого

$$R = |r|^2 = \left[(n_0 n_2 / n_1 - n_m n_1 / n_2)^2 \sin^2 \varphi_1 + (n_0 n_m / n_2 - n_2)^2 \cos^2 \varphi_1 \right] \times \\ \times \left[(n_0 n_2 / n_1 + n_m n_1 / n_2)^2 \sin^2 \varphi_1 + (n_0 n_m / n_2 + n_2)^2 \cos^2 \varphi_1 \right]^{-1}.$$

Условие отсутствия зависимости энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины первого слоя будет выполняться при

$$\begin{cases} n_0 n_2 / n_1 - n_m n_1 / n_2 = n_0 n_m / n_2 - n_2, \\ n_0 n_2 / n_1 + n_m n_1 / n_2 = n_0 n_m / n_2 + n_2. \end{cases} \quad (2)$$

Из системы уравнений (2) получаем:

$$n_1 = n_2^2 / n_m, \quad (3)$$

с учетом (3) амплитудный коэффициент отражения

$$r = (n_0 n_m - n_2^2) / (n_0 n_m + n_2^2) = \left| (n_0 n_m - n_2^2) / (n_0 n_m + n_2^2) \right| e^{i\rho}, \\ \rho = \begin{cases} 0 & \text{при } n_0 n_m < n_2^2, \\ \pi & \text{при } n_0 n_m > n_2^2. \end{cases} \quad (4)$$

Из выражения (3) видно, что $\rho = 0$ при $n_2^2 = n_0 n_m$. Как видно из соотношения (4), разность фаз между падающим и отраженным излучением не зависит от толщины градиентного слоя и определяется показателем преломления слоя, лежащего на подложке, и показателями преломления обрамляющих сред.

Показатель преломления двуслойной диэлектрической системы может изменяться в достаточно широких пределах. Так, при $n_2 = 1,70$, $n_0 = 1$ и $n_m = 1,52$ показатель преломления первого слоя $n_1 = 1,90$, а энергетический показатель отражения $R = 9,6\%$.

На рис. 1 представлена зависимость энергетического коэффициента отражения R (цифры на рисунке) от длины волны и $n_1 d_1$ для двуслойной системы с параметрами $n_0 = 1$,

$n_1 = 1,90$, $n_2 = 1,70$, $n_m = 1,52$, $\lambda_0 = 550$ нм. Как видно из этого рисунка, коэффициент отражения системы не меняется при изменении оптической толщины первого слоя в интервале длин волн порядка 5 нм.

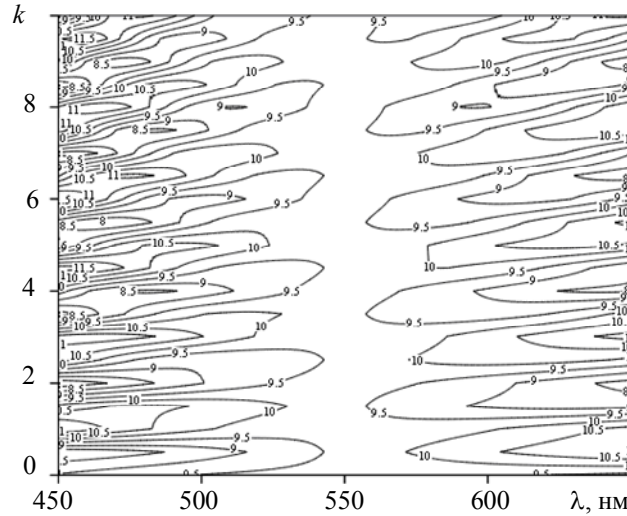


Рис. 1

На рабочей длине волны 550 нм энергетический коэффициент отражения $R = 9\%$, а например, для подложки с показателем преломления $n_m = 2$ — $R = 3\%$.

При возрастании показателя преломления подложки значение энергетического коэффициента отражения системы, содержащей слой с выбранными параметрами, уменьшается. Следовательно, указанные системы могут быть использованы для решения задач асферизации оптических элементов, работающих как в пропускании, так и в отражении.

Дальнейший интерес представляет рассмотрение трехслойных и многослойных систем с одним градиентным слоем, а также систем с чередующимися градиентными слоями, которые могут обладать подобными свойствами. Следует определить, могут ли такие системы содержать несколько слоев, параметры которых (оптическая толщина слоев) не влияют на коэффициент отражения системы.

Рассмотрим трехслойные четвертьволновые системы, у которых показатели преломления слоев равны n_1 , n_2 и n_3 . Оптическая толщина второго и третьего слоев по ходу луча равна 0,25, а оптическая толщина первого слоя может изменяться. С учетом этого для трехслойной системы $M_{11} = (n_3/n_2)\cos\varphi_1$, $M_{12} = (n_2/n_1n_3)\sin\varphi_1$, $M_{21} = (n_1n_3/n_2)\sin\varphi_1$, $M_{22} = (n_2/n_3)\cos\varphi_1$.

Энергетический коэффициент отражения системы $R = |r|^2$ равен:

$$R = \left[(n_0n_3/n_2 - n_2/n_3)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left((n_0n_m n_2)/(n_1n_3) - n_1n_3/n_2 \right)^2 \sin^2 \varphi_1 \right] \times \\ \times \left[(n_0n_3/n_2 + n_2/n_3)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left((n_0n_m n_2)/(n_1n_3) + n_1n_3/n_2 \right)^2 \sin^2 \varphi_1 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь так же, как и для двуслойной системы, отсутствие зависимости энергетического коэффициента отражения будет выполняться при условии

$$\begin{cases} n_0n_3/n_2 - n_2/n_3 = (n_0n_m n_2)/(n_1n_3) - n_1n_3/n_2, \\ n_0n_3/n_2 + n_2/n_3 = (n_0n_m n_2)/(n_1n_3) + n_1n_3/n_2. \end{cases} \quad (6)$$

Из соотношения (6) получаем значение показателя преломления градиентного слоя

$$n_1 = (n_2^2 n_m) / n_3^2. \quad (7)$$

С учетом (7) амплитудный коэффициент отражения

$$r = (n_0 n_3^2 - n_2^2) / (n_0 n_3^2 + n_2^2) = \left| (n_0 n_3^2 - n_2^2) / (n_0 n_3^2 + n_2^2) \right| e^{i\rho},$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{при } n_0 n_3^2 > n_2^2, \\ \pi & \text{при } n_0 n_3^2 < n_2^2. \end{cases}$$

Для подложки с показателем преломления $n_m = 1,52$ были исследованы трехслойные системы (см. таблицу).

Система	n_1	n_2	n_3	$R, \%$ (рабочая длина волны)
1	1,70 (MgO)	2 (SiO)	1,89 (Y ₂ O ₃)	7
2	1,89 (Y ₂ O ₃)	1,54 (Al ₂ O ₃)	1,38 (MgF ₂)	9,5
3	2,10 (Ta ₂ O ₅)	2 (SiO)	1,7 (MgO)	12,2

Как видно из таблицы, для трехслойной системы, как и для двуслойной, можно получить различные значения энергетического коэффициента отражения.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента отражения R от длины волны и оптической толщины градиентного слоя $n_1 d_1$ для трехслойной системы с параметрами $n_0 = 1, n_1 = 1,89, n_2 = 1,54, n_3 = 1,38, n_m = 1,52, \lambda_0 = 550 \text{ нм}$.

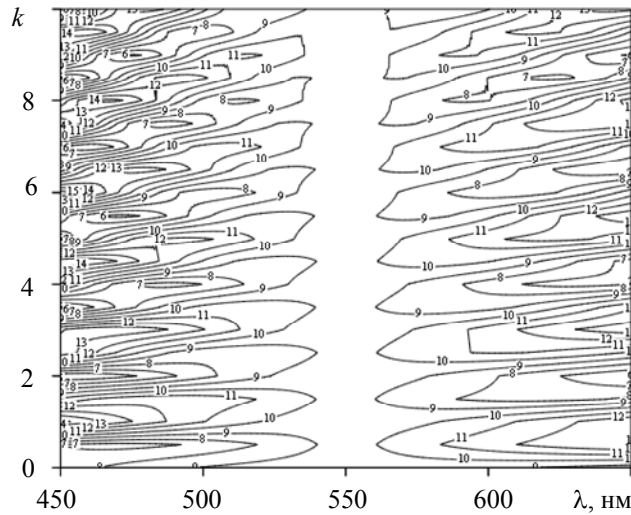


Рис. 2

Было исследовано зеркальное покрытие, состоящее из девятнадцати чередующихся слоев $0,25\lambda_0$. В этом случае для фазокомпенсирующей системы, содержащей один градиентный слой, величина показателя преломления n_1 определяется следующим выражением: $n_1 = n_{2i}^{18} / n_{2i+1}^{18}$, где i — число пар чередующихся слоев.

Далее были рассмотрены системы с чередующимися градиентными слоями. Примером такой системы, содержащей четное количество слоев, является четырехслойное покрытие, у которого 2-й и 4-й слои — четвертьволновые, а 1-й и 3-й — переменной толщины. Показатель преломления 3-го слоя находится согласно выражению (3): $n_3 = n_4^2 / n_m$, а первого слоя — $n_1 = n_2^2 n_m / n_4^2$. Коэффициент отражения такой системы равен нулю при $n_0 n_2^2 = n_m n_4^2$.

Для диэлектрических систем, содержащих пять слоев, 2-й, 4-й и 5-й слои — четвертьволновые, а 1-й и 3-й — переменной толщины. Показатель преломления 3-го слоя находится согласно выражению (7) для трехслойной системы $n_3 = n_4^2 n_m / n_5^2$, а показатель преломления 1-го слоя — $n_1 = n_2^2 n_5^2 / n_4^2 n_m$.

Исследован новый класс многослойных диэлектрических систем, обладающих постоянным коэффициентом отражения при изменении в широких пределах значений оптической толщины одного или нескольких слоев. Показано, что, используя подобные системы, можно формировать волновой фронт в оптической системе для одной длины волны или интервала длин волн. С использованием систем, содержащих слои, толщина которых не влияет на величину коэффициента отражения, можно создавать асферические поверхности, управляя распределением толщины по поверхности оптического элемента, компенсировать осесимметричные дефекты по поверхности подложек и уменьшать расходимость пучков в лазерных резонаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Интерференционные покрытия, формирующие энергетические и волновые параметры излучения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
2. Губанова Л. А. Градиентные интерференционные системы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
3. Фимин П. Н. Разработка и исследование градиентных лазерных зеркал. СПб: СПбГУ ИТМО, 2001.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
5. Хасс Г., Тун Р. Физика тонких пленок. М.: Мир, 1967. Т. 2.

Сведения об авторах

- Георгий Васильевич Никандров** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: nikandrov.spb@mail.ru
- Эдуард Степанович Путилин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: putilin@otd.ifmo.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.