

УДК 535.345.6

## СИНТЕЗ КОНТРАСТНЫХ ПОЛОСОВЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ. МНОГОПОЛУВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ

Ю. Н. Марков

Рассматриваются теоретические вопросы конструирования многополуволновых контрастных полосовых интерференционных фильтров, позволяющих выделять как узкие, так и широкие полосы прозрачности. Исследуются предельные возможности классов полуволновых двухкомпонентных покрытий в задаче получения широкополосных фильтров.

Решение задачи конструирования полосового фильтра заключается в определении параметров конструкции интерференционного покрытия, удовлетворяющего заданным величинам ширины полосы прозрачности  $\Delta\lambda/\lambda_n$  (где  $\Delta\lambda = \lambda_d - \lambda_k$  при  $\lambda_d$  длинноволновой,  $\lambda_k$  коротковолновой границах полосы и  $\lambda_n$  длине волны центра полосы) и средней прозрачности в полосе  $D$ . Как отмечается в работах [1-3], в литературе отсутствует единый подход в объяснении принципов конструирования полосовых фильтров для широкого диапазона заданных значений ширины полосы. В зависимости от величины ширины полосы фильтры делятся на узкополосные  $\Delta\lambda/\lambda_n < 0.01$  и широкополосные  $\Delta\lambda/\lambda_n > 0.01$  [2]. Разработанная теория пропускающих фильтров описывает главным образом свойства узкополосных систем [1-4].

С целью поиска различных конструкций, которые могли бы быть использованы в качестве полосовых фильтров, рассмотрим задачу конструирования систем, содержащих в отличие от тройных полуволновых систем (ТПС) [3] более чем три полуволновых слоя. Переход к рассмотрению многополуволновых систем (МПС) позволит изучить широкий ряд конструкций классов полуволновых интерференционных фильтров.

Учитывая структурные особенности ТПС, представим конструкции МПС в форме [5]

$$Gw(q)^m v, \quad (1)$$

$$w = (AB)^{l+1}, \quad q = (BA)^{k+1} B, \quad v = (BA)^{l+1}, \quad \left\{ \begin{array}{l} s = m + 1 \text{ при } l \geq 0, \\ s = m - 1 \text{ при } l = -1, \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$w = (BA)^l B, \quad q = (BA)^{k+1} B, \quad v = (BA)^l B, \quad s = m + 1, \quad (3)$$

$$w = (AB)^{l+1}, \quad q = (BA)^{k+1} (AB)^{k+1}, \quad v = (BA)^{l+1}, \quad \left\{ \begin{array}{l} s = 2m + 1 \text{ при } l \geq 0, \\ s = 2m - 1 \text{ при } l = -1, \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$w = (BA)^l B, \quad q = (BA)^{k+1} (AB)^{k+1}, \quad v = (BA)^l B, \quad s = 2m + 1, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  — четвертьволновые слои относительно длины волны  $\lambda_0$  с показателями преломления  $n_A$  и  $n_B$ ;  $l$  и  $k$  — целые числа, причем  $k \geq 0$  и  $l \geq -1$  для (2), (4),  $l \geq 0$  для (3), (5);  $s$  — число полуволновых слоев в системе.

Известные конструкции ТПС [3] описываются частными вариантами введенных в рассмотрение МПС вида (1)–(5) при ограниченном выборе параметров  $s = 3$ ,  $m = 1$ ,  $m = 2$ ,  $l = 1 \div 4$ ,  $k = 2 \div 8$ .

Используя метод, предложенный в работе [5], получим выражение для средней прозрачности в полосе конструкций МПС (2)–(5) в виде

$$D = \frac{4n}{1+n} \cdot \frac{\varepsilon \cdot n_B}{n + \varepsilon^2 \cdot n_B^2}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \rho^{2l-k+1} \text{ для (2),} & \varepsilon &= \rho^{k-2l+1} \text{ для (3),} \\ \varepsilon &= \rho^{2l-k+\frac{3}{2}} \text{ для (4),} & \varepsilon &= \rho^{k-2l+\frac{1}{2}} \text{ для (5),} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\rho = n_A/n_B$ ,  $n$  — показатель преломления подложки  $G$ .

В конструкциях ТПС предпочтительные соотношения между параметрами  $l$  и  $k$  подбирались методом проб и ошибок на ЭВМ для одной пары значений высокого  $n_H = 2.3$  и низкого  $n_L = 1.36$  показателей преломления слоев [3]. В случае МПС, решая с помощью (6) уравнение  $(dD/dl) = 0$ , находим оптимальные значения  $l$ , соответствующие  $D(l) = \max$ , в следующем виде

$$\text{для (2), (4) } l = t - 1 \text{ и для (3), (5) } l = t, \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \text{для (2), (4) } t &= \{\delta + \tau\}, \\ \text{для (3), (5) } t &= \{\delta - \tau\}, \end{aligned} \right\} \tau = \frac{\ln \frac{\sqrt{n}}{n_B}}{\ln \rho^2}, \quad (9)$$

причем  $\delta = (k+1)/2$  для (2), (3) и  $\delta = (k + \frac{1}{2})/2$  для (4), (5), фигурные скобки в (9) означают округление величин до целых с учетом  $t \geq 0$ .

Уравнение, связывающее определенными условиями параметры  $k$  и  $\rho$  при заданном значении ширины полосы прозрачности, имеет вид [5]

$$\text{sh } y\chi \cdot \sin \mu = \text{sh } \frac{\chi}{2} \text{ при } \left\{ \begin{aligned} y &= k + \frac{3}{2} \text{ для (2), (3),} \\ y &= k + 1 \text{ для (4), (5),} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где

$$\chi = 2 \operatorname{arsh} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{\rho}} + \sqrt{\rho} \right) \cdot \cos \mu \right], \quad \mu = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_n}. \quad (11)$$

Разрешая уравнение (10) относительно параметра  $k$ , получаем соотношения

$$\left. \begin{aligned} \text{для (2), (3) } k &= \left\{ y - \frac{3}{2} \right\}, \\ \text{для (4), (5) } k &= \{y - 1\}, \end{aligned} \right\} y \approx \frac{\operatorname{arsh} \left[ \frac{\text{sh} (\ln \sqrt{\rho})}{\sin \mu} \right]}{\ln \rho}, \quad (12)$$

фигурные скобки в (12) означают округление величин до целых с учетом  $k \geq 0$ .

Согласно (6), (7), (11), соотношения, связывающие величины показателей преломления покрытия при заданных значениях ширины полосы прозрачности и средней прозрачности в полосе, принимают вид

$$\left. \begin{aligned} n_A &= \rho \cdot n_B, \\ n_B &= \frac{n}{\varepsilon} \left[ \frac{2 + \sqrt{4 - \frac{D^2 \cdot (1+n)^2}{n}}}{D \cdot (1+n)} \right], \end{aligned} \right\} \text{ где } \rho = \exp \left[ \pm 2 \operatorname{arsh} \left( \frac{\text{ch } \frac{\chi}{2}}{\cos \mu} \right) \right]. \quad (13)$$

Параметр  $\chi$  в (13) определяется для значений  $k \geq 2$  с помощью итерационной формулы [5]. Для значений  $k=0$ ,  $k=1$  величина  $\rho$  легко находится в явном виде из уравнения (10). На рис. 1 приведены кривые решений уравнения (10) относительно  $\rho$ , описывающие зависимость  $n_H/n_L$  от  $\Delta\lambda/\lambda_n$  при различных значениях  $k$ . Из рис. 1 следует, что при некотором  $n_H/n_L$  большим значениям  $\Delta\lambda/\lambda_n$  соответствуют меньшие значения  $k$ , и наоборот. Следовательно, ввиду ограниченности выбора значений  $k=2 \div 8$  для ТПС мы получаем ограниченный диапазон значений  $\Delta\lambda/\lambda_n$ . На рис. 1 вертикальными штрихпунктирными линиями ограничен диапазон значений  $\Delta\lambda/\lambda_n \sim 0.3 \cdot 10^{-3} \div 0.2$ , принципиально реализуемый на ТПС. В свою очередь ограниченный выбор  $m=1$ ,  $m=2$  для ТПС при низких значениях  $n_H/n_L$ , соответствующих большим значениям  $\Delta\lambda/\lambda_n$  при некотором  $k$ , определяет величины общего числа слоев в системе  $N$ , недостаточно вы-

сокие для получения низкого уровня фона и высокой контрастности. Таким образом, ограниченный набор значений параметров  $s$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $k$  либо вводит соответствующие ограничения на диапазон значений ширины полосы, при задании которых могут быть получены достаточно контрастные фильтры на классах ТПС, либо делает вообще неприменимыми конструкции тройных полуволновых систем.

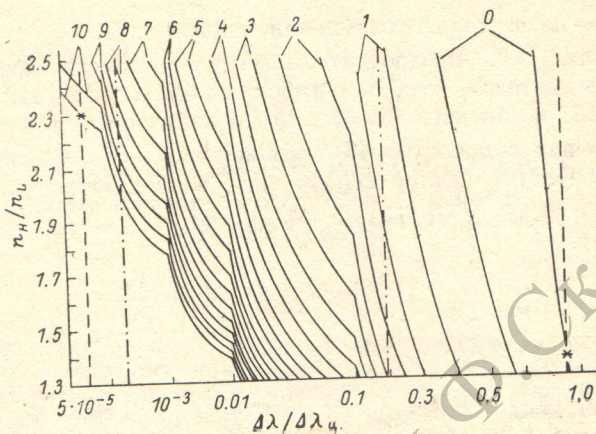


Рис. 1. Семейство кривых, описывающее решение уравнения (10).

Цифры 0, 1, 2, ... 10 выражают величины параметра  $k$ . Каждой цифре соответствует пара кривых, причем левая кривая относится к системам (2), (3), а правая относится к (4), (5).

На рис. 2 кривыми 1 и 3 представлены два примера полосовых фильтров, конструкции которых рассчитаны с помощью формул (8), (9), (12), (13). Параметры фильтров приведены в табл. 1. Один фильтр (кривая 2 соответствует конструкции с дополнительным внешним слоем  $L$ ) является узкополосным с  $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0.75 \cdot 10^{-4}$  при значении  $s=2$ , а второй — широкополосным с  $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0.9$  при  $s=23$ . Значения  $\lambda_0 = \lambda_{пр} = 5.30059625$  мкм (при  $\lambda_0 = 5.3$  мкм) для кри-

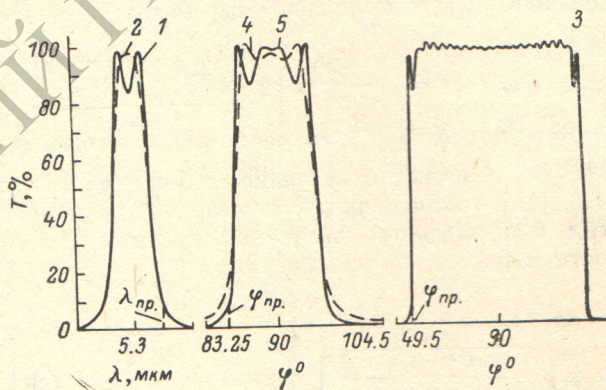


Рис. 2. Коэффициент пропускания полосовых фильтров.

Для кривых 3—5 используется относительная спектральная переменная  $\varphi = \pi\lambda_0/2\lambda$ . Параметры фильтров приведены в табл. 1.

вых 1, 2 узкополосного фильтра и  $\varphi_0 = \varphi_{пр} = 49.5^\circ$  для кривой 3 широкополосного фильтра соответствуют заданным требованиям на ширину полосы и отмечены на рис. 2. Как видно из рис. 2, полученные характеристики с хорошей точностью удовлетворяют заданным требованиям. Положения этих решений, отмеченные знаком «звездочка» на рис. 1, показывают, что использование классов МПС вида (1)—(5) существенно расширяет возможности получения как узкополосных, так и широкополосных фильтров. Выбор  $m > 2$  позволяет для МПС в отличие от ТПС с  $m=1$ ,  $m=2$  существенно снизить фон вне полосы фильтра. Для иллюстрации этого положения на рис. 2 приведены характеристики фильтров с  $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0.15$  для ТПС — кривая 4 и для МПС — кривая 5.

Таблица 1

Параметры фильтров, представленных на рис. 1

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{ц}}$	$D, \%$	Тип системы	$k$	$l$	$m$	$s$	$N$	$n$	$n_A$	$n_B$	Номер кривой на рис. 2
$0.75 \cdot 10^{-4}$	90.48	(3)	10	5	1	2	43	1.395	1.8	4.143	1
0.9	98.30	(4)	0	-1	12	23	25	1.45	2.263	1.651	3
0.15	97.40	(3)	1	1	2	3	17	1.45	1.38	2.053	4
					3	4	23				

Так, в точке  $\varphi=104.5^\circ$  значения коэффициента пропускания составляют 1.285 и 0.220% для конструкций с  $m=2$  ( $s=3$ ) и  $m=3$  ( $s=4$ ) соответственно.

Как видно из рис. 1, существенным ограничением в получении предельных значений  $\Delta\lambda/\lambda_{ц}$  со стороны низких величин ширины полосы является условие на предельное наибольшее число слоев  $N$ , которое ограничивает рост значений  $k$ . С другой стороны, получение широкополосных фильтров с предельно высокими значениями  $\Delta\lambda/\lambda_{ц}$  ограничено низким уровнем  $n_H/n_L$  при  $k=0$ . Действительно, реализация широкополосного полуволнового фильтра при низком значении  $n_H/n_L$  требует большого числа  $m$  для получения достаточной контрастности, что также ограничено условием на наибольшее  $N$ . На рис. 1 вертикальными штриховыми линиями отмечен диапазон значений  $\Delta\lambda/\lambda_{ц} \sim 0.75 \cdot 10^{-4} \div 0.9$ , принципиально реализуемый на конструкциях МПС.

Для демонстрации возможностей метода в получении заданных значений ширины полосы при заданных величинах  $n_H, n_L$  расчет численных примеров проводился для вариантов с  $\Delta\lambda=0.1$  мкм,  $\Delta\lambda=0.2$  мкм на парах веществ  $ZrO_2-SiO_2$ ,  $TiO_2-SiO_2$  и для вариантов с  $\Delta\lambda=1$  мкм,  $\Delta\lambda=2$  мкм на парах веществ  $ZnS-Na_3AlF_6$ ,  $Ge-SiO$ . В табл. 2, 3 приведены параметры рассчитанных

Таблица 2

Параметры фильтров для пар веществ  $ZrO_2$  ( $n_H=1.97$ ) —  $SiO_2$  ( $n_L=1.45$ ),  $TiO_2$  ( $n_H=2.3$ ) —  $SiO_2$  ( $n_L=1.45$ ) на подложке — кварц КИ ( $n=1.45$ )

$\lambda_{к},$ мкм	$\lambda_{д},$ мкм	$\lambda_{о},$ мкм	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{ц}}$	Тип системы	$n$	$n_A$	$n_B$	$k$	$l$	$s$	$m$	$N$	$D, \%$	Номер кривой на рис. 3
0.9	1.0	0.947	0.105	(5)	1.45	2.3	1.45	3	2	3	1	23	98.20	1
				(4)	1.45	1.97	1.45	4	1	3	1	25	98.25	2
0.7	0.8	0.747	0.133	(2)	1.45	2.3	1.45	2	0	4	3	21	94.68	3
0.8	0.9	0.847	0.117	(3)	1.45	1.45	1.97	3	1	4	3	29	97.59	4
1.4	1.6	1.493	0.133	(2)	1.45	1.45	2.3	2	1	4	3	25	96.63	5
1.7	1.8	1.749	0.057	(3)	1.45	1.45	1.97	5	2	3	2	33	97.59	6
1.9	2.1	1.995	0.100	(5)	1.45	1.45	1.97	4	1	5	2	41	94.72	7
2.2	2.3	2.249	0.044	(2)	1.45	2.3	1.45	4	1	4	3	37	94.68	8
2.4	2.6	2.496	0.080	(2)	1.45	1.97	1.45	4	1	4	3	37	97.59	9

Таблица 3

Параметры фильтров для пар веществ  $ZnS$  ( $n_H=2.2$ ) —  $Na_3AlF_6$  ( $n_L=1.35$ ),  $Ge$  ( $n_H=4.0$ ) —  $SiO$  ( $n_L=1.8$ ) на подложке —  $BaF_2$  ( $n=1.45$ )

$\lambda_{к},$ мкм	$\lambda_{д},$ мкм	$\lambda_{о},$ мкм	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{ц}}$	Тип системы	$n$	$n_A$	$n_B$	$k$	$l$	$s$	$m$	$N$	$D, \%$	Номер кривой на рис. 3
5	6	5.455	0.182	(4)	1.45	2.2	1.35	2	0	5	2	23	97.48	10
4	5	4.444	0.222	(3)	1.45	2.2	1.35	1	1	5	4	21	97.66	11
3	5	3.750	0.500	(3)	1.45	1.35	2.2	0	0	10	9	19	97.66	12
4	6	4.800	0.400	(2)	1.45	4.0	1.8	0	-1	4	5	11	91.05	13

с помощью формул (8), (9), (12) конструкций полосовых фильтров. Выбор параметра кратности  $m$  осуществляется при достижении требуемой контрастности фильтра. На рис. 3 представлены спектральные характеристики вариантов конструкций, описанных табл. 2, 3. С целью оценки точности оптимального расчета значений  $l$  и  $k$  на рис. 3 приведены кривые 14, 15, соответствующие отклонениям  $l_{\text{опт}} + 1$  и  $k_{\text{опт}} + 1$ .

Сравним предлагаемый способ формирования полосовых фильтров с известным методом, основанным на совмещении в единую комбинацию систем длинноволнового и коротковолнового отрезающих фильтров с последующей оптимизацией конструкции машинным способом [6] или методом эквивалентных слоев [7]. На рис. 4 приведены характеристики конструкции

$$G1.3HLHLHLHLHLHLHLH1.67L0.67(HLHLHLHLHLHL)0.25HG_0, \quad (14)$$

полученной в работе [6] методом совмещенных отрезающих систем (кривая 1) и конструкции

$$GHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHG_0, \quad (15)$$

полученной методом, описанным в настоящей работе (кривая 2). К достоинствам конструкций, подобных (14), можно отнести более широкие зоны подавления прозрачности, чем на конструкциях многополуволновых фильтров типа (15). Однако почти всегда основной характеристикой, определяющей смысл фильтрации как операции, увеличивающей отношение сигнал/шум, является высокая контрастность в заданном спектральном интервале [2]. В этом плане периодические конструкции многополуволновых систем, рассмотренные выше, являются более предпочтительными по сравнению с конструкциями совмещенных отрезающих систем, которые при одинаковом с МПС общем числе слоев уступают им по крутизне

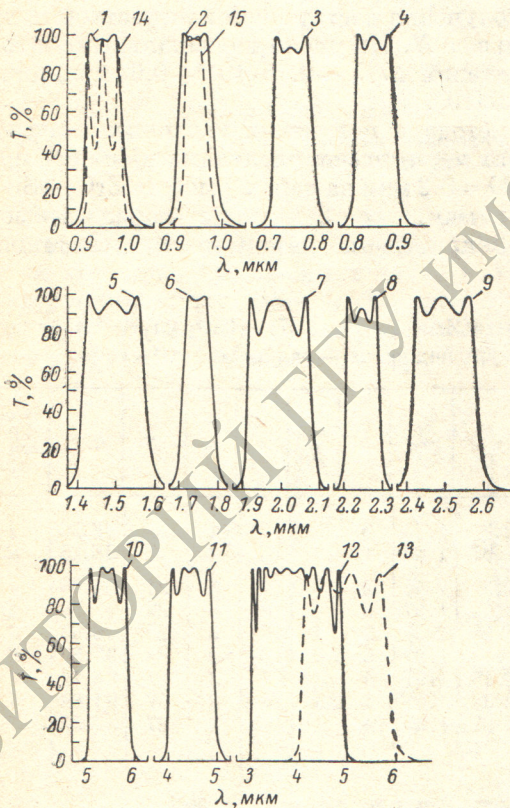
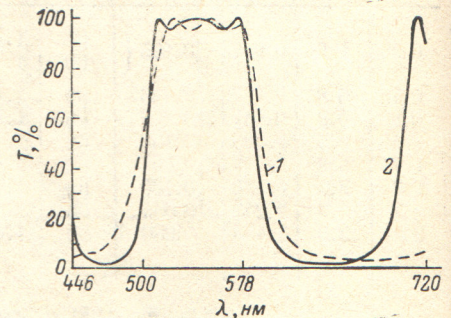


Рис. 3. Коэффициент пропускания полосовых фильтров. Параметры фильтров приведены в табл. 2, 3.

Рис. 4. Коэффициент пропускания полосовых фильтров.

Кривые 1 и 2 относятся к системам (14) и (15) соответственно при выборе  $n=1.516$ ,  $n_{G_0}=1.52$ ,  $n_H=1.96$  ( $\text{HfO}_2$ ),  $n_L=1.46$  ( $\text{SiO}_2$ ),  $\lambda_0=661$  нм для (14),  $\lambda_0=543$  нм для (15).



коротковолнового и длинноволнового фронта кривой пропускания, а также имеют более высокий уровень фона в зонах подавления прозрачности. Сравнение кривых 1, 2 на рис. 4 показывает, что конструкция (15), имея меньше на восемь слоев общее число слоев  $N$  и обладая более простой в плане технической реализации структурой, удовлетворяет требованию выделения заданной

области 500–578 нм при обеспечении более высокой по сравнению с (14) контрастности полосы.

Как следует из рис. 1, набор целых значений параметра  $k$  определяет для заданной пары веществ дискретность значений ширины полосы прозрачности. Причем интервал дискретности увеличивается с ростом величины  $\Delta\lambda/\lambda_c$ . Таким образом, условие ограниченного набора пар пленкообразующих веществ может затруднять получение заданной величины ширины полосы прозрачности для диапазона предельно высоких значений  $\Delta\lambda/\lambda_c$ . В то же время, как показывают рассмотренные выше примеры (табл. 2, 3 и рис. 3), это условие может оказаться несущественным в широком диапазоне более низких заданных значений  $\Delta\lambda/\lambda_c$ .

Задача выделения полос прозрачности, которые нельзя вследствие дискретности изменения  $\Delta\lambda/\lambda_c$  достаточно точно сформировать, используя известные классы многополуволновых систем, а также задача оптимизации полосовых интерференционных фильтров в части сглаживания осцилляций величины коэффициента пропускания в полосе прозрачности будут рассмотрены в следующей работе.

#### Литература

- [1] H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters. London, 1969.
- [2] Н. А. Борисевич, 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.
- [3] Z. K n i t t l. Optics of Thin Films. Wiley, New York, 1976.
- [4] Ш. А. Ф у р м а н. Тонкослойные оптические покрытия. Машиностроение, П., 1977.
- [5] Ю. Н. М а р к о в, Е. А. Н е с м е л о в, И. С. Г а й н у т д и н о в. Опт. и спектр., 49, 990, 1980.
- [6] Ш. А. Ф у р м а н. Опт. и спектр., 50, 101, 1981.
- [7] L. I. E r s t e i n. J. Opt. Soc. Am., 42, 806, 1952.

Поступило в Редакцию 29 января 1981 г.