УДК 535.345.67

Ф. А. КОРОЛЕВ, А. Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА

СИСТЕМЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ СВЕТА *

Различные виды интерференционных светофильтров находят широкое применение в современной экспериментальной технике. Нередко они используются в наклонных и расходящихся световых пучках, что делает необходимым учет изменения их характеристик: положения максимума полосы пропускания, ширины полосы 26 λ , формы контура полосы и др. Нашей задачей является рассмотрение угловых свойств различных систем светофильтров и возможности их использования в качестве угловых, так как этот вопрос недостаточно освещен в литературе.

Изменение свойств светофильтра как многослойной системы при наклонном падении света связано с изменением эффективной оптической толщины слоев, которая выражается как $nh\cos\theta$ (где θ — угол преломления в слое), и с изменением френелевских амплитудных коэффициентов отражения и пропускания на границах слоев [1].

Известное соотношение, дающее зависимость смещения полосы $\Delta \lambda_m / \lambda$ светофильтра, состоящего из двух зеркал и разделительного слоя с толщиной $nh = k \lambda_0 / 2$, имеет вид [1]

$$\frac{-\Delta\lambda_m}{\lambda} = \frac{\theta^2}{2} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta\lambda_m}{\lambda} = \frac{\theta_0^2}{2n^2}, \tag{1}$$

где n_p — показатель преломления разделительного слоя фильтра, θ — угол преломления в разделительном слое, θ_0 — угол падения света на систему. Для расходящегося конического пучка света относительный сдвиг $\Delta\lambda_m/\lambda$ в два раза меньше, чем для параллельного лучка. Определяя апертуру светофильтра как значение угла падения света, при котором смещение $\Delta\lambda_{\rm M}$ полосы равно ширине полосы пропускания $2\delta\lambda$, можно найти следующее выражение для апертуры:

$$\theta_{\max} = n \sqrt{\frac{4\delta\lambda}{\lambda}} - для параллельного пучка света,$$

$$\theta_{\max} = 2n \sqrt{\frac{2\delta\lambda}{\lambda}} - для конического пучка.$$
(2)

В табл. 1 приведены апертурные углы светофильтров, имеющих разделительные слои с высоким n_H и низким n_L показателями преломления в диапазоне от 2,3 до 1,34, которые наиболее часто применяются на практике. Таблица показывает, что наилучшие угловые свойства, т. е. наибольшие наклоны, допускают светофильтры с высоким показателем преломления разделительного слоя, например осуществленные на основе веществ: ZnS, ZnSe, Ge, PbF₂ и т. д. Однако на практике применяются светофильтры и с низким n разделительного слоя, например осуществленные на основе веществ: ZnS, ZnSe, Ge, PbF₂ и т. д. Однако на практике применяются светофильтры и с низким n разделительного слоя, например, в системах для ультрафиолетовой области спектра

в связи с их преимуществами в отношении малых коэффициентов поглощения.

Светофильтры с широкой полосой пропускания допускают работу при больших наклонах светового пучка, 20—35° (см. θ_{m1} табл. 1), тогда как монохроматические светофильтры с полосой ~3—5 Å требуют, чтобы наклон и расходимость пучка были не более 3—5°. В тех случаях, когда смещение полосы, равное ее ширине 28 λ , является

Таблица 1

	п раздели- тельного слоя	Ширина полосы 26 λ , $\stackrel{\circ}{A}$ ($\lambda = 5000$ $\stackrel{\circ}{A}$)									
Тип светового пучка		100	50	20	10	5	3	1			
		Апертуры θ° тах									
_		θ_{m1}	θ _{m2}	θ_{m_3}	θ_{m4}	θ_{m5}	0 ₇₆	θ _{m7}			
Парал- лельный	2,30 1,90 1,34	32,64 21,78 19,03	18,67 15,40 10,86	11,80 9,74 6,87	8,35 6,88 4,86	5,90 4,87 3,44	$4,56 \\ 3,77 \\ 2,66$	3,26 2,18 1,53			
Коничес- кий	2,30 1,90 1,34	37,2 30,80 21,70	26,40 21,78 15,36	16,68 13,77 9,72	11,80 9,74 6,87	8,34 6,89 4,86	6,45 5,33 3,76	3,73 3,08 2,17			
Относительный сдвиг полосы = $= 2\delta\lambda/\lambda_{max}$		2.10-2	1.10-2	4 · 10-3	2·10-3	1.10-3	6,1.10-4	2.10-4			

Апертурные углы светофильтров

слишком грубым, берется меньшее значение апертуры светового пучка. Например, если угловой сдвиг полосы не должен превышать $2\delta\lambda/10$, по формуле (2) находим, что значение θ_{max} пучка необходимо взять в 3,16 раза меньше табличного; таким образом, для светофильтра с шириной полосы 5 Å (n_H ==2,3) апертурный угол равен $\approx 2^\circ$. В этих условиях эффективность работы светофильтра очень высока. Приведенные простые формулы для угловых сдвигов полос и апертурных углов хорошо работают в диапазоне углов, при которых не происходит значительного расщепления полосы пропускания на две компоненты, соответствующие *s*- и *p*-составляющим поляризации светового пучка.

Более точно угловые зависимости светофильтров типа интерферометра Фабри—Перо могут быть описаны с учетом спектрального хода скачков фазы $\beta_{s,p}$ на многослойных зеркалах, граничащих с разделительным слоем. Известно, что условие максимума интерференции выражается соотношениями

$$\frac{2nh}{\lambda_m}+\frac{\beta_{s,p}}{\pi}=k,$$

откуда находим положение максимумов полос пропускания в виде

$$\lambda_{ms} = \frac{2nh\cos\theta}{k - \beta_s/\pi} - для \ s$$
-компоненты полосы,

$$\lambda_{mp} = \frac{2nh\cos\theta}{k - \beta_p/\pi} - для \ p$$
-компоненты полосы,
(2')

где nh — оптическая толщина разделительного слоя, θ — угол преломления света в разделительном слое, k — порядок интерференции разделительного слоя. Как следует из формул (2), различие фазовых скачков ($\beta_s \neq \beta_p$) при наклоне ведет к различию λ_{\max} для *s*- и *p*-компонент пучка, т. е. к расщеплению полосы на две.

Скачки фазы при отражении от зеркал почти линейно зависят от λ_0/λ в области максимального отражения зеркал [2, 3]. На рис. 1 представлены спектральные кривые $\beta_s(\lambda_0/\lambda)$ и $\beta_p(\lambda_0/\lambda)$ для случаев, когда показатель преломления разделительного слоя имеет высокое (*I*) и



Рис. 1. Спектральный ход фазовых сдвигов для s- и p-поляризованного света $\beta_s(\lambda_0/\lambda)$, $\beta_p(\lambda_0/\lambda)$: $I - для зеркала HL. HL, <math>n_H = n_{N+1} = 2,3$, $n_L = 1,34$, $n_0 = 1,52$; II - для зеркала HL ... LH, $n_H = 2,3, n_L = n_{N+1} = 1,34$, $n_0 = 1,52$

низкое (II) значение $(\lambda_0/\lambda = \varkappa = 1$ соответствует длине волны, при которой оптическая толщина слоев зержала равна λ₀/4). Фазовые скачки β_s и βp рассчитаны матричным методом с использованием.ЭВМ типа БЭСМ-4 [4]. Характерные особенности фазовых скачков — антисимметрия в области плато отражения зеркала и более пологий ход β_s—наблюдаются во всех системах зеркал, за исключением зеркал на подложках с высоким n (при условии $n_N = n_1$, $n_{N+1} = 1$). Точка пересечения β_s и β_p не лежит на оси ĸ $(=\lambda_0/\lambda);$ для случая разделительных слоев с п_н она лежит в области отрицательных значений в, а для разделителей с n_L она лежит выше оси и. Величина фазовых скачков слабо зависит от числа слоев зеркала N при значениях R, близких к единице. Поведение фазовых скачков на границах разделительного слоя с учетом соот-(2)ношений позволяет объяснить картину расположения расщепленных

полос светофильтра k-го порядка при наклоне; при общем смещении всех полос в коротковолновую сторону *р*-полосы всех порядков с номерами больше или меньше k лежат ближе к k-й полосе, чем *s*-полосы с двух сторон от λ_{\max} .

Компоненты центральной полосы k-го порядка располагаются в зависимости от n разделительного слоя: у светофильтров с разделительным слоем n_H компонента p находится с коротковолновой стороны, у светофильтров с разделительным слоем n_L компонента s более коротковолновая. Из рассмотрения этих свойств, а также фазовых кривых следует возможность построения светофильтров, у которых нет расщепления полосы пропускания при наклоне [5]. Для этого достаточно изменить оптическую толщину разделительного слоя светофильтра nh так, чтобы максимум полосы пропускания оказался в точке $\varkappa_1(\lambda_1)$, где фазы β_s и β_p пересекаются, т. е. имеют одно значение. Соответствующее значение nh определяется из условия максимума (2).

$$nh = \lambda_1 \frac{k - \beta_{s,p}/\pi}{2\cos\theta}$$
, где $\beta_s = \beta_p$. (3)

Таким образом, зная ход фазовых скачков, легко построить светофильтр с нерасщепленной полосой пропускания для определенного угла падения света. Например, для случая светофильтра типа HL...HL— —2Н—LH…LH при $\theta_0 = 45^{\circ}$ и соответственно соз $\theta_p = 0.9516$ находим (см. рис. 1): $\varkappa_1 = 1.114$, $\beta_s = \beta_p = \beta_{s,p} = -0.047$, $\lambda_1 = \lambda_0/\varkappa$ (слои ZnS— Na₃AlF₆). Из соотношения (3) определяется значение оптической толщины разделительного слоя $nh = 0.480\lambda_0$. Для светофильтра с разделительным слоем 2L состава HL…LH—2L—HL…LH таким же путем находим $nh = 0.523\lambda_0$. Светофильтр на основе Ge-фторида для $\theta_0 = 45^{\circ}$ имеет нерасщепленную полосу при $nh = 0.460\lambda_0$. Найденные значения nh не сильно отличаются от обычной величины, равной $0.5\lambda_0$; они осуществляются в первом случае недопылением, а во втором случае перепылением толщины разделительного слоя. Дополнительный сдвиг полосы за счет изменения nh легко учитывается заранее при изготовлении системы.

Совмещение s- и p-компонент полосы при наклоне может быть достигнуто также корректировкой показателя преломления разделительного слоя, как будет показано далее. В процессе работы со светофильтрами, однако, редко приходится прибегать к описанной операции, поскольку для большого диапазона систем светофильтров и углов наклона достаточен точный учет спектрального сдвига полос и их относительного уширения [6].

Подробное изучение угловых свойств различных систем светофильтров, проводившееся авторами с помощью матричного метода расчета [1, 4], позволило выявить некоторые общие закономерности, обсуждаемые ниже. В табл. 2 приведены спектральные координаты $\varkappa_m (=\lambda_0/\lambda_m)$ смещенных максимумов полос пропускания светофильтров, включая s- и p-компоненты, а также положение коротковолновой \varkappa_{κ} н длинноволновой \varkappa_{π} границ контура полосы (на уровне $T_{max}/2$) для светофильтров, построенных на сочетаниях веществ, широко применяемых на практике в интервале углов падения света 0—60°. Разделительные слои большинства светофильтров взяты с высоким показателем преломления, поскольку такие системы отличаются меньшим сдвигом полос при наклоне и наиболее эффективны в работе; 4-я система табл. 2 содержит данные для светофильтра с разделительным слоем 2L (фторид). Влияние порядка интерференции фильтра иллюстрируется на примере светофильтра 3-го порядка (система 3 табл. 2).

Смещение максимума полосы пропускания является основной угловой характеристикой светофильтра. При наклоне полосы всегда смещаются в коротковолновую часть спектра; сдвиг сильнее для систем, построенных на сочетаниях веществ с меньшей величиной показателей преломления. Так, системы светофильтров PbF₂(n_H=1,9)-—Na $_{3}$ AlF $_{6}(n_{L}$ =1,34) имеют наибольший относительный сдвиг полос (система 1 табл. 2), а светофильтры $Ge(n_H=4,0)$ —Na₃AlF₆ $(n_L=1,34)$ отличаются вдвое меньшей величиной сдвигов (см. систему 5 табл. 2). Сравнивая системы 2 и 4 таблицы, видим, что точный расчет подтверждает вывод о меньшей величине сдвига полос для светофильтров с высоким показателем преломления разделительного слоя. Смещение полос пропускания фильтра слабо зависит от числа слоев зеркал и может служить для оценки поведения светофильтров на основе данного сочетания веществ. Сдвиг полос уменьшается с ростом порядка светофильтра k, однако, как видно из формул (2), он ограничен величиной λ=-λ₀cosθ_{разд}. Для светофильтров ZnS--Na₃AlF₆ увеличение порядка до 10 уменьшает относительный сдвиг полос на 1/3 (см. также систему 3 табл. 2).

При угловом перемещении полосы светофильтра коэффициент пропускания $T_{\rm max}$ сохраняет значение, близкое к 1 для обеих компонент поляризации *s* и *p*, поскольку рассматриваются непоглощающие мно-

Угловые характеристики светофильтров

_		×	Угол θ_{0}								
			0° 15°		30°		45°		60°		
R	Состав светофильтра		Положение полосы для р, s-компонент								
CNCTEM			×	×p	×s	×p	×s	×p	×s	×р	×s
1	$\underbrace{\begin{array}{c} PbF_2-Na_3AlF_6\\ HL\dots HL-2H-\\ \hline 12\\ -LH\dots LH\\ 12 \end{array}}_{12}$	κ _m κ _k κ _g	1,000 1,002 0,998	1,013 1,016 1,011	1,013 1,0155 1,0113	1,054 1,057 1,050	1,053 1,054 1,051	1,118 1,124 1,112	1,114 1,115 1,113	1,199 1,212 1,186	1,187 1,188 1,186
2	$\underbrace{\begin{matrix} ZnS-Na_3AlF_6\\ HL\dots HL-2H-\\ \hline 8\\ -LH\dots LH\\ \hline 8\end{matrix}}_{R}$	х _т х _к х _д	1,000 1,002 0,998	1,012 1,015 1,010	1,012 1,0145 1,010	1,044 1,048 1,040	1,043 1,045 1,041	1,097 1,103 1,092	1,092 1,092 1,089	1,163 1,174 1,152	1,145 1,146 1,144
3	$\underbrace{\begin{matrix} \text{ZnS}-\text{Na}_{3}\text{AlF}_{6}\\ \text{HL}\dots\text{HL}-3(2H)-\\ \hline 8\\ -\underline{LH}\dots\text{LH}\\ \hline 8\end{matrix}}_{8}$	я я я я	1,000 1,001 0,999	1,010 1,012 1,009	1,010 1,011 1,009			1,077 1,080 1,074	1,071 1,072 1,0705		
4	$\underbrace{\begin{matrix} ZnS-Na_{g}AlF_{6}\\ HL\dots LH-2L-\\ 9\\ -\underbrace{HL\dots LH}_{9} \end{matrix}$	Nm NK Ng	1,000 1,0018 0,999	1,015 1,017 1,0135	1,015 1,014 1,0165	1,057 1,0595 1,055	1,0585 1,059 1,057	1,124 1,128 1,120	1,1305 1,1315 1,130	1,205 1,197 1,213	1,225 1,2255 1,2245
5	Ge—Na3AlF6 HLHL—2H—LHLH	κ κ κ	1,000 1,002 0,998	1,006 1,008 1,004	1,006 1,008 1,005	1,024 1,026 1,020	1,024 1,025 1,021	1,056 1,060 1,052	1,048 1,049 1,047	1,095 1,103 1,088	1,0745 1,075 1,074

гослойные системы. Коэффициент пропускания для неполяризованного света равен $(T_s+T_p)/2$, следовательно, его величина зависит от степени перекрытия полос *s* и *p* при данном *w*. При нормальном падении света контуры *s* и *p* полос совпадают, ширина полос одинакова. С ростом угла наклона ширина *s*- и *p*-полос изменяется: *p*-полоса уширяется, *s*-полоса сужается (рис. 2). В табл. 2 ширина полосы дается разностью *w* границ контура, т. е. значением $\varkappa_{k}-\varkappa_{k}$. В диапазоне углов, при которых перекрытие *s*- и *p*-контуров хорошее, светофильтр работает эффективно. Например, для светофильтров PbF₂—Na₃AlF₆ наблюдается хорошее перекрытие *s*- и *p*-контуров до больших значений углов поворота $\approx 45^{\circ}$, хотя сдвиг полос значителен. Для систем Ge—Na₃AlF₆ сдвиг полос меньше, однако уже при наклонах порядка 45° *s*- и *p*-полосы плохо перекрываются, следовательно, для этих систем полезной является операция совмещения полос введением разделительного слоя

60

с корректировкой показателя преломления (см. кривые 2 рис. 2). Возможности такой корректировки следуют из сравнения поведения *s*- и *p*-полос при наклоне для светофильтров, имеющих разделительные слои с n_H и n_L (системы 2 и 4 табл. 2). В первом случае больший сдвиг имеет *p*-компонента, во втором случае — *s*-компонента, следовательно, существует значение *n* разделительного слоя, при котором компоненты имеют одинаковый сдвиг. Искомое значение $n_{\text{разд}}$ легко определяется графически: для случая ZnS—Na₃AlF₆-фильтра $n_{\text{разд}} = 1,84$.

С ростом угла наклона возрастает фон светофильтра, определяемый выражением $(1-R)^2/(1+R)^2$, где R — коэффициент отражения зеркал фильтра. Изменение R зеркал нами приведено в работе [4]: оно существенно при углах падения

света $\theta_0 \ge 45^\circ$ для большинства систем (ZnS—Na₃AlF₆, PbF₂— —Na₃AlF₆ и др.). Падение *R* на величину $\approx 5\%$ ведет к увеличению фона в 5 раз в этом случае.

Кроме описанных светофильтров на практике применяются более сложные системы, к которым относятся узкополосные светофильтры высокой контрастности и полосовые светофильтры с заданной шириполосы ной пропускания. Такие светофильтры содержат в составе симметричных фильтров типа m HL...HL-(2H)k-LH...LH или типа HL...LH-(2L)k-HL....LH, где число слоев зеркала HL...HL (или HL...LH) может изменяться от до 10-20. В зависимости от этого числа ширина полосы изменяется от тысяч А до 1-3 А. Простые свето-

фильтры в системе сложного обычно соединяются слоями с низким показателем преломления. Состав полосового, или контрастного, фильтра может быть обозначен также $\{HL...HL-(2H)k-LH...LH\}^m$, где m—число простых светофильтров. Как было показано ранее [7], полосовые светофильтры характеризуются резким спадом интенсивности на крыльях, а величина контрастности возрастает в *m*-й степени (при отсутствии дефектов в слоях). В составе сложного светофильтра могут быть светофильтры с разным числом слоев, т. е. с разной шириной полосы пропускания, в этом случае один светофильтр задает ширину полосы, а второй—с более широкой полосой—служит для подавления фона на крыльях полосы узкополосного светофильтра.

Рассмотрим угловые свойства светофильтров указанных типов. Если светофильтр состоит из нескольких одинаковых симметричных фильтров, то при наклоне их полосы пропускания накладываются, сохраняется высокий коэффициент пропускания для *s*- и *p*-полос. Характер угловых изменений остается тем же, что у единичного светофильтра: сдвиг полос и их ширина определяются типом разделительных слоев и порядком *k*, раздвоение полос наступает при тех же значениях θ_0 . Угловые свойства таких светофильтров могут быть выведены из табл. 2.

В случае, когда система имеет в составе светофильтры с узкой и широкой полосой пропускания, при наклоне узкая полоса остается



Рис. 2. Контуры полос пропускания светофильтров: $1 - HL ... HL - 2H - LH ...LH, n_H =$ $= 2,3, n_L = 1,34, n_0 = 1,52, \theta_0 = 0^\circ; 2 HLH2DHLH, n_H = 4,0, n_L = 1,34, n_D =$ $= 2,3, n_0 = 1,52, \theta_0 = 45^\circ; 3 - систе$ ма 1, $\theta_0 = 45^\circ, 4$ - система 1, $\theta_0 = 60^\circ$

в зоне широкой полосы, двигаясь вместе с ней в коротковолновуючасть спектра, картина опять повторяет закономерности единичного светофильтра.

В более широкополосных системах контрастных светофильтров $(2\delta\lambda \ge 50 \text{ Å})$ не наступает раздвоения полосы пропускания вплоть до значительных углов наклона $(\theta_0 \ge 45^\circ)$; р-полоса настолько широка, что s-полоса при сдвиге остается в пределах p-полосы. В результате наблюдается лишь небольшое изменение симметрии полосы $(T_s + T_p)/2$. Таким образом, светофильтры высокой контрастности со средним значением ширины полос $(2\delta\lambda \approx 50-100 \text{ Å})$ отличаются хорошей устойчивостью контура полосы, поэтому они являются эффективными угловыми системами. В двойных контрастных системах фильтров, построенных с недостатком слоя в среднем массиве зеркала по типу

$$\left(N\frac{\lambda}{4}\right)\frac{\lambda}{2}\left[\left(2N-1\right)\frac{\lambda}{4}\right]\frac{\lambda}{2}\left(N\frac{\lambda}{4}\right),$$

при наклоне *s*-полоса — обычная, а *p*-полоса обнаруживает двугорбуюструктуру вершины пика со снижением T_{\max} в центре полосы на несколько процентов; угловые характеристики в остальном остаются того же типа.

Необходимо обратить внимание на то, что ряд систем не может использоваться в качестве угловых: это системы светофильтров, в которые входят фильтры с различными показателями преломления разделительных слоев или светофильтры разного порядка k. Причиной является различный сдвиг полос частей фильтра, полосы при этом плохо перекрываются, что ведет к занижению $T_{\rm max}$ всей системы светофильтра. Например, полоса пропускания системы двойного фильтра ZnS—Na₃AlF₆ типа $\left(4\frac{\lambda}{4}\right)\frac{\lambda}{2}\left(10\frac{\lambda}{4}\right)\frac{\lambda}{2}\left(5\frac{\lambda}{4}\right)$ с разделительными слоями $\lambda/2$ из ZnS и Na₃AlF₆ при угле наклона 45° имеет $T_{\rm max} \approx 31\%$, тогда как близкий по составу двойной светофильтр $\left(4\frac{\lambda}{4}\right)\frac{\lambda}{2}\left(9\frac{\lambda}{4}\right) \times \frac{\lambda}{2}\left(4\frac{\lambda}{4}\right)$ с разделительными слоями ZnS имеет при том же наклоне-

Полосовые системы с широкой полосой пропускания порядка сотен и тысяч ангстрем осуществляются из серий $\{HLHL-(2H)\ k-LHLH\}^m$, $\{HL-(2H)\ k-LH\}^m$, $(2H-L)^m$ и др. (слои H и L могут меняться местами). Эти системы удобнее характеризовать положением центра симметрии области пропускания \varkappa_0 , положением границ $\varkappa_{д\pi}$ и $\varkappa_{кор}$. Коэффициент пропускания полосовых систем имеет высокое значение (≈ 1) в области пропускания и малый фон вне этой области. Как указывалось ранее, широкополосные системы не имеют раздвоения полос пропускания при наклоне, хотя и для них характерно расщепление спектра пропускания на s- и p-составляющие. При этом s-составляющая всегда связана с возрастанием отражения зеркал и, следовательно, имеет меньшую ширину области пропускания. s-область, пропускания светофильтра при наклоне остается внутри p-области, испытывая сдвиг такого же порядка, как и p-составляющая. Для широкополосных систем изменение ширины s- и p-полос менее существенно, чем для узкополосных светофильтров: ширина полосы изменяется. лишь на 10-15% при наклоне $\theta_0 \approx 45^\circ$.

62

 $T_{\rm max} \approx 98\%$.

На рис. З приведены спектры пропускания двух полосовых систем на основе ZnS—Na₃AlF₆ при углах падения 0 и 45°. Из рисунка видна высокая эффективность полосовых систем при использовании их в качестве угловых; сохраняется высокий коэффициент пропускания, достаточная крутизна границ и малая величина фона. Интересно, что для полосовых систем характерна та же величина углового сдвига центра области пропускания, как и для узкополосных фильтров, зависящая от материала слоев, толщины и показателя преломления разделительных слоев. Например, система *I* рис. 3 с $n_{\text{разд}}$ ==1,34 (Na₃AlF₆)

имеет ищентр = 1,13 (ср. с системой 4 табл. 2); система ІІ имеет значение ищентр=1,09, равное смещенному ит для систем фильтров с n_{разп}=2,3 (ZnS). Таким образом, и для широкополосных систем положение центра полосы \varkappa_m может быть оптабл. 2. Смещение ределено ИЗ границ полосы пропорционально сме-Чтобы шению центра. определить координаты смещенных границ, необходимо координату границы \varkappa_{rn} при $\theta_0 = 0^\circ$ умножить на координату центра ит. Так, для полосы пропускания системы І положение ко- $\theta_0 = 45^\circ$ ротковолновой границы при равно $\varkappa_{\text{кор}} = 1,09 \times 1,13 = 1,23,$ будет



Рис. 3. Кривые пропускания полосовых светофильтров при $\theta_0=0$ и 45°: I — система (H2LH)⁴; II — система L2HL2H ... L2H, $n_H=2,3$; $n_L=1,34$, $n_0=1,52$

положение длинноволновой границы $\varkappa_{дл} = 0.91 \times 1.13 = 1.03$ (см. рйс. 3, *I*). Угловые характеристики светофильтров, приведенные здесь, хорошо подтверждаются экспериментально для светофильтров различного состава, работающих в видимой, УФ- и ИК-области спектра. Например, для двукратных светофильтров высокой контрастности с $2\delta\lambda = 10$ и 25 Å экспериментальные значения \varkappa_m совпадают с расчетными (табл. 2) с точностью до 0,001.

Авторы благодарят за помощь в расчетах систем А. И. Дмитриева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. М., 1958. 570 с.
- Сухановский В. В. Теоретическое и экспериментальное исследование амплитудных и дисперсионно-фазовых характеристик многослойных двухкомпонентных диэлектрических отражателей. Автореф. канд. дис. М., 1959.
 Клементьева А. Ю., Тихонравов А. В. Исследование амплитудно-фазо-
- Клементьева А. Ю., Тихонравов А. В. Исследование амплитудно-фазовых характеристик диэлектрических зеркал с учетом поглощения в слоях.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1978, 19, № 3, с. 75—81.
 Королев Ф. А., Клементьева А. Ю. Об угловых свойствах интерференци-
- Королев Ф. А., Клементьева А. Ю. Об угловых свойства́х интерференционных многослойных зеркал и их применении.— Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1980, 21, № 5, с. 42—49.
 Зартов Г. Д. Интерференционные светофильтры с нерасщепляющейся полосой
- Зартов Г. Д. Интерференционные светофильтры с нерасщепляющейся полосой пропускания при наклонном падении света. Автореф. канд. дис. Харьков, 1975.
 Голубева Г. И., Гарина Л. А., Васильева Л. В. Характеристики интер-
- 6. Голубева Г. И., Гарина Л. А., Васильева Л. В. Характеристики интерференционных фильтров в наклонных и сходящихся лучах.— Опт. мех. пром., 1969, 36, № 6, с. 49—53.
- 7. Королев Ф. А., Клементьева А. Ю. и др.— Оптика и спектроскопия, 1971, 31, с. 138—145.

Поступила в редакцию 05.12.78