

УДК 535.345.67

Ф. А. Королев
 А. Ю. Клементьева
 А. В. Тихонравов

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МНОГО-СЛОЙНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СВЕТОФИЛЬТРА С УЧЕТОМ СЛАБОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СЛОЯХ

С учетом слабого поглощения в слоях выведены формулы для расчета коэффициента пропускания, ширина полосы пропускания и других характеристик интерференционного фильтра. Исследованы различные типы системы светофильтра и указаны наиболее эффективные композиции.

Слабое поглощение, присутствующее в слоях интерференционных систем, оказывает влияние на их оптические свойства, изменяя величину коэффициентов пропускания, отражения, и вызывая появление существенного поглощения в отдельных участках спектра. Степень влияния слабого поглощения тесно связана с композицией системы и параметрами отдельных слоев, входящих в состав покрытия.

Для многослойных отражающих систем, состоящих из чередующихся слоев с показателями преломления n_1 , n_2 и оптической толщиной $q \frac{\lambda_0}{4}$, интегральное поглощение A оказывается достаточно малым в области отражения [1]. В более сложных системах типа светофильтра сравнительно слабое поглощение каждого слоя может привести к значительным потерям света в полосе пропускания светофильтра. Эффект особенно заметен при переходе к предельно-узким полосам пропускания шириной от 10 до 1 Å [2].

В данной работе рассматривались узкополосные светофильтры, состоящие из двух многослойных зеркал и разделительного слоя с оптической толщиной $p \frac{\lambda_0}{2}$. Переход к узким полосам может осуществляться путем увеличения порядка интерференции разделительного слоя p , увеличения коэффициента отражения зеркал R (до $\sim 100\%$), а также путем увеличения дисперсии фазы при отражении от зеркал светофильтра. Последнее достигается сближением показателей преломления чередующихся слоев двух веществ зеркала или увеличением порядка интерференции каждого слоя зеркала (толщина слоев $q \frac{\lambda_0}{4}$).

Представляет определенный интерес изучить, в какой степени слабое поглощение в слоях влияет на спектральные характеристики различных композиций узкополосных светофильтров, а также выявить типы систем, отличающиеся меньшими потерями света в полосе пропускания при сравнимой ширине полосы.

Авторы не рассматривают в данной работе эффекты, вызываемые структурой слоев, которые могут приводить к дополнительному падению коэффициента пропускания и уширению контура полосы.

Для расчета свойств многослойных интерференционных фильтров в области их полосы пропускания мы воспользовались формулами, полученными в работе [3]. Многослойная система светофильтра схематически изображена на рисунке: однородный слой с комплексным показателем преломления $n + i\chi$ и толщиной d окружен двумя системами

слоев с номерами 1 и 2, коэффициенты отражения и пропускания которых известны, излучение распространяется из однородной непоглощающей среды с показателем преломления n_d в направлении оси z (нормаль к поверхности слоев); показатель преломления подложки $n_{пр}$. Величина χ считалась малым параметром, по которому велось разложение для вывода формул. Относительно свойств систем слоев 1 и 2 были сделаны следующие предположения.

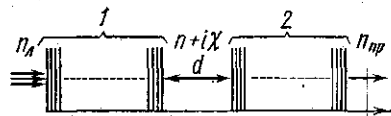


Схема интерференционного светофильтра

1. Энергетические коэффициенты пропускания систем 1 и 2, рассчитанные для некоторой фиксированной длины волны λ_0 без учета поглощения в системах 1 и 2 (обозначим их $T_{1(0)}$ и $T_{2(0)}$), имеют порядок малости χ .

2. Амплитудный коэффициент отражения системы 1 для волны, распространяющейся из однородной среды с показателем преломления n в отрицательном направлении оси z — r_1' , и коэффициент отражения от системы 2 для волны, распространяющейся из среды с показателем преломления n в положительном направлении оси z — r_2 при длине волны λ_0 , имеют вид

$$\begin{aligned} r_1' &= r_{1(0)}' [1 - p_1(\chi) + o(\chi)], \\ r_2 &= r_{2(0)} [1 - p_2(\chi) + o(\chi)], \end{aligned}$$

где $r_{1(0)}$ и $r_{2(0)}$ — те же коэффициенты, рассчитанные при длине волны λ_0 без учета поглощения в системах 1 и 2, $p_1(\chi)$ и $p_2(\chi)$ — члены, учитывающие поглощение в системах 1 и 2 и имеющие порядок малости χ .

3. Фазовые сдвиги при отражении от системы 1 волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси z — φ_{r_1} , и от системы 2 волны, распространяющейся в положительном направлении оси z — φ_{r_2} при длине волны λ_0 удовлетворяют соотношению

$$\varphi_{r_1}' + \varphi_{r_2} + 2\alpha = 0 \pmod{2\pi},$$

где $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} nd$.

4. Относительные изменения $T_{1(0)}$, $T_{2(0)}$, $p_1(\chi)$, $p_2(\chi)$ в малой окрестности λ_0 (порядка χ) имеют порядок малости χ .

При этих предположениях в [3] для энергетических коэффициентов пропускания $T(\lambda)$, отражения $R(\lambda)$ и поглощения $A(\lambda)$ всей системы, изображенной на рисунке, были получены следующие выражения, справедливые в окрестности λ_0 порядка χ (т. е. для длин волн λ , таких, что $\lambda - \lambda_0 = \theta(\chi)$) с точностью до бесконечно малых по χ функций:

$$\begin{aligned} T &= \frac{4k}{(1+k+x)^2 + 4y^2}, \\ R &= \frac{(1-k-x)^2 + 4y^2}{(1+k+x)^2 + 4y^2}, \\ A &= \frac{|4x|}{(1+k+x)^2 + 4y^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$k = \frac{T_{2(0)}}{T_{1(0)}},$$

$$x = \frac{2}{T_{1(0)}} \left\{ \text{Re} [p_1'(\chi) + p_2(\chi)] + 2 \frac{\chi}{n} [\alpha + \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \varphi_{r_2})] \right\},$$

$$y = \frac{1}{T_{1(0)}} \left\{ \left[-2 \frac{\alpha}{\lambda_0} + \frac{d\varphi'_{r_1}}{d\lambda} \right]_{\lambda=\lambda_0} + \frac{d\varphi'_{r_2}}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} \right\} (\lambda - \lambda_0) - \text{Im} [p'_1(\chi) + p_2(\chi)].$$

Мы будем рассматривать симметричные многослойные интерференционные фильтры, обрамленные однородными средами с показателями преломления, равными 1 ($n_{\text{п}} = n_{\text{пр}} = 1$), с оптической толщиной разделительного слоя $p \frac{\lambda_0}{2}$. Системы 1 и 2 представляют собой двухкомпонентные многослойные зеркала с оптической толщиной слоев $q \frac{\lambda_0}{4}$.

При этих предложениях $T_{2(0)} = T_{1(0)}$, $p'_1(\chi) = p_2(\chi)$ и действительны, $\varphi'_{r_1} = \varphi'_{r_2}$, $\alpha = p\pi$, $k = 1$; следовательно, выражения для x и y принимают вид

$$x = \frac{4}{T_{1(0)}} \left\{ p'_1(\chi) + p \frac{\pi\chi}{n} \right\}, \quad (2)$$

$$y = \frac{2}{T_{1(0)}} \left\{ -\frac{p\pi}{\lambda} + \frac{d\varphi'_{r_1}}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} \right\} (\lambda - \lambda_0). \quad (3)$$

Рассмотрим сначала интерференционные фильтры типа

$$m(qH qL) - p(2H) - m(qL qH),$$

где H — четвертьволновый слой вещества с большим показателем преломления, L — слой вещества с малым показателем преломления, m — число пар слоев, входящих в каждое зеркало светофильтра. Для указанных зеркал были получены следующие выражения для

$$p'_1(\chi) \text{ и } \frac{d\varphi'_{r_1}}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0};$$

$$p'_1(\chi) = q \frac{\pi}{n_H} \frac{\chi_L \cdot n_H^2 + \chi_H n_L^2}{n_H^2 - n_L^2}, \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi'_{r_1}}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} = -\frac{q\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{n_L}{n_H - n_L}, \quad (5)$$

где $n_H + i\chi_H$, $n_L + i\chi_L$ — комплексные показатели преломления H и L слоев. С учетом (4), (5) выражения (2) и (3) принимают вид

$$x = \frac{4\pi}{n_H T_{1(0)}} \left\{ p\chi_H + q \frac{\chi_L n_H^2 + \chi_H n_L^2}{n_H^2 - n_L^2} \right\}, \quad (6)$$

$$y = -\frac{2\pi}{\lambda_0 T_{1(0)}} \left\{ p + q \frac{n_L}{n_H - n_L} \right\} (\lambda - \lambda_0). \quad (7)$$

Выражение для коэффициента пропускания рассматриваемых зеркал хорошо известно и имеет вид

$$T_{1(0)} = \frac{4n_H}{\left[\left(\frac{n_L}{n_H} \right)^m + n_H \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^m \right]^2} \approx \frac{4}{n_H} \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2m}. \quad (8)$$

Пользуясь формулами (1) и выражениями (6) — (8), можно рассчитать спектральные коэффициенты R , T и A фильтров вблизи цен-

тральной длины волны λ_0 , где расположена полоса пропускания фильтра. Для расчета максимального коэффициента пропускания светофильтра, достигаемого при $\lambda = \lambda_0$ (т. е. при $y=0$), получаем выражение следующего вида:

$$T_{\max} = \frac{1}{(1 + x/2)^2}. \quad (9)$$

Ширина полосы пропускания, определяемая как расстояние между длинами волн, при которых $T=0,5 T_{\max}$, определяется из условия $|y| = 1 + x/2$. Отсюда получается следующее выражение для отношения ширины полосы $\Delta\lambda$ к λ_0 :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{T_{1(0)} \left(1 + \frac{x}{2}\right)}{\pi (\rho + q(n_L/n_H - n_L))}. \quad (10)$$

Рассмотрение формул (1), (6), (10) позволяет сделать ряд общих выводов относительно свойств светофильтров при наличии слабого поглощения в слоях.

Так, из (1) следует, что малое поглощение вызывает потери света на отражение, тем более значительные, чем больше χ . Асимметрия системы ($k > 1$) также ведет к падению пропускания. Из (6) следует, что величина A/T , равная x , малость которой характеризует эффективность фильтра, связана линейной зависимостью с величинами порядков интерференции как разделительного слоя p , так и слоев зеркал q . При средних значениях показателей преломления $n_L/n_H \approx 1/2$, часто встречающихся в системах фильтров, увеличение порядков интерференции p и q ведет к достижению примерно равной ширины полосы $\Delta\lambda/\lambda_0$ (10), однако при увеличении толщины центрального слоя фильтр более эффективен (A/T — меньше), чем в случае увеличения толщины слоев диэлектрических зеркал.

Из формулы (6) также следует, что сближение показателей преломления n_H и n_L , используемое иногда при построении фильтров, приводит к возрастанию x , т. е. растет отношение коэффициента поглощения к пропусканию фильтра A/T , что говорит о нецелесообразности подобных конструкций.

Учитывая, что величина χ для реальных слоев имеет значение $10^{-4} - 10^{-5}$, авторы произвели на основе полученных формул расчет характеристик фильтров различной композиции, стремясь выявить, какие системы фильтра более светосильны при равных значениях ширины полосы пропускания.

В качестве материалов слоев были взяты сернистый цинк ZnS ($n_H = 2,3$) и криолит Na_3AlF_6 ($n_L = 1,34$). Результаты расчета приведены в таблице, где приводятся значения T_{\max} и $\Delta\lambda/\lambda_0$. Для проверки точности формул был проведен расчет системы $(HL)^6 - 2H - (LH)^6$ по точным формулам на ЭВМ, результаты расчетов хорошо согласуются.

В таблице свойств светофильтров авторы приводят также экспериментальные данные для некоторых типов светофильтров.

Рассмотрим более подробно с помощью таблицы, как изменяются свойства светофильтра в зависимости от композиции на примере симметричных монохроматических светофильтров с шириной полосы в несколько ангстрем. Такие светофильтры имеют в составе 12—14-слойные зеркала и разделительный слой 1—5 порядков ($p = 1 \div 5$). При возрастании порядка p уменьшается ширина полосы и коэффициент пропускания, а именно при увеличении p в 5 раз $\Delta\lambda/\lambda$ и T_{\max} уменьшаются в 2 раза.

Увеличение числа слоев каждого зеркала на 2 ведет к уменьшению ширины полосы также в 2 раза, однако этот способ дает меньший коэффициент пропускания T_{\max} , поэтому дальнейшее увеличение числа

Таблица

Свойства светофильтров с учетом поглощения

№ системы	Число слоев	Тип фильтра		T_{\max} , рас	$\Delta\lambda/\lambda_0$, рас	T_{\max} , эксп	$\Delta\lambda/\lambda_0$, эксп
		q	p				
		$(qHqL)^m - p(2H) - (cLqH)^m$					
1	25	1	1	58,5	$4,68 \cdot 10^{-4}$	55	$4,8 \cdot 10^{-4}$
2	25	1	3	44	$2,96 \cdot 10^{-4}$	42	—
3	25	1	5	34,2	$2,3 \cdot 10^{-4}$	25	$2,6 \cdot 10^{-4}$
4	25	1	10	20,3	$1,67 \cdot 10^{-4}$	—	—
5	25	3	1	33,9	$2,84 \cdot 10^{-4}$	—	—
6	25	5	1	22,2	$2,28 \cdot 10^{-4}$	—	—
7	29	1	1	27,6	$3,3 \cdot 10^{-4}$	20	—
8	29	1	3	15,9	$1,65 \cdot 10^{-4}$	—	$3,0 \cdot 10^{-4}$
9	29	$(HL)^6 H_2 L_2 - 3(2H) - L_2 H_2 (LH)^6$		32,6	—	—	—
10	33	$(HL)^6 (H_2 L_2)^2 - 2H - (L_2 H_2)^2 (LH)^6$		31,8	—	—	—

$\chi \approx 1 \cdot 10^{-4}$, nh для H и L слоев равно 0,25, $\lambda n_H = 2,3$; $n_L = 1,34$;
 $n_{H_2} = 1,4$; $n_{L_2} = 1,34$,

слоев зеркал следует считать неэффективным. Сужение полосы пропускания за счет повышенной дисперсии фазы многослойных зеркал наблюдается в системах 5 и 6, оно производится путем увеличения q до 5. Хотя полоса пропускания при этом сужается в 2 раза, однако потери T_{\max} в этом случае больше, чем при увеличении p , как это и следовало при рассмотрении основных формул. В таблице приводятся две более сложные композиции монохроматических фильтров (9 и 10) с использованием комбинированных зеркал, часть слоев которых составляют слои с близкими показателями преломления. При равной ширине полосы эта композиция приводит к меньшей величине T_{\max} и также уступает системам 1—3.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что для осуществления светофильтров с шириной полосы порядка нескольких ангстрем ($\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 1 \div 5 \cdot 10^{-4}$) наиболее эффективной системой светофильтра является система с четвертьволновыми многослойными зеркалами ($q=1$) и оптической толщиной разделительного слоя от 1 до 5 порядков. Таким образом, учет слабого поглощения слоев интерференционного фильтра на основе выведенных соотношений позволяет достаточно точно определить тип многослойной системы, имеющей оптимальные характеристики. Экспериментальные данные (см. табл.) находятся в хорошем соответствии с расчетными значениями T_{\max} и $\Delta\lambda/\lambda_0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клементьева А. Ю., Тихонравов А. В. «Оптика и спектроскопия», 1974, 36, вып. 4, 777.
2. Королев Ф. А., Клементьева А. Ю. и др. «Оптика и спектроскопия», 1960, 9, вып. 5, 649.
3. Тихонравов А. В. «Оптика и спектроскопия», (в печати).
4. Тихонравов А. В. и др. Письма в ЖТФ (в печати).

Поступила в редакцию
 2.9 1976 г.
 Кафедра
 оптики