

## ГРАНИЦЫ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ ОТРАЖЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ

А. Г. Жиглинский, С. Г. Парчевский, Э. С. Путилин  
и З. Н. Эльснер

Рассчитана величина спектрального интервала, в котором можно изменять форму волнового фронта отраженного излучения с помощью четвертьволновых диэлектрических зеркал без существенной потери их отражательных свойств. Так, например, 7-слойное зеркало позволяет скорректировать волновой фронт на 0.3 полосы в интервале 400 Å (в области 5000 Å), при этом коэффициент отражения изменяется менее, чем на 0.04. Рассчитана также величина максимального отклонения поверхности подложки от плоскости, которая может быть скомпенсирована с помощью отражающих покрытий. Для 17-слойного зеркала, например, эта величина достигает 1.5 полосы. Эксперимент согласуется с расчетом.

Ранее [1] было показано, что четвертьволновым диэлектрическим зеркалам можно придать дополнительные функции, связанные с формированием волнового фронта отраженной световой волны. В излагаемой работе обсуждаются границы сосуществования явления формирования волнового фронта и отражения световой волны многослойными диэлектрическими зеркалами. А именно, определяется спектральный интервал и диапазон возможных деформаций волнового фронта, в которых указанные выше свойства зеркал существуют одновременно. Для определения этих величин необходимо рассмотреть совместно зависимости коэффициента отражения и деформации волнового фронта отраженного излучения от длины волны для слоев переменной по радиусу толщины. Коэффициент отражения  $R$  для четвертьволновых зеркал с числом слоев  $k$  может быть вычислен по известной формуле [2]

$$R = \frac{(n_0 m_{11} - n_{k+1} m_{22})^2 + (n_0 n_{k+1} m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_{k+1} m_{22})^2 + (n_0 n_{k+1} m_{12} + m_{21})^2}, \quad (1)$$

где  $m_{is}$  — элементы матрицы (вычисленной в [2]), преобразующей электромагнитное поле падающей волны в электромагнитные поля отраженной и прошедшей через четвертьволновое покрытие волн;  $m_{is}$  — функции показателей преломления слоев зеркал  $n_A$  и  $n_B$ , оптических толщин  $n_j d_j$  слоев, образующих зеркальное покрытие, и длины волны падающего излучения  $\lambda$ ;  $n_0$  — показатель преломления среды, из которой падает свет;  $n_{k+1}$  — показатель преломления подложки;  $j$  — номер четвертьволнового слоя, отсчитываемый со стороны среды, из которой падает свет.

Значения коэффициентов отражения (и разности фаз  $\Delta\phi$  между отраженной и падающей волнами, которая понадобится нам в дальнейшем) в зависимости от изменения толщины зеркального покрытия и длины волны падающего излучения для зеркал с различным числом слоев рассчитывались на ЭВМ.

Изменение формы волнового фронта световой волны, отраженной от зеркала со слоями переменной толщины, как это было показано ранее [1], может быть описано следующим выражением:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon(\rho) &= 2\Delta l'(\rho) \frac{2\pi}{\lambda} - \left[ \left( \frac{k-1}{2n_A} + \frac{k+1}{2n_B} \right) \frac{\pi\lambda_0}{\lambda} + a \right] \frac{\Delta t(\rho)}{t(0)}, \\ a &= \frac{\Delta\psi(\rho)}{\Delta t(\rho)/t(0)}; \quad \frac{\Delta t(\rho)}{t(0)} = \frac{n_j d_j(\rho) - n_j d_j(0)}{n_j d_j(0)}, \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{2n_0(n_{k+1}^2 m_{12} m_{22} - m_{21} m_{11})}{n_0^2 m_{11}^2 + n_0^2 n_{k+1}^2 m_{12}^2 - n_{k+1}^2 m_{22}^2 - m_{21}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $2\Delta l'(\rho)$  — изменение формы поверхности подложки по радиусу  $\rho$ ;  $n_j d_j(\rho)$  — оптическая толщина слоев зеркального покрытия в точке с радиусом  $\rho$ ;  $n_j d_j(0)$  — оптическая толщина слоев зеркального покрытия в центре подложки;  $\lambda_0$  — длина волны, в которой коэффициент отражения имеет максимальное значение;  $\Delta\psi(\rho) = \psi(\rho) - \psi(0)$  — изменение разности фаз между падающим и отраженным излучением вдоль радиуса подложки.

Применение уравнений (1) и (2) дает возможность определения спектрального интервала и диапазона деформаций волнового фронта, в которых одновременно существуют явления формирования волнового фронта

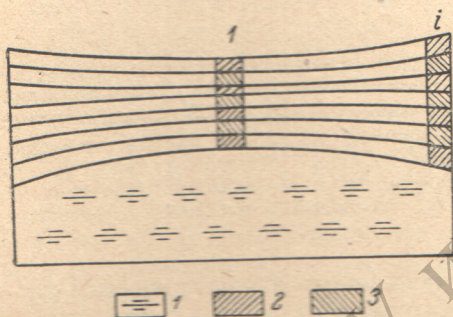


Рис. 1. К оценке спектрального интервала, в котором сосуществуют свойства отражения и формирования волнового фронта отраженной волны.

1 — подложка, 2 — слой с высоким показателем преломления, 3 — слой с низким показателем преломления.

и отражения световой волны многослойными зеркалами. Из уравнения (2) также (без всяких расчетов) видно, что в случае формирования волнового фронта произвольной формы последняя будет существовать только в одной длине волны. Поскольку в области главных максимумов отражения величина  $a \sim 1/\lambda$  [3], то изменение  $\lambda$  вызовет относительное изменение  $\Delta\varepsilon(\rho)$ , равное относительному изменению  $\lambda$ .

Рассмотрим интересный в практическом отношении случай: формирование плоского волнового фронта излучения, отраженного от зеркала, нанесенного на неплоскую поверхность,

$$\Delta \varepsilon(\rho) = 0. \quad (3)$$

Спектральный интервал, в котором указанные свойства зеркал существуют одновременно, должен быть ограничен областью длин волн, в которой коэффициент отражения достаточно велик, т. е. областью главного максимума отражения. Расчет искомого спектрального интервала может быть выполнен с помощью формул (1) и (2) при условии (3). Этот интервал зависит от величины изменения толщины зеркального покрытия по радиусу и допускаемого изменения отражательных свойств покрытия.

Проиллюстрируем сказанное на примере распространенного в практике семислойного четвертьволнового зеркала, образованного слоями сернистого цинка ( $n_B=2.2$ ) и криолита ( $n_A=1.35$ ).

Для этого выделим на зеркале (рис. 1) центральный участок, обозначенный цифрой 1, с толщиной покрытия  $t(0)$  и  $i$ -й участок с толщиной  $t(\rho)$ . Толщина слоев участка  $i$  максимально отличается от толщины участка 1. Площади обоих участков выбираем настолько малыми, чтобы в их пределах свойства зеркал можно было считать неизменными.

Рассмотрим совместно (рис. 2) графические зависимости  $R$  от  $\lambda/\lambda_0$  для участка 1 и  $\Delta\varepsilon$  от  $\lambda/\lambda_0$  для 1-го и  $i$ -го участков, полученные с помощью формул (1) и (2).

Если считать недопустимым уменьшение коэффициента отражения ниже величины  $R_0$  (которая соответствует отклонению от зависимости  $a \sim 1/\lambda$  не более чем на 1%), то нахождение искомого диапазона длин волн становится очень простым. Оно сводится к сопоставлению графических зависимостей при разной степени деформации слоев  $i$ -го участка по сравнению с центральным и определению интервала, в котором  $\Delta \epsilon (\lambda/\lambda_0) = 0$ .

В случае  $\Delta t(\rho)/t(0) = 0$  спектральный интервал, в котором  $\Delta \epsilon = 0$  и  $R \geq R_0$ , будет ограничиваться только задаваемым наименьшим значением коэффициента отражения (рис. 2). В обсуждаемом случае  $R_0 = 0.90$  и этот интервал длин волн равен  $(0.92 \div 1.08) \lambda_0$  (на кривой I на рис. 2, а эта область обозначена цифрой I). Для  $\lambda_0 = 5000 \text{ \AA}$  этот интервал составляет  $800 \text{ \AA}$ .

При относительном изменении толщин зеркального покрытия  $\Delta t(\rho)/t(0) = -0.05$ , как видно из кривой II на рис. 2, а и графика рис. 2, б, плоский волновой фронт и высокий коэффициент отражения одновременно будут реализованы в интервале длин волн II  $(0.92 \div 1.03) \lambda_0$ . Если увеличить относительное изменение толщины зеркального покрытия до  $-0.10$ , то искомым интервал длин волн сократится и станет равным  $(0.92 \div 1.00) \lambda_0$  — область IV.

При  $\Delta t(\rho)/t(0) = -0.20$  волновой фронт будет оставаться плоским и коэффициент отражения высоким только для одной длины волны. Из рис. 2 следует также, что в зависимости от знака изменения  $\Delta t(\rho)/t(0)$  интервал длин волн, в котором одновременно существуют явления формирования плоского волнового фронта и отражения световой волны, смещается при  $\Delta t(\rho)/t(0) < 0$  в коротковолновую, а при  $\Delta t(\rho)/t(0) > 0$  в длинноволновую часть спектра.

Результаты экспериментальной проверки наших расчетов приведены на рис. 3. Эксперименты производились на установке, описанной в работе [1]. Совпадение экспериментальных результатов с расчетом удовлетворительное. Результаты аналогичных расчетов для зеркал с другим числом слоев представлены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что при не очень большой коррекции формы волнового фронта диапазон длин волн, где волновой фронт остается плоским, достаточен для практических применений.

Рассмотрим теперь вторую задачу: определение диапазона возможных деформаций волнового фронта  $\Delta \epsilon(\rho)$ , в котором одновременно существует достаточно высокое отражение световой волны. Для рассматриваемого нами случая ( $\Delta \epsilon(\rho) = 0$ ) эта задача одновременно означает определение

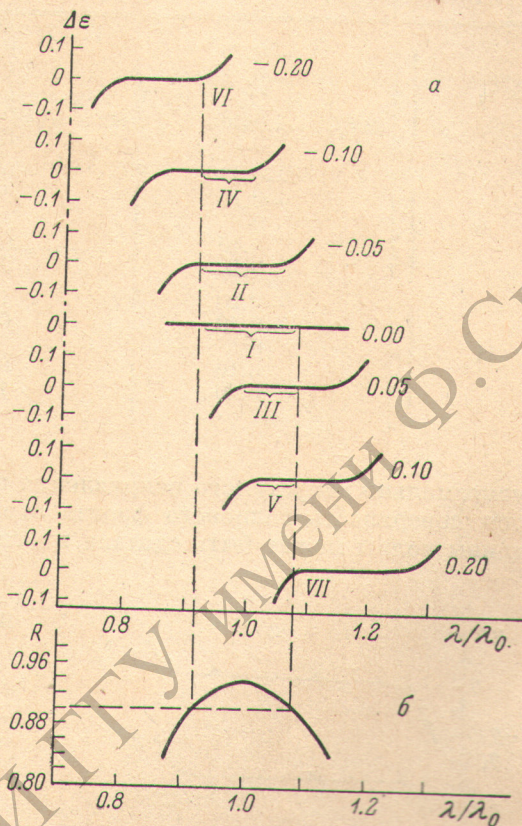


Рис. 2. К определению условий сосуществования явления формирования плоского волнового фронта и отражения светового излучения семислойным четвертьволновым зеркалом.

а — зависимость изменения  $\Delta \epsilon$  формы волнового фронта отраженного излучения от относительной длины волны. Цифра справа от кривых обозначает величину  $\Delta t(\rho)/t(0)$ . Римскими цифрами обозначены интервалы длин волн, в которых сосуществуют явления формирования плоского волнового фронта отраженного излучения и отражения светового излучения.  $\Delta \epsilon$  выражено в долях полосы. б — зависимость коэффициента отражения семислойного четвертьволнового зеркала от относительной длины волны.

Таблица 1

Величина спектрального интервала, в котором сосуществуют явления формирования плоского волнового фронта и высокого отражения для четвертьволновых зеркал с различным числом слоев

Число слоев зеркала	$\Delta t(\rho)/t(0)$	$\Delta \epsilon$ , в долях полосы	Диапазон длин волн
7	-0.20	0.65	$0.92 \lambda_0$
	-0.10	0.32	$(0.92 \div 1.00) \lambda_0$
	0	0	$(0.92 \div 1.08) \lambda_0$
	0.10	0.32	$(1.00 \div 1.08) \lambda_0$
	0.20	0.65	$1.08 \lambda_0$
9	-0.20	0.94	$0.92 \lambda_0$
	-0.10	0.47	$(0.92 \div 1.00) \lambda_0$
	0	0	$(0.92 \div 1.08) \lambda_0$
	0.10	0.47	$(1.00 \div 1.08) \lambda_0$
	0.20	0.94	$1.08 \lambda_0$
11	-0.20	1.12	$0.92 \lambda_0$
	-0.10	0.57	$(0.92 \div 1.00) \lambda_0$
	0	0	$(0.92 \div 1.08) \lambda_0$
	0.10	0.57	$(1.00 \div 1.08) \lambda_0$
	0.20	1.12	$1.08 \lambda_0$

максимально допустимого искривления поверхности подложки, при которой поверхность волнового фронта отраженного излучения для данной длины волны может быть сделана плоской с помощью четвертьволновых

Таблица 2

Величина максимального изменения формы волнового фронта четвертьволновыми зеркалами с различным числом слоев

Число слоев четвертьволнового зеркала	$\Delta \epsilon_{\max}$ , в долях полосы	Диапазон изменений коэффициента отражения
7	0.65	$0.900 \div 0.935$
9	0.94	$0.936 \div 0.975$
11	1.12	$0.966 \div 0.990$
13	1.25	$0.982 \div 0.996$
15	1.40	$0.990 \div 0.999$
17	1.54	$0.995 \div 0.999$

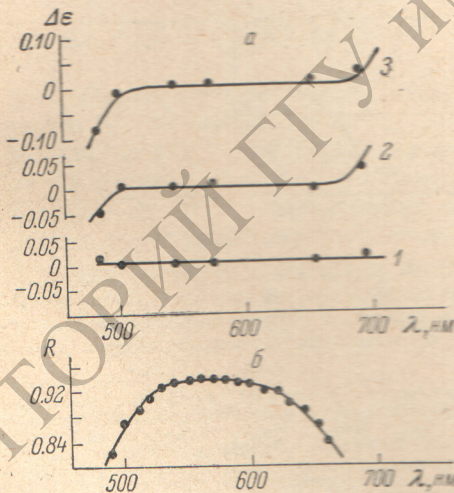


Рис. 3. Зависимость (а) отклонения от плоскости формы волнового фронта  $\Delta \epsilon$  излучения, отраженного от семислойного зеркала (при различных значениях  $\Delta t(\rho)/t(0)$ ) и (б) коэффициента отражения семислойного зеркала от длины волны.

Точками обозначены экспериментальные значения. Приведенные на рисунке кривые рассчитаны по формуле (1) и (2). 1 — для  $\Delta t(\rho)/t(0)=0$ , 2 — для  $\Delta t(\rho)/t(0)=0.015$ , 3 — для  $\Delta t(\rho)/t(0)=0.040$ .

(2), составляет  $\pm 0.65$  полосы. Величины максимально возможных изменений формы волнового фронта  $\Delta \epsilon_{\max}$  непоглощающими четвертьволновыми зеркалами с другим числом слоев приведены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что изменения формы волнового фронта, получаемые с помощью

покрытий без уменьшения величины коэффициента отражения ниже  $R_0$ .

Из рис. 2 видно, что для семислойного зеркала поверхность волнового фронта отраженного излучения будет оставаться плоской в интервале изменений толщин зеркального покрытия  $\Delta t(\rho)/t(0) = \pm 0.20$ .

Соответствующая этой величине наибольшая компенсация отклонения подложки от плоскости, вычисленная с помощью второго члена в формуле

четвертьволновых зеркал, могут превосходить 1.54 полосы (при одновременном сохранении коэффициента отражения с точностью до 0.4%).

Итак, в результате проделанной работы для различных четвертьволновых зеркал установлены: 1) диапазон длин волн и 2) максимальная величина коррекции формы волнового фронта, при которых одновременно существуют как явления формирования волнового фронта отраженного излучения, так и высокое отражение световой волны.

#### Литература

- [1] А. Г. Жиглинский, Э. С. Путилин. Опт. и спектр., 32, 1176, 1972.
- [2] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1970.
- [3] Г. В. Розенберг. Оптика тонкослойных покрытий. ГИФМЛ, М., 1958.

Поступило в Редакцию 4 мая 1976 г.

---

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорини