J. Phys. B, 1981, 14, N 25, p. 4805. [4] Schiff H. Can. J. Phys., 1954, 32, N 6, p. 393. [5] Каминский А. К., Николаев В. С. В кн.: тез. V ВКЭАС. Ужгород, 1972, с. 69. [6] Каминский А. К., Николаев В. С., Попова М. И. В кк.: тез. докл. Всесоюз. семинара по теории атомов и атомных спектров. Ташкент, 1974, с. 45. [7] Beloshitsky V. V., Nikolaev V. S. Phys. Left., 1975, 51 A, N 2, p. 97. [8] Катіпsky А. К., Nikolaev V. S., Popova M. I. Phys. Lett., 1975, 53 A, N 5, p. 419. [9] Каминский А. К., Николаев В. С., Попова М. И. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1976, 17, № 6, с. 698. [10] Катіпsky А. К., Popova M. I. J. Phys. B, 1976, 9, N 7, p. L177. [11] Катіпsky А. К., Lovisov S. V., Popova M. I. In.: Proc. 10-th Int. Conf. on Physics of Electronic and Atomic Collisions. Paris, 1977, v. 1, p. 56. [12] Катіпsky А. К., Lovtsov S. V., Popova M. I. Phys. Lett., 1977, 61 А, N 5, p. 308. [13] Каминский А. К., Ловиов С. В., Попова М. И. В кн.: Тр. VIII Всесоюз. сов. по физ. взаимодействия заряж. частиц с монокристаллами. Ч. I. М., 1977, с. 59. [14] Каминский А. К., Попова М. И. В кн.: Тр. IX Всесоюз. сов. по физ. взаимодействия заряж. частиц с кристаллами. Ч. III. М., 1979, с. 129. [15] Sidorovich V. A. et al. J. Phys. B, 1980, 13, N 23, p. L583. [16] Та и 15 јег g К. J. Phys. B, 1977, 10, p. L341. [17] R yuiuku H., Watanabe T. Phys. Rev. A, 1978, 18, N 5, p. 2005. [18] Афросимов В. В. и др. ЖТФ, 1969, 39, № 1, с. 159. [19] Соловьев Е. С. и др. ЖЭТФ, 1962, 42, № 3, с. 659. [20] Пивовар Л. И., Левченко Ю. 3. ЖЭТФ, 1967, 52. № 1, с. 42. [21] Рискеtt L. J., Магtin D. W. Phys. Rev. A, 1970, 1, N 5, p. 1432. [22] Левченко Ю. 3. Канд. дис. Харьков, Физ.-тех. ин-т. АН УССР, 1974. [23] Wexler S. J. Chem. Phys., 1964, 41, N 6, p. 1714; J. Chem. Phys., 1966, 44, N 5, p. 2221. [24] Таwага H., Russek A. Rev. Mod. Phys., 1973, 45, N 2, p. 178. [25] Oldham W. J. B. Phys. Rev., 1968, 166, N 1, p. 34. [26] Gryzinski M. Phys. [25] Oldham W. J. B. Phys. Rev., 1968, 166, N 1, p. 34. [26] Gryzinski M. Phys. [25] Oldham W. J. B.

Поступила в редакцию 13.10.82

# ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕ́Р. 3. ФИЗИКА: АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 5

### УДК 535.345.67

# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ. ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СВЕТОФИЛЬТРОВ

#### А. Ю. Клементьева, Л. С. Корниенко, А. В. Гришкин

(кафедра оптики и спектроскопии)

Многослойные интерференционные светофильтры, находящие широкое применение в новом приборостроении, имеют в ряде случаев значительные потери света в полосе пропускания. Световые потери связаны с наличием слабого поглощения и рассеяния в слоях. Они возникают также при нарушении симметрии системы; в этом случае потери света происходят за счет отражения.

Изучение влияния поглощения на свойства многослойных систем показывает, что спектральное поглощение  $A(\lambda)$  носит сложный интерференционный характер, сильно избирательно по спектру и зависит от структуры покрытия. Полосы пропускания светофильтров, обусловленные наличием в системе резонансных слоев с целочисленным значением полного порядка интерференции для определенных длин волн, могут различаться величиной коэффициента пропускания в зависимости от структуры покрытия и от способов включения тех или иных резонансных слоев. Изучение поглощения в системах имеет целью выявить конструкции светофильтров с заданной шириной полосы  $2\delta\lambda$ , имеющих большую величину  $T_{max}$  при заданных реальных физических параметрах слоев (коэффициенты преломления  $n_i$  и экстинкции  $\chi_i$ ). Отыскание эффективных систем светофильтров нами проводилось ранее [1]. В данной работе авторами рассмотрены новые возможности повышения эффективности фильтров за счет некоторого усложнения систем, включающих слои с толщиной, отличной от  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$ .

Подробное изучение спектральных характеристик пропускания  $T(\lambda)$ , отражения  $R(\lambda)$  и поглощения  $A(\lambda)$  для систем различного вида с учетом поглощения в слоях проведено в настоящей работе на основе точных методов расчета с использованием как матричных, так и рекуррентных соотношений [2]. В расчетах, выполненных на ЭВМ типа



 ЕС-10-10, БЭСМ-6, изменялись физические
А,% параметры слоев, расположение и число слоев.
На рис. 1 приводятся расчетные спектральные
характеристики интерференционного светофильтра с одним разделительным слоем. Для
такой системы максимум поглощения соответ-

Рис. 1. Спектральные характеристики светофильтра  $(HL)^{2}2H(LH)^{2}D_{0}$ , где H — четвертьволновый слой с  $n_{H}=2,3, \ \chi_{H}=1\cdot10^{-3}, \ L$  — четвертьволновый слой с  $n_{L}=1,35, \ \chi_{L}=1\cdot10^{-4}, \ n_{0}=1,52$ 

ствует максимуму пропускания, поглощение достигает минимума  $(A(\lambda) = 0, 2\%)$  в области погашения, кривая поглощения асимметрична  $(A(\lambda)$  повышается с коротковолновой стороны). Возникают связанные с поглощением потери света на отражение [3].

Потери света на отражение могут оказаться значительными при нарушении симметрии системы, когда  $R_1 \neq R_2$  на границах разделительного слоя. В этом случае величина потерь тем больше, чем ближе  $R_1$  и  $R_2$  к единице. Разница между  $R_1$  и  $R_2$  порядка 1% при  $R_1 \approx R_2 \approx$  $\approx 90\%$  ведет к потере  $T_{\text{max}}$  на 0,3%, однако если зеркала отражают 98,5 и 99,5%, то коэффициент пропускания снижается на 36,3%. Отсюда видно, что разъюстировка зеркал особенно вредна для узкополосных светофильтров с полосой  $2\delta\lambda \leqslant 20$  Å (соответственно R зеркал  $\gg$  $\gg 99\%$ ).

Примем во внимание, что ширина полосы пропускания светофильтра дается соотношением

 $2\delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{max}}}{2nh/\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{max}}/2\pi \cdot \partial (\varphi_1 + \varphi_2)/\partial\lambda} \cdot \frac{1 - \tau R_{1,2}}{\pi \sqrt{\tau R_{1,2}}}, \quad (1)$ 

где  $R_{1,2} = \sqrt{R_1 R_2}$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — скачки фазы на зеркалах фильтра,  $\tau$  — прозрачность по интенсивности разделительного слоя фильтра.

При заданной величине 26х повышение коэффициента пропускания светофильтра может быть достигнуто путем некоторого уменьшения толщины разделительного слоя или увеличения дисперсии фазы на зеркалах.

Первый путь ведет к уменьшению энергетических потерь в разделительном слое. Он приводит к необходимости сохранения  $\lambda_{max}$ . Из условия максимума интерференции  $\lambda_{max} = 2nh/\{1-(\varphi_1+\varphi_2)/2\pi\}$  видно, что, изменяя nh, необходимо изменить  $\varphi_1+\varphi_2$  (путем сдвига зеркал или изменения оптической толщины части слоев зеркал) с тем, чтобы полоса осталась на месте.

Второй путь позволяет повысить  $T_{\max}$  светофильтра за счет уменьшения R зеркал и их поглощения. Он требует построения зеркал с увеличенной дисперсией фазы, при этом R зеркал уменьшается, а наклон фазы  $\partial \phi / \partial \lambda$  увеличивается, оказывая противоположное воздействие на ширину полосы  $2\delta\lambda$ , в результате ширина полосы не изменяется. Наконец, оба способа сразу могут быть использованы при построении системы фильтра.

Различные системы светофильтров, характеристики которых были рассчитаны для выявления эффективности (см. таблицу), можно отнести к нескольким типам: 1) многослойные зеркала, центрированные на  $\lambda_0$ , с разделительным слоем толщиной  $<\lambda_0/2$  (системы 2, 4); 2) четвертьволновые зеркала, центрированные на  $\lambda_0$ , с разделительным слоем толщиной  $\lambda_0/4$  и показателем преломления  $n_p$ , удовлетворяющим условию бо́льшей величины  $T_{max}$  (системы 6, 8 и др.) [см. 4]; 3) зеркала с увеличенной дисперсией фазы и разделительным слоем  $\lambda_0/4$ ,  $\lambda_0/2$ (системы 11, 14, 16).

Система		Оптические пара- метры слоев		Характеристики светофильтров $(\lambda_0 = 4500 \text{ \AA})$			
₽	Состав	n	x	202, Å	T <sub>max</sub> .	R <sub>max</sub> , %	A <sub>max</sub> , %
1 2	D₀ (HL)42H (LH)4D D₀ (HL)41,8H (LH)4D	2,30 1,35	$1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-4}$	25,5 22,5	72,6 75,4	9,2 8,5	18,2 16,1
3 4 5	$D_0$ (0,9H0,9L) <sup>4</sup> 2H (1,1L1,1H) <sup>4</sup> D $D_0$ (LH) <sup>4</sup> 0,5H0,675L0,5H (LH) <sup>4</sup> D $D_1$ (LH) <sup>4</sup> U H (LH) <sup>4</sup> D	-		30,7 22,5	79,4 74,2 72,8	7,1 9,2	13,5 16,6 18,0
6	$D_{\theta}$ (HL) <sup>4</sup> L' (HL) <sup>4</sup> D	2,30 1,35 1,44	$1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-4}$	31,0	85,7	4,5	9,8
7	D <sub>0</sub> (HL) <sup>5</sup> 2H (LH) <sup>5</sup> D	2,30	1 · 10 <sup>-3</sup> 1 · 10 <sup>-4</sup>	11,3	52,2	16,7	31,1
8	D₀ (HL)⁰L′ (HL)⁰D	2,30 1,35 1,44	1 · 10 <sup>-3</sup> 1 · 10 <sup>-4</sup> 1 · 10 <sup>-4</sup>	12,0	68,4	8,7	22,9
9 10	D <sub>0</sub> (HL) <sup>6</sup> 2H (LH) <sup>6</sup> D	2,30 1,35 2,30	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-3}$	5,7	24,3	35,6	40,1
		1,35	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$	5,5	39,6	21,5	.38,9
11	D <sub>0</sub> (HL) <sup>4</sup> 2H (LH) <sup>4</sup> D	2,30 1,35 2,30	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$	5,2 22,5	42,0	22	36
13	D <sub>0</sub> (HL) <sup>4</sup> L' (HL) <sup>4</sup> D	$1,35 \\ 2,30 \\ 1,35$	1 - 10 <sup>-4</sup> 1 · 10 <sup>-4</sup> 1 · 10 <sup>-4</sup>	30,0	90,1	3,7	6,2
14 15	D₀ (H3L)⁵2H (3LH)⁵D D₀ (HL)⁵H2LH (LH)⁵D	1,44	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-4}$	5,3 6,8	55,5 48,0	15,3 18,7	29,2 33,2
16	D <sub>0</sub> (H3L) <sup>5</sup> L′ (H3L) <sup>5</sup> D	1,30	1.10 •	6,8	62,1	10,8	27,1

Характеристики многослойных светофильтров при наличии поглощения в слоях

Примечание. Для всех систем величина  $(\lambda_0/\lambda)_{max} = 1,00$ , кроме системы 2, для которой  $(\lambda_0/\lambda)_{max} = -1,043$ .

Для этих систем в таблице приводятся основные характеристики в максимуме полос пропускания и ширина полосы  $2\delta\lambda$ . В расчетах были использованы сравнительно большие значения  $\chi$ , поскольку проблема повышения  $T_{\text{max}}$  имеет место именно для тех участков спектра, где повышается  $\chi$  (на границах области прозрачности веществ). Для сравнения приводятся характеристики светофильтров классического типа (системы 1, 7, 9, 12).

Как видно из таблицы, слабое поглощение в слоях вызывает заметные потери света на поглощение, которые несколько меньше потерь на отражение. Верхняя часть таблицы содержит системы, которые построены из двух-трех веществ, одно из которых имеет большое значение  $\chi$  (обычно с высоким коэффициентом преломления). Классическая система светофильтра  $D_0(HL)^42H(LH)^4D$  (система 1) имеет коэффициент пропускания  $T_{max} = 72,6\%$  при ширине полосы 25,5 Å. При ширине полосы 20—30 Å целый ряд систем (системы 2, 3, 4, 6), в которых изменена оптическая толщина слоев зеркал или разделительного слоя, имеют бо́льшую величину  $T_{max}$ . Наибольшее преимущество имеют системы с разделительным слоем  $\lambda_0/4$  (системы 6, 8, 13), особенно для



Рис. 2. Спектральные характеристики полосового светофильтра (L2HL)<sup>4</sup> $D_0$ , где H — четвертьволновый слой с  $n_H=2,3, \chi_H=1\cdot 10^{-4}, L$ четвертьволновый слой с  $n_L=1,35, \chi_L=10^{-4}, n_0=1,52$ 



Рис. 3. Контуры полос пропускания светофильтров типа { $(HL)^{2}2H(LH)^{2}$ }, где  $n_{H}=2,3, \chi_{H}=1\cdot10^{-3}, n_{L}=$ =1,35,  $\chi_{L}=1\cdot10^{-4}$ ; кривая l соответствует *nh* соединительным слоям  $\lambda/4$ , кривая 3  $2 - \lambda/4$  и  $\lambda/2$ , кривая 3/2

узкополосных светофильтров с полосой  $2\delta\lambda \approx 10-15$  Å, и фильтры с симметричным сдвигом зеркал (система 3). Для более узкополосных светофильтров хорошие результаты дают системы с повышенной дисперсией сдвига фазы на зеркалах (система 15). При ширине полосы 5-6 Å такие системы с разделительным слоем  $\lambda_0/4$  дают возможность получить пропускание в полосе до 70%, в то время как классические имеют  $T_{\rm max} \leqslant 50\%$ .

Эти выводы хорошо подтверждаются экспериментально. Так, в фиолетовой области спектра, где коэффициент поглощения *H*-слоев обычно превышает его значение для *L*-слоев, наибольшую величину пропускания имеют светофильтры с четвертьволновым разделительным слоем типа  $(HL)^mL'(HL)^m$ ; система фильтра с  $2\delta\lambda = 20$  Å имеет  $T \approx \approx 80-86\%$ . Пропускание монохроматических светофильтров с шириной полосы 4—5 Å, имеющих в составе зеркала с повышенной дисперсией фазы, достигает значений 60% для  $\lambda_0 = 5000$  Å.

В экспериментальной технике все чаще применяются светофильтры высокой контрастности; их состав можно выразить схемой  $\{(HL...HL)(2H)p(LH...LH)\}^m$ , где m — число единичных фильтров. Расчетные спектральные кривые  $T(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$  и  $A(\lambda)$  полосового светофильтра приводятся на рис. 2. Для полосовых систем поглощение  $A(\lambda)$  асимметрично относительно  $\lambda_0/\lambda = 1$ ; оно увеличивается в полосе пропускания, уменьшая  $T_{max}$ . Максимальное значение A наблюдается на границах полосы пропускания, а не в ее центре, как это имело место в простых светофильтрах. Поглощение приводит к ухудшению резкости границ полосы.

С точки зрения потерь на поглощение важно выяснить, какое пропускание в полосе может дать система *т*-кратного фильтра. Два отдельных, последовательно установленных светофильтра с совпадающими  $\lambda_{\max}$  дают коэффициент пропускания, равный примерно  $T_1T_2$ . Фильтры в полосовой системе наносятся последовательно через соединительные слои с толщиной λ/4 или λ/2. Для оценки поведения сложного двойного светофильтра можно воспользоваться формулой интерферометра Фабри-Перо. Пусть R<sub>1</sub> и T<sub>1</sub> - коэффициенты отражения и про-пускания 1-го фильтра при Amax на границе с соединительным слоем,  $R_2$  и  $T_2$  — те же коэффициенты для 2-го светофильтра на другой границе слоя, под nh подразумеваем оптическую толщину соединительного слоя. Предположим, соединяются одинаковые фильтры, тогда  $R_1 =$  $=R_2=R_{\Phi\Pi}, T_1=T_2=T_{\Phi\Pi}$ . Обозначим т прозрачность соединительного слоя и примем во внимание, что скачки фазы на границах с фильтрами равны 0 или 180°. Для данной двойной системы, положив значение оптической толщины *nh* равным а)  $\lambda/4$  и б)  $\lambda/2$  при  $\lambda_{max}$ , получаем соответственно выражения

a) 
$$T_{\lambda/4} = \left(\frac{\tau T_{\Phi\Pi}}{1 + \tau T_{\Phi\Pi}}\right)^2$$
; 6)  $T_{\lambda/2} = \left(\frac{\tau T_{\Phi\Pi}}{1 - \tau R_{\Phi\Pi}}\right)^2$ . (2)

При соединении светофильтров с помощью  $\lambda/4$ -слоя коэффициент пропускания сложного фильтра меньше, чем в случае наложения независимых фильтров. При соединении светофильтров слоем λ/2 получается выигрыш в пропускании сложной системы. Оценка показывает, наложении двух фильтров типа (HL)<sup>4</sup>2H(LH)<sup>4</sup> (слои что при ZnS—Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), имеющих  $R_{\Phi\Pi} = 0.0607$ ,  $T_{\Phi\Pi} = 0.8623$ ,  $\tau_{1/4} = 0.9998$  и  $\tau_{1/2} = 0.9995$ , в случае соединителя толщиной  $\lambda/4$  получим  $T_{\text{max}} = 0.81\%$ , а при толщине того же слоя  $\lambda/2 T_{max} = 92\%$ , что больше пропускания единичного фильтра. Таким образом, соединение  $\lambda/2$ -слоями приводит к большим значениям T<sub>max</sub>. Более подробный расчет, однако, показывает, что соединение λ/2-слоями в ряде случаев дает триплетную структуру полосы пропускания, что нежелательно, поэтому соединение с помощью  $\lambda/2$ -слоев должно чередоваться в сложной системе с соединением слоями  $\lambda/4$ : таким путем обеспечивается бо́льшая величина  $T_{\max}$ при сохранении нерасшепленного контура полосы.

Рисунок 3 иллюстрирует изменение контура полосы пропускания трехкратного светофильтра при различной толщине соединительных слоев.

Таким образом, свойства систем светофильтров при наличии поглощения в слоях таковы, что при заданных физических параметрах слоев возможно построение более эффективных систем (по величине коэффициента пропускания) в сравнении с классическими четвертьволновыми многослойными фильтрами.

Авторы благодарят за помощь в расчетах систем А. В. Тихонравова.

45

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Королев Ф. А., Клементъева А. Ю., Тихонравов А. В. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1977, 18, № 3, с. 15. [2] Бернинг П. Х. В кн.: Физика тонких пленок. Т. 1. М.: Мир, 1967, с. 91. [3] Фурман Ш. А. Опт. и спектр., 1974, 36, с. 421. [4] Zafirova B. S., Peeva R. A., Zartov G. D. Comp. Rendus de l'Acad. Bulgar Sci., 1978, 31, N 10, p. 1373.

Поступила в редакцию 28.10.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 5

УДК 519:242

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

#### Ю. П. Пытьев, П. В. Голубцов

(кафедра математики)

§ 1. Введение. В современных экспериментальных исследованиях прецизионные измерения связаны с большими затратами времени. Однако известно, что невозможно достигнуть любой наперед заданной точности путем неопределенно долгого проведения измерений, поскольку в конечном счете начинают играть роль нестабильности, связанные с медленным дрейфом параметров оборудования, с разрушением объекта измерения и т. п. В связи с этим возникает задача оптимального планирования цикла измерений при условии, что общее время измерений ограничено заданной величиной.

В работе развиты методы оптимального планирования цикла измерений, обобщающие результаты [1] и позволяющие в ряде случаев значительно повысить точность измерений.

Рассмотрим схему измерения вектора f Я, содержащую серии

$$\xi_j = A_j f + v_j, \ j = 0, ..., m,$$
 (1)

где  $\xi_j$  — результат измерения вектора  $A_j f$ ,  $A_j \in (\mathscr{R} \to \mathscr{R}_j)$  — линейный оператор,  $v_j$  — случайный вектор, определяющий погрешность *j*-го измерения,  $Ev_j = 0$ ;  $\xi_j$ ,  $A_j f$ ,  $v_j \in \mathscr{R}_j$ . Будем считать, что *j*-е измерение проводится в течение времени  $\tau_j$  независимо от остальных измерений, и погрешность характеризуется корреляционным оператором  $\Sigma_j / \tau_j$ ,

$$\frac{1}{\tau_j}\Sigma_j x = E v_j (x, v_j), \ x \in \overline{\mathcal{R}}_j, \ j = 0, \ldots, m.$$

Задача планирования измерений (1) состоит в определении такой стратегии измерений  $\tau = (\tau_1, ..., \tau_m)$ , чтобы оптимальная оценка вектора f, найденная на основе (1), обладала максимальной точностью при условии  $\tau_1 + ... + \tau_m = 1$ ,  $\tau_1 \ge 0, ..., \tau_m \ge 0$ . В данном случае, в отличие от работы [1], считается, что время  $\tau_0$  измерения  $\xi_0$  фиксировано:  $\tau_0 = 1$ .

Перепишем (1) в виде

$$\xi = Af + \nu, \ \xi \in \bigoplus_{j=0}^{m} \overline{\mathcal{R}}_{j} \equiv \overline{\mathcal{R}}, \ f \in \mathcal{R},$$
(2)

где  $\xi = \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \vdots \\ \xi_m \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} A_0 \\ \vdots \\ A_m \end{pmatrix}, v = \begin{pmatrix} v_0 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix}$  и  $Ev = 0, Ev(x, v) = \Sigma x, x \in \overline{\mathcal{R}}, \tau. e.$  $\Sigma = \operatorname{diag}(\Sigma_0, \tau_1^{-1}\Sigma_1, \dots, \tau_m^{-1}\Sigma_m) -$ корреляционный оператор v,  $\Sigma \in (\overline{\mathcal{R}} \to \overline{\mathcal{R}}).$