

УДК 535.345.673: 517.51

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2013 г. Е. Н. Котликов, доктор физ.-мат. наук; Ю. А. Новикова, аспирантка

Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт -Петербург

E-mail: ekotlikov45@mail.ru

В работе проведен сравнительный анализ критериев устойчивости спектральных характеристик многослойных диэлектрических систем к возможным изменениям оптической толщины отдельных слоев. Предложена методика, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости синтезированных интерференционных покрытий, позволяющий исследовать трансформацию спектров при реальных ошибках в толщинах пленок. На примерах некоторых типов интерференционных покрытий проведен сравнительный анализ известных и предложенной методик и показано, что введенный критерий точнее описывает устойчивость покрытия и позволяет корректировать его спектры в процессе изготовления.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, устойчивость покрытия, функция качества, функция устойчивости.

Коды OSIC: 240.0340.

Поступила в редакцию 01.02.2013.

Введение

Уже на первых стадиях проектирования и изготовления интерференционных покрытий встает вопрос о влиянии случайных и систематических ошибок в толщинах пленок на конечные спектры изготовленного покрытия. При измерении толщины осаждаемого слоя в процессе напыления всегда присутствуют ошибки, обусловленные инструментальной погрешностью используемой аппаратуры, несовершенством методики измерения или просто человеческим фактором. Отсюда и возникает необходимость в оценке найденных решений с точки зрения их устойчивости по отношению к различным ошибкам, неизбежным в процессе реализации.

Обзор методов анализа устойчивости

В большинстве работ по синтезу интерференционных покрытий вопросы исследования устойчивости многослойных структур рассмо-

трены недостаточно. В первую очередь, это связано с некорректностью самой задачи синтеза и отсутствием оптимальных критериев отбора из полученных решений [1–4].

Условно методы анализа устойчивости можно разделить на статистические [3–5] и аналитические [3, 6–8]. В работах [3, 4] проведено исследование влияния ошибок на реализацию требуемого спектра. Проведен графический анализ спектров зеркальных [3] и светоделительных [4] покрытий. В работе [5] проводится анализ систематических ошибок по трансформации спектров спектроделительных покрытий. Для разных вариантов покрытий было рассчитано по несколько десятков вариаций толщин слоев. В рассмотренных работах за устойчивость структуры принимались не математические величины, а визуальное сравнение полученных спектров между собой и с начальными спектральными характеристиками. Недостатком этих методов является отсутствие количественного анализа устойчивости и субъективность принятия решений.

Рассмотрим аналитические методы исследования устойчивости. Для описания структуры покрытия в дальнейшем будем использовать следующие обозначения. Многослойное пленочное покрытие состоит из m слоев, к которым с обеих сторон примыкают полубесконечные среды. Слои пронумерованы в направлении распространения световой волны. Математически многослойные оптические системы описываются m -слойной системой, состоящей из конечного числа слоев с различными комплексными показателями преломления $N_j = n_j - ik_j$ и оптическими толщинами $D = n_j d_j$, сравнимыми с длиной световой волны. Здесь n_j и k_j – показатели преломления и поглощения j -слоя соответственно. Обычно предполагают, что оптические слои являются однородными, изотропными и имеют строго параллельные границы и бесконечную протяженность. Окаймляющие среды также считают однородными и изотропными.

В работе [6] предложено использовать для анализа устойчивости значения первой частной производной функции пропускания T (при разложении T в ряд Тейлора) по оптической толщине каждого слоя:

$$T = T(n_1^0, \dots, n_j^0; n_1^0 d_1^0, \dots, n_j^0 d_j^0; \lambda, \alpha^0) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial T(n_j^0 d_j^0)}{\partial (n_j d_j)} \Delta(n_j d_j) + \dots, \quad (1)$$

где верхний индекс 0 означает нулевое приближение, вблизи которого проводится варьирование параметров ($n_1, n_j, n_1 d_1, n_j d_j, \alpha$). Расчет нормированных частных производных энергетического коэффициента пропускания по оптическим толщинам последующих слоев позволяет выявить спектральные интервалы, в которых возможна оперативная коррекция ошибки в анализируемом слое путем изменения оптических толщин последующих слоев.

В работах [3, 7, 8] проведен анализ влияния случайных ошибок на спектры структур и показана принципиальная возможность корректировки изготовленных структур и снижения искажения полученных спектров. В основе этих методик лежит анализ первой или второй производных функции качества $F(X)$ (целевой функции), определенной на дискретном множестве, содержащем L точек, в виде

$$F(X) = \left\{ \sum_{j=1}^L w(\lambda_j) |T(X, \lambda_j) - T_0(\lambda_j)|^q \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (2)$$

где $T(X, \lambda_j)$ – текущее спектральное значение коэффициента пропускания, $T_0(\lambda_j)$ – заданное значение коэффициента пропускания, $w(\lambda_j)$ – весовая функция, λ_j – текущее значение длины волны. При расчете мы принимали $w(\lambda_j) = 1$, q – целое положительное число. Обычно выбирают $q = 2$, тогда представление функции качества в виде (2) характеризует среднеквадратическое приближение.

Независимо от вида функции качества, наилучшее соответствие характеристик синтезированного покрытия требуемым характеристикам не означает, что структура будет устойчива к вариациям толщин слоев. Многоэкстремальность задачи синтеза определяет существование множества локальных минимумов – «долин», на дне которых находятся искомые решения [8]. В случае оптимизированной структуры покрытия предполагается, что функция качества находится в одном из локальных минимумов.

В качестве критерия устойчивости в работе [3] предлагается использовать производные функции качества $\partial F(X)/\partial (n_j d_j)$. Однако производная функции качества близка к нулю и, как будет показано ниже, реально не может служить критерием устойчивости.

В работах [7, 8] предлагается использовать следующий критерий устойчивости. Зависимость функции качества от параметров вблизи экстремума можно с большой точностью предположить параболической. В этом случае в точке локального минимума первая частная производная функции качества по оптическим толщинам близка к нулю, а вторая частная производная $\partial^2 F(X)/\partial D_j^2$ показывает крутизну склонов многомерной долины, где находится решение. Чем больше вторая производная, тем больше увеличение функции качества при отклонении параметра от точки локального минимума, т.е. долина в направлении переменной этого слоя имеет большую крутизну. Другими словами, если слой имеет большую вторую производную в точке локального минимума, то небольшие изменения его толщины приведут к значительному увеличению функционала качества, т.е. к существенному отклонению спектральной характеристики от заданной. В качестве критерия устойчивости S_j отдельного j -го слоя предлагается функция $S_j(X)$, а в качестве критерия устойчивости всей системы – функция $S(X)$

$$S_j(X) = \frac{\partial^2 F(X)}{\partial D_j^2}, \quad (3)$$

$$S(X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j(X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial^2 F(X)}{\partial D_j^2} \right)^2.$$

В работах [7, 8] проводится детальный анализ критерия (3) на ряде примеров.

Критерий устойчивости на основе анализа трансформации спектров

Рассмотрим предложенную нами методику, основанную на анализе трансформации спектров при конечном значении ошибок в слоях. Для иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим спектры пропускания полосового 15-слоеного интерференционного фильтра, спектр которого представлен на рис. 1. Расстояние между точками в шкале длин волн $\Delta\lambda = (\lambda_N - \lambda_1)/N$, где N – число точек в спектре.

В качестве критерия устойчивости предлагается использовать модуль разности площадей кривых 1 и 2.

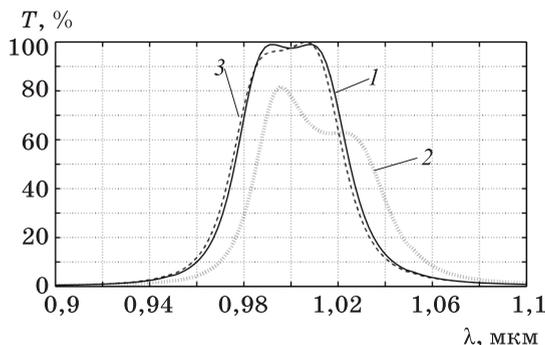


Рис. 1. Спектры пропускания 15-слоеного полосового интерференционного фильтра. 1 – спектр исходной структуры, 2 – спектр структуры с ошибкой в 12-м слое, 3 – спектр структуры с ошибкой в 12-м слое и коррекцией в 13-м слое.

Аналитически его величина выражается как

$$\Delta F_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left(\sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) |\Delta D_k| =$$

$$= \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left(\sum_{\lambda_i} T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k) \right). \quad (4)$$

Этот метод характеризует трансформацию спектра при произвольных значениях ΔD_k . Введенный нами критерий может быть использован и для анализа устойчивости синтезированной структуры, и для коррекции спектральных характеристик в процессе изготовления покрытия. Как будет показано ниже, для этого удобно использовать гистограммы устойчивости всей структуры.

Нами также рассматривалась еще одна функция устойчивости ΔP_k при произвольных значениях ΔD_k , в которой варьируемым параметром является изменение толщины пленки ΔD_k :

$$\Delta P_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left(\sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) =$$

$$= \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta D_k} \right) \quad (\text{при } \Delta D_k > 0). \quad (5)$$

Фактически критерий устойчивости (1), в котором используется член $\sum \partial T(n_j^0 d_j^0) \Delta(n_j d_j) / \partial(n_j d_j)$ аналогичен функции устойчивости (5) при $\Delta D_k > 0$. В случае линейной зависимости ΔP_k от ΔD_k функция (5) даст постоянную, характеризующую устойчивость анализируемого слоя вне зависимости от величины ошибки. Основные выводы по формуле (5) для бесконечно малых значений ΔD_k применимы к функции устойчивости (1).

Если провести качественный анализ критерия по формуле (4), то становится очевидным, что он нелинейно зависит от величины ошибки ΔD_k . Он имеет максимальную кривизну вблизи $\Delta D_k \rightarrow 0$, а затем стремится к насыщению при значениях ΔD_k , равных одной или двум полуширинам спектра пропускания. В этом случае его значение просто равно удвоенной площади, ограниченной кривой 1. Отсюда следует, что использование критерия устойчивости, базирующегося на анализе производных от спектра или функции качества, недостаточно корректно и в некоторых случаях может дать большое расхождение при конечных значениях ΔD_k .

В работе для синтеза и анализа спектров использовалась программа FilmMgr. Для анализа критериев устойчивости по предложенной и ранее известным методикам была составлена программа расчетов функций ΔF_k и ΔP_k [9]. Программа написана на языке Wolfram Mathematica-8.0. В основе расчетов лежит матричный метод с использованием характеристических матриц отдельных слоев [3].

Программа позволяет рассчитывать спектры пропускания и отражения заданных функций, находить устойчивость слоев к вариациям ошибок по формулам (1), (4), (5), строить гистограммы устойчивости отдельных пленок, а также 3D-графики спектров.

Полосовой интерференционный фильтр

Проведем сравнительный анализ критериев устойчивости и возможности вносить коррекции в толщины пленок в процессе изготовления с целью получения заданного спектра.

В качестве первого примера рассмотрим 15-слойный полосовой интерференционный фильтр, структура которого и устойчивость по разным критериям приведены в табл. 1, а спектр – на рис. 1. Одним из основных условий использования фильтров является точность попадания длины волны в максимуме пропускания в заданный диапазон и возможность коррекции фильтра в процессе изготовления. Поэтому в качестве эталона мы использовали сравнение всех критериев со сдвигом максимума пропускания фильтра за счет ошибок в слоях.

В табл. 1 (столбец 4) приведено нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками $-\Delta\lambda_{\max}$ в зависимости от разных слоев. Величина ошибки $\Delta D_k = 0,01\lambda_0$ для каждого k -слоя. Смещение центра тяжести спектра $\Delta\lambda_{\max}$ определяется как

$$\Delta\lambda_i = \lambda - \lambda_i = \frac{1}{\sum T(\lambda)} \sum \lambda_i T_i. \quad (6)$$

В табл. 1 также приведены результаты расчетов устойчивости по рассмотренным выше критериям. Сравнение данных в табл. 1 показывает следующее. Устойчивость, определенная по первой производной функции качества, практически нигде не соответствует реальной (столбец 5). Лучшие результаты дает устойчивость по второй производной (столбец 6), однако для некоторых слоев существуют количественные расхождения.

Рассмотрим устойчивость по критерию [6]. Расчет проводился по формуле (5) для бесконечно малой ошибки. Устойчивость по (5) дает количественное совпадение со сдвигом центра тяжести

Таблица 1. Нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками в зависимости от разных слоев и устойчивость по разным критериям

Структура (подложка – кварц, среда – воздух)			$\Delta\lambda_{\max}$ ($\Delta D_k = 0,025$ мкм)	Устойчивость, нормированная на максимальное значение				
№ слоя	Вещество	Оптическая толщина, мкм		$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left(\frac{\partial^2 F(x)}{\partial D_j^2}\right)$	$\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial D_k}\right)$	$\Delta F_k / (\Delta F_k)_{\max}$	
							ΔD_k , мкм	
							0,001	0,025
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ZnSe	0,25	0,160	0,045	0,258	0,158	0,161	0,159
2	BaF ₂	То же	0,326	0,006	0,300	0,315	0,323	0,326
3	ZnSe	''	0,585	0,171	0,983	0,566	0,578	0,586
4	BaF ₂	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	ZnSe	0,25	0,596	0,155	0,994	0,575	0,589	0,596
6	BaF ₂	То же	0,342	0,024	0,324	0,336	0,344	0,342
7	ZnSe	''	0,207	0,090	0,345	0,208	0,209	0,207
8	BaF ₂	''	0,154	0,115	0,129	0,153	0,155	0,154
9	ZnSe	''	0,157	0,309	0,244	0,161	0,158	0,157
10	BaF ₂	''	0,238	0,311	0,189	0,235	0,239	0,238
11	ZnSe	''	0,407	0,938	0,579	0,383	0,407	0,408
12	BaF ₂	0,5	0,728	0,986	0,578	0,666	0,723	0,728
13	ZnSe	0,25	0,397	0,931	0,564	0,373	0,396	0,398
14	BaF ₂	То же	0,198	0,287	0,153	0,200	0,197	0,198
15	ZnSe	''	0,085	0,202	0,097	0,08	0,086	0,085

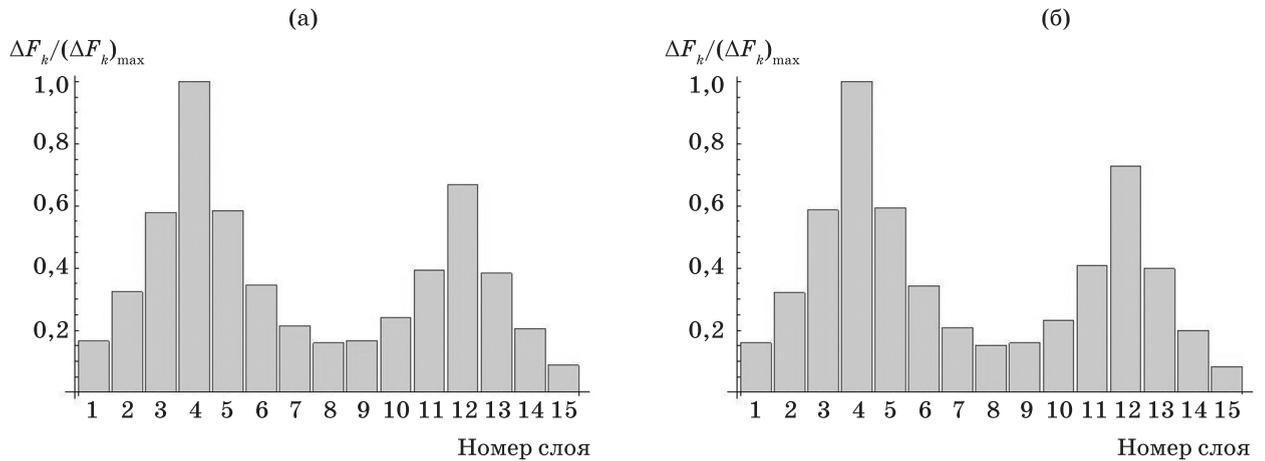


Рис. 2. Гистограммы устойчивости по слоям. а – ошибка $0,001 \lambda_0$, б – ошибка $\pm 0,025 \lambda_0$.

спектра. Как видно из табл. 1, анализируемый критерий также хорошо описывает качественно и количественно искажения спектров. Аналогичные результаты получаются и для устойчивости по второй производной функции качества (3).

Проанализируем устойчивость по введенному нами критерию (4). Численные значения устойчивости для различных ошибок в слоях приведены в табл. 1 (столбцы 8 и 9), а гистограммы устойчивости по критерию (4) представлены на рис. 2. Видно, что структура гистограмм не зависит от знака ошибки. Из табл. 1 и рис. 1 и 2 видно, что при заданных ошибках введенные критерии (4) и (5) хорошо количественно описывают искажения в спектре интерференционного фильтра. Можно сделать вывод, что предложенная методика по формуле (4) дает согласующиеся с расчетом результаты сдвигов спектров пропускания.

Данные гистограмм (рис. 2) и табл. 1 позволяют определить те изменения, которые необходимо внести в толщины пленок, чтобы получить требуемую структуру или провести коррекцию при изготовлении покрытий, если допущены ошибки в слоях. Коррекцию в слоях можно определить по табл. 1 или составить аналогичную для другой структуры. Анализ ошибок в спектрах показывает, что все ошибки в предыдущих слоях могут быть сведены к ошибке в z -слое, и для него легко рассчитать коррекцию в последующем $-(z + v) > z$ слое, где v – целое число.

При расчете коррекции ошибок должно выполняться условие

$$\Delta D_{z+v} = - \frac{F_z}{F_{z+v}} \Delta D_z. \quad (7)$$

Например, если в 12-й слой ввести ошибку $D_{12} = 0,025 \lambda_0$ мкм, то для компенсации искажений спектра можно использовать последующие слои, т.е. 13-й или 14-й. Если использовать 13-слой, то его толщина должна быть в соответствии с формулой (7) уменьшена на $D_{13} = 0,046 \lambda_0$ мкм. Спектры структур с ошибкой в 12-м слое, которая корректируется изменениями толщин в 13-м слое, практически полностью совпадают со спектром исходной структуры и приведены на рис. 1 (кривая 3).

Для рассматриваемого примера все критерии устойчивости дают удовлетворительное соответствие.

Светоделительное покрытие

В качестве второго примера проведем анализ светоделительного покрытия с коэффициентом отражения 70% в диапазоне от 0,95 до 1,05 мкм. Его структура и результаты расчетов критериев устойчивости приведены в табл. 2, а спектр – на рис. 3. Здесь же приведены значения функции качества (столбцы 4, 5) с положительными и отрицательными ошибками ΔD_k , которые мы использовали в качестве критерия для сравнительного анализа. В качестве эталонного спектра взято значение среднего коэффициента пропускания $T = 0,30\%$.

Данные в табл. 2 показывают, что устойчивость, определенная по первой и второй производным функции качества (столбцы 6–7) и по производной от спектра пропускания (столбец 8) дают принципиальные количественные расхождения с критерием (6) (столбцы 9–11). Это связано с тем, что ошибки разных знаков

Таблица 2. Нормированные на максимальное значение функции устойчивости $F(X)$ спектроделительного покрытия по разным критериям с введением ошибок разных знаков

Структура (подложка – кварц, среда – воздух)			$\Delta\lambda_{\max}$		Устойчивость, нормированная на максимальное значение					
№ слоя	Вещество	Оптическая толщина, мкм	$\Delta D_k = 0,075$, мкм	$\Delta D_k = -0,075$, мкм	$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left(\frac{\partial^2 F(X)}{\partial D_j^2}\right)$	$\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial D_k}\right)$	$\frac{\Delta F_k}{(\Delta F_k)_{\max}}$		
								ΔD_k , мкм		
								0,01	0,075	-0,075
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ZnSe	0,780	0,700	0,500	0,194	0,629	0,747	0,713	0,650	0,545
2	SiO	0,158	0,671	0,839	0,491	0,629	0,873	0,786	0,526	0,840
3	ZnSe	0,303	0,841	0,505	0,890	0,790	0,816	0,789	0,834	0,492
4	SiO	0,363	0,765	0,459	0,419	0,551	0,769	0,755	0,788	0,441
5	ZnSe	0,076	0,641	1,000	1,00	1,00	1,00	0,873	0,438	1,00
6	SiO	0,230	0,518	0,403	0,396	0,414	0,594	0,569	0,490	0,432
7	ZnSe	0,378	1,000	0,444	0,493	0,943	0,974	1,00	1,00	0,282

(не учитываемые в критериях (2) и (3)) дают существенные различия.

Для анализа результатов рассмотрим спектры с ошибками в 5-м и 7-м слоях. Ошибки 0,075 взяты с разными знаками. Максимальное различие функций устойчивости означает, что эти слои будут иметь максимальную разность отклонений спектров от заданной структуры. На рис. 3 приведены спектры пропускания исходной структуры с введенными ошибками в 5-м и 7-м слоях.

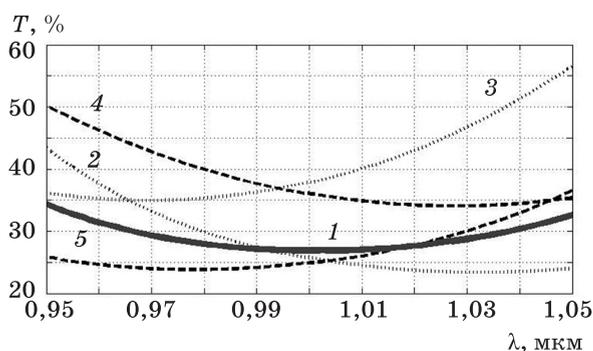


Рис. 3. Спектры пропускания 7-слойного светоделительного покрытия структуры без ошибок и с ошибками в 5-м и 7-м слоях разных знаков. 1 – спектр исходной структуры, 2 – спектр структуры с ошибкой в 5-м слое +0,075, 3 – спектр структуры с ошибкой в 5-м слое -0,075, 4 – спектр структуры с ошибкой в 7-м слое +0,075, 5 – спектр структуры с ошибкой в 7-м слое -0,075.

Из анализа спектров видно, что ошибки разного знака могут давать существенные различия в некоторых слоях. Для 1-го и 3-го слоев ΔF_k симметрична относительно знака ошибки. Для 5-го и 7-го слоев она асимметрична. Другими словами, изменение знака ошибки должно привести к существенной трансформации спектра и критерия устойчивости. Отсюда видно, что наилучшее соответствие с критериями устойчивости для 5-го и 7-го слоев дает наш (4) критерий. Близкие значения к критерию (4) получаются и для функции качества. Устойчивость по критерию (5) для малой ошибки (столбец 7) дает хорошие результаты. С увеличением ошибки возникают принципиальные расхождения всех (кроме нашего) критериев устойчивости и функции качества, так как начинаются расхождения с расчетными сдвигами. Слой 7, который имел максимальное значение критерия, при смене знака ошибки, становится минимальным. То же самое проявляется для 3-го и 4-го слоев.

На рис. 4 приведены гистограммы устойчивости по слоям. Гистограммы наглядно показывают, как трансформируется спектр при введении положительной и отрицательной ошибки в слое. Существенным является то, что ошибки разных знаков меняют всю картину гистограмм.

В отличие от первого примера, коррекция спектров с помощью одной из последующих

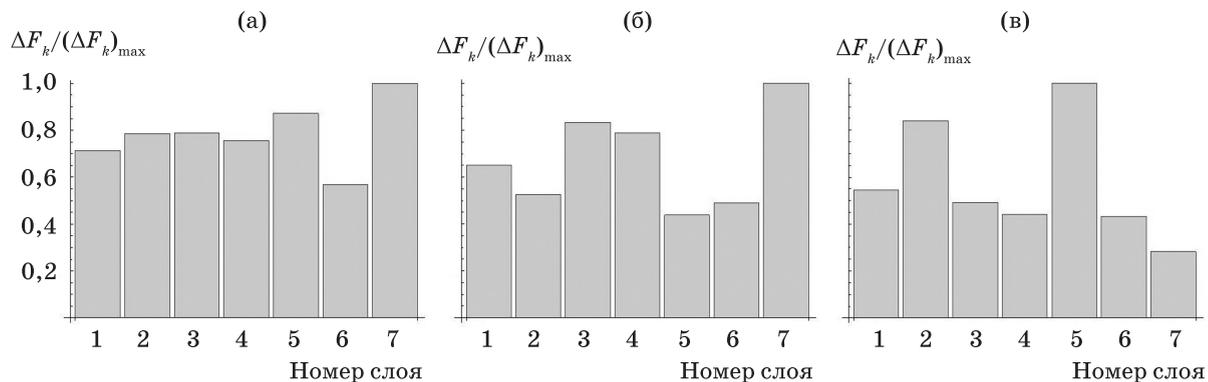


Рис. 4. Гистограммы устойчивости по слоям. а – ошибка $0,01 \lambda_0$, б – ошибка $0,075 \lambda_0$, в – ошибка $-0,075 \lambda_0$.

пленок невозможна. Для нее необходимо использовать не менее двух последующих слоев.

Выводы

Предложена методика, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости синтезированных покрытий на основе исследования трансформации спектров при конечных ошибках в толщинах слоев. Для реализации этой методики создано программное обеспечение на языке Wolfram Mathematica-8.0. Предложенная методика предоставляет возможность уже на первом этапе синтеза покрытия выявить в структуре слоя, которые наиболее критичны к изменению оптической толщины, и прогнозировать их коррекцию в последующих слоях.

Проведен сравнительный анализ методик определения устойчивости спектральных характеристик для полосовых интерференционных фильтров и светоделительных покрытий. Устойчивость, определенная по первой производной функции качества, практически нигде не соответствует реальной. Устойчивость, определенная по второй производной, позволяет выявить в структуре покрытия слой, наиболее критичные к изменению оптической толщины, но при этом количественные расхождения оптических толщин в слоях существуют. Показано, что для полосовых интерференционных фильтров оптимальными являются критерии устойчивости, предложенные нами и в работе [6]. Для светоделительных покрытий из всех рассмотренных методик введенный нами критерий устойчивости дает наилучшие результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
2. Введенский В.Д., Столов Е.Г. Синтез интерференционных оптических покрытий // Оптико-механическая промышленность. 1981. № 7. С. 59–61.
3. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
4. Котликов Е.Н., Прокашев В.Н., Хонинев А.Н., Хонинева Е.В. Синтез светоделительных покрытий // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 8. С. 49–52.
5. Котликов Е.Н., Варфоломеев Г.А., Тропин А.Н. Анализ стабильности спектроделительных интерференционных покрытий // Сб. докл. Завалишенские чтения. СПб ГУАП, 2007. С.137–140.
6. Балышев К.В., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Исследование воспроизводимости выходных параметров многослойных диэлектрических систем во время изготовления // Оптический журнал. Т. 65. № 3. 1998. С. 39–43.
7. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 3. С. 60–64.
8. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Моцарь Е.В., Тропин А.Н. Анализ устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // Опт. и спектр. 2011. Т. 111. №3. С. 525–531.
9. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий // Информационно-управляющие системы. 2013. Т.1. С. 41–46.