

УДК 535.411 : 535.345,6

СИНТЕЗ КОНТРАСТНЫХ ПОЛОСОВЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ. СЛОЖНОПЕРИОДИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Ю. Н. Марков

Предлагается метод выделения полосы прозрачности, позволяющий в широком интервале заданных значений ширины полосы синтезировать контрастные полосовые интерференционные фильтры, спектральные характеристики которых нельзя достаточно точно сформировать, используя известные классы двухкомпонентных многополосных полосовых систем. Предлагается метод оптимизации полосовых интерференционных фильтров в части сглаживания осцилляций величины коэффициента пропускания в полосе прозрачности.

Для видимой и инфракрасной областей спектра используются конструкции полосовых двухкомпонентных систем, состоящие из чередующихся с высоким n_H и низким n_L показателями преломления слоев, оптические толщины которых кратны [1, 2]. Структурные особенности таких конструкций обуславливают для заданной пары веществ дискретность значений величины ширины полосы прозрачности $\Delta\lambda/\lambda_0$, что может затруднять получение требуемого фильтра [3].

В настоящей работе предлагается метод синтеза полосовых интерференционных фильтров. Метод основан на аналитическом исследовании задачи варьирования толщин слоев многослойных диэлектрических покрытий. Разработанный метод представляет интерес с практической точки зрения, поскольку дает возможность в широком интервале значений $\Delta\lambda/\lambda_0$ синтезировать конструкции контрастных полосовых фильтров при выборе величин n_H , n_L заданной пары пленкообразующих веществ, наиболее перспективных в плане технологической реализации покрытия.

Представление синтезируемой системы в рамках сложнопериодических конструкций вида [4]

$$GwQv, \quad Q = (q)^m, \quad (1)$$

позволяет воспользоваться методом усредненных спектральных характеристик [5], который дает возможность существенно снизить сложность решения задачи конструирования варьируемых многослойных фильтрующих покрытий. Учет периодичности основной системы Q и двухкомпонентности периода q , состоящего из N_q чередующихся с n_1 и n_2 показателями преломления слоев. Выражение функции среднего геометрического от огибающих семейства кривых коэффициента пропускания $T_{\text{геом}}(\varphi)$, полученное на основе использования приближенных формул [6, 7], можно представить для конструкции (1) в следующем виде:

$$T_{\text{геом}} = \frac{1}{\sqrt{K^2 - P^2 - C^2}}, \quad (2)$$

где

$$K = 1 + \mu^2 + u^2 + r^2 + s^2, \quad P = 2(\mu s - ur), \quad C = 2(\mu r + us), \quad \mu = a - \varepsilon, \quad u = b + \xi, \\ r = a - d, \quad s = \beta + c,$$

$$a = v_{0,1v} + \sum_{l=1}^t v_{lv, (l+1)v} \cos 2V_l \varphi, \quad c = \sum_{l=1}^p v_{lw, (l+1)w} \cos 2(V_t + W_l) \varphi,$$

$$\begin{aligned}
b &= \sum_{l=1}^t v_{lw, (l+1)v} \sin 2V_l \varphi, & d &= \sum_{l=1}^p v_{lw, (l+1)w} \sin 2(V_l + W_l) \varphi, \\
\alpha &= \xi - v_{1,1w} \sin(\Phi_{N_q} - G\varphi), & \beta &= \varepsilon + v_{1,1w} \cos(\Phi_{N_q} - G\varphi), \\
\xi &= \frac{1}{2 \sin G\varphi} \left[v_{1,2} \sum_{j=1}^{N_q-1} (-1)^{j+1} \cos \Phi_j + v_{N_q,1} \cos \Phi_{N_q} \right], \\
\varepsilon &= \frac{1}{2 \sin G\varphi} \left[v_{1,2} \sum_{j=1}^{N_q-1} (-1)^{j+1} \sin \Phi_j + v_{N_q,1} \sin \Phi_{N_q} \right], \\
\Phi_j &= 2 \left(V_l + \sum_{i=1}^j g_i \right) \varphi - G\varphi, \\
W_l &= \sum_{i=1}^l g_{iw}, & G &= \sum_{i=1}^{N_q} g_i, & V_l &= \sum_{i=1}^l g_{iv}, & v_{1,2} &= \frac{1}{2} \ln \frac{n_1}{n_2}.
\end{aligned}$$

Здесь g_{iv} , g_i , g_{iw} — толщины слоев, t , N_q , p — числа слоев, $v_{lw, (l+1)v}$, $v_{1,2}$, $v_{lw, (l+1)w}$ — коэффициенты вида $v_{k,k+1} = (1/2) \ln(n_k/n_{k+1})$, относящиеся соответственно к интерференционным системам v , q , w ; $\varphi = (\pi\lambda_0)/(2\lambda)$ — спектральная переменная; λ_0 — длина волны, относительно четверти которой определяются оптические толщины слоев покрытия.

Выделение полосы прозрачности

Представим некоторую периодическую варьируемую систему конструкции (1) в следующей форме описания состава периода

$$q = g_{N_q} L, g_{N_q-1} H, \dots, g_i H, \dots, g_2 L, g_1 H. \quad (3)$$

Выделение спектральной полосы заключается в создании двух областей низкой прозрачности с заданным между ними интервалом, в котором коэффициент пропускания имеет высокое значение. Как показало исследование влияния на прозрачность многослойной интерференционной системы варьирования толщин слоев [7], в задаче формирования областей низкой прозрачности достаточно ограничиться выбором гармонического закона варьирования. Для гармонического закона варьирования выражение величины толщины i -слоя периода (3) системы (1) запишем как

$$g_i = 1 + \Delta \sin 2\delta(i-1). \quad (4)$$

Полагая величину амплитуды варьирования Δ малой, разложим значения α , β в ряд Тейлора. Ограничиваясь двумя членами разложения, получим выражения

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha_1, \quad \beta = \beta_0 + \Delta\beta_1, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= \frac{1}{2} v_{1,2} \operatorname{tg} \varphi, & \alpha_1 &= \frac{\varphi v_{1,2} \sin(N_q - 1)\delta}{4 \sin \delta \sin N_q \varphi} \left[\frac{\cos(N_q + 1)(\varphi - \delta)}{\cos(\varphi - \delta)} - \frac{\cos(N_q + 1)(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi + \delta)} \right], \\
\beta_0 &= -\frac{1}{2} v_{1,2}, & \beta_1 &= \frac{\varphi v_{1,2}}{4 \sin \delta \sin N_q \varphi} \left\{ \cos(N_q - 1)\delta \left[\frac{\cos(N_q + 1)(\varphi - \delta)}{\cos(\varphi - \delta)} + \frac{\cos(N_q + 1)(\varphi + \delta)}{\cos(\varphi + \delta)} \right] - \frac{2 \cos \delta \cos(N_q + 1)\varphi}{\cos \varphi} \right\}.
\end{aligned}$$

Из вида коэффициентов α , β следует, что в случае варьируемых систем (1), (3), (4) наблюдается закономерность селективного управления прозрачностью [7], которая проявляется в формировании в окрестности точек

$$\varphi_{\text{вар}}: \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \pm \delta, \frac{3}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi \pm \delta \quad (6)$$

областей низкой прозрачности. Действительно, при стремлении $\varphi \rightarrow \varphi_{\text{вар}}$ имеем, согласно (5), $|\alpha| \rightarrow \infty$, $|\beta| \rightarrow \infty$, что означает, согласно (2), стремление величины

усредненной спектральной характеристики к нулю $T_{\text{геом.}} \rightarrow 0$ и как следствие приводит к формированию в окрестности точек (6) областей низкой прозрачности.

Исходя из условия на величину ширины полосы прозрачности $\Delta\lambda/\lambda_{\text{д}}$, формируемой между точками $\pi/2$ и $(\pi/2) + \delta$, находим приближенную формулу

$$\delta = \frac{\pi(\pi + h)[(\pi - h)\lambda_{\text{д}} - h\lambda_{\text{к}}]}{6h(\pi - h)\lambda_{\text{д}} - \pi(\pi + h)\lambda_{\text{к}}} \frac{\lambda_{\text{д}} - \lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}}, \quad (7)$$

где $h = \arccos[(n_{\text{Н}} - n_{\text{Л}})/(n_{\text{Н}} + n_{\text{Л}})]$; $\lambda_{\text{д}}$ и $\lambda_{\text{к}}$ — длинноволновая и коротковолновая границы полосы прозрачности.

Для некоторого δ условие сохранения толщины периода варьируемой системы [7] удовлетворяется приближенно в результате выбора округленной до четного значения величины N_q из ряда $N_q = (\pi j)/\delta$, $N_q = (\pi j)/(\delta + 1)$ при

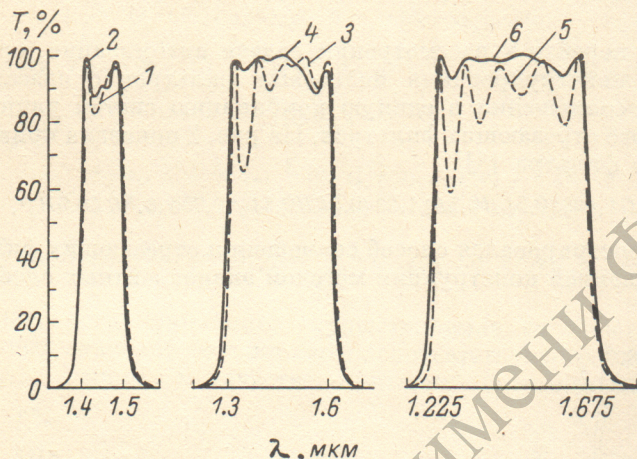


Рис. 1. Коэффициент пропускания полосовых фильтров.

Параметры конструкций фильтров приведены в таблице.

$j = 1, 2, 3, \dots$ Используя точную формулу для величины коэффициента пропускания в точке $\varphi = \pi/2$ конструкции $G(LH)^{\frac{mN_q}{2}}$, соответствующей случаю варьируемой системы при $\Delta = 0$, находим условие

$$m > \frac{\ln \left(\frac{1}{n} \frac{1 + \sqrt{1 - T\left(\frac{\pi}{2}\right)}}{1 - \sqrt{1 - T\left(\frac{\pi}{2}\right)}} \right)}{N_q \ln \left(\frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{Л}}} \right)} \quad \text{для } T_{\text{ф}} < T\left(\frac{\pi}{2}\right), \quad (8)$$

которое позволяет, исходя из требования на уровень фона $T_{\text{ф}}$, оценить величину параметра кратности m .

Исходя из условия примерного равенства уровней фона в коротковолновой и длинноволновой областях низкой прозрачности, величина параметра амплитуды варьирования выбирается из интервала $0.25 < \Delta < 0.65$ при прямом численном расчете спектрального профиля фильтра [8]. В таблице приведены найденные с помощью описанного выше метода параметры трех конструкций вида GQ , выделяющих полосы прозрачности заданной ширины $\Delta\lambda/\lambda_{\text{д}}$ при использовании одной пары веществ $\text{ZnS}-\text{MgF}_2$. Характеристики покрытий представлены кривыми 1, 3, 5 на рис. 1.

Второй этап синтеза заключается в достижении удовлетворяющего заданным требованиям распределения величины коэффициента пропускания $T(\varphi)$ в полосе прозрачности и сводится к оптимизации полосового фильтра в части сглаживания осцилляций величины $T(\varphi)$.

Параметры покрытий на подложке с $n = 1.45$ при использовании пары веществ ZnS ($n_H = 2.3$) — MgF_2 ($n_L = 1.38$)

λ_R , МКМ	λ_D , МКМ	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_D}$	λ_0 , МКМ	δ , град	N_q	m	Δ	Общее число слоев	$\varphi_{iv}(iw)$	$g_{iv}(iw)$
1.4	1.5	0.069	1.628	25.295	8	3	0.4	26	$\varphi_{1v} = \varphi_{1w} = 100^\circ$	$g_{1v} = 1.6461$ $g_{1w} = 1.8708$
1.3	1.6	0.207	1.796	45	4	5	0.5	23	$\varphi_{1v} = 113^\circ$ $\varphi_{1w} = \varphi_{2w} = 104^\circ$	$g_{1v} = 1.0465$ $g_{1w} = 1.6617$ $g_{2w} = 0.8654$
1.225	1.675	0.310	1.885	60	6	3	0.6	20	$\varphi_{1v} = \varphi_{1w} = 122^\circ$	$g_{1v} = 0.7755$ $g_{1w} = 1.5281$

Прежде чем перейти к рассмотрению задачи оптимизации, сравним предлагаемый способ конструирования полосовых фильтров с известным методом, основанным на совмещении в единую комбинацию систем длинноволнового и коротковолнового отрезающих фильтров. На рис. 2 показана кривая 1 пропускания полосового фильтра [9]

$$G1.495(0.5LH0.5L)1.23(0.5LH0.5L)^40.755(0.5HL0.5H)^4, \quad (9)$$

на котором демонстрировался способ совмещения отрезающих фильтров с последующей оптимизацией конструкции методом эквивалентных слоев. При $\delta = 36^\circ$,

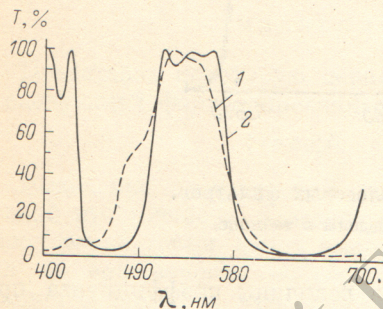


Рис. 2. Коэффициент пропускания полосовых фильтров.

Кривые 1 и 2 относятся к системам (9) и (10) соответственно при выборе $n_H = 2.3$, $n_L = 1.38$, $n = 1.52$ (показатель преломления подложки G), $\lambda_0 = 546$ нм для (9), $\lambda_0 = 618$ нм для (10).

$N_q = 6$, $\Delta = 0.6$, $m = 3$ находим, согласно (3), (4), состав основной системы $Q = (L0.43H0.65L1.35H1.57LH)^3$. Устраняя из системы слой L , граничащий с низкопреломляющей подложкой, и округляя величины толщин слоев периода до значений 0.5, 1.5, получим конструкцию покрытия

$$G0.5H0.5L1.5H1.5LH(L0.5H0.5L1.5H1.5LH)^2, \quad (10)$$

спектральная характеристика которого представлена кривой 2 на рис. 2. Сравнение кривых 1, 2 на рис. 2 показывает, что конструкция (10), имея меньшее на три слоя число слоев и обладая более простой в плане технической реализации структурой, удовлетворяет требованию выделения заданной области 490–580 нм при обеспечении более высокой по сравнению с (9) контрастности полосы. К достоинству конструкций, подобных (9), можно отнести более широкие зоны подавления прозрачности.

О п т и м и з а ц и я

Сформулируем условия оптимизации фильтра как условия минимума в точках $\varphi_{iv}(iw)$ подкоренного выражения в формуле (2), что соответствует выполнению условия максимума для усредненной характеристики $T_{\text{геом}}(\varphi_{iv}(iw))$. Учет достаточно гладкого характера функции $T_{\text{геом}}$ позволяет воспользоваться в задаче формирования профиля полосы наложением условий на усредненные характеристики не во всем интервале полосы, а лишь в нескольких спектральных точках $\varphi_{iv}(iw)$ полосы прозрачности. Действительно, увеличение значения усредненной характеристики в некоторой точке приводит к повышению уровня

усредняемой функции по области. При гладком характере усредненной характеристики эта область оказывается широкой. Согласно общим закономерностям [4] оптических свойств сложнопериодических конструкций (1) выполнение условий оптимизации сводится к поиску состава дополнительных систем w, v при фиксированных параметрах основной системы Q . Осуществим поиск состава дополнительных систем как последовательный поиск приращений Δg_{iv} или Δg_{iw} к величинам толщин g_{iv} или g_{iw} каждого варьируемого слоя. С целью выполнения условий оптимизации решаем уравнения $d(K^2 - P^2 - C^2)/d\Delta g_{i(w)} = 0$.

Решения уравнений находим в следующей форме

$$\left. \begin{matrix} \Delta g_{iw} \\ \Delta g_{in} \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2\varphi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\tau}{v} \right), \quad (11)$$

где при поиске Δg_{in}

$$\gamma = (\beta + c_{1,i-1}) c_{i,p} - (\alpha - d_{1,i-1}) d_{i,p}, \quad \tau = -(\beta + c_{1,i-1}) d_{i,p} - (\alpha - d_{1,i-1}) c_{i,p},$$

$$c_{x,y} = \sum_{l=x}^y v_{lw, (l+1)w} \cos 2(V_t + W_l)\varphi, \quad d_{x,y} = \sum_{l=x}^y v_{lw, (l+1)w} \sin 2(V_t + W_l)\varphi,$$

$$c_{1,0} = d_{1,0} = 0;$$

при поиске Δg_{in}

$$\begin{aligned} v &= (b_{i,t} + \xi) b_{1,i-1} + (v_{0,1v} + a_{1,i-1}) (a_{i,t} - \varepsilon), \\ \tau &= (a_{i,t} - \varepsilon) b_{1,i-1} - (v_{0,1v} + a_{1,i-1}) (b_{i,t} + \xi), \end{aligned}$$

$$a_{x,y} = \sum_{l=x}^y v_{lv, (l+1)v} \cos 2V_l \varphi, \quad b_{x,y} = \sum_{l=x}^y v_{lv, (l+1)v} \sin 2V_l \varphi, \quad a_{1,0} = b_{1,0} = 0.$$

В том случае, когда вариация, осуществляемая согласно (11), дает несколько различных значений толщин слоев, соответствующих одинаковым величинам $T_{\text{геом}}(\varphi_{iv(iw)}) = \max$, в качестве критерия оптимизации используется

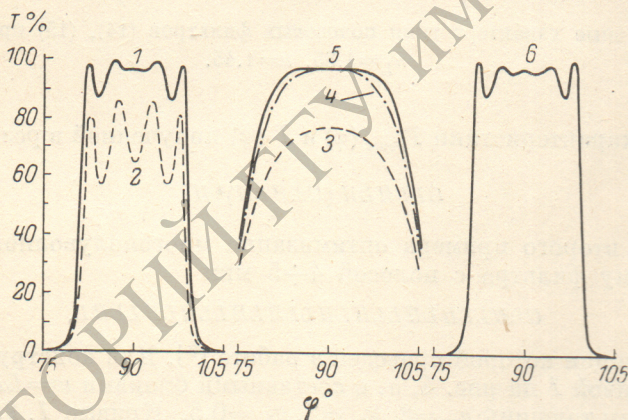


Рис. 3. Спектральные характеристики полосовых фильтров (12), (13) для пары веществ Ge ($n_H = 4.0$) — ZnS ($n_L = 2.35$).

Кривые 1 и 2 соответствуют выбору подложек с n (кварц) = 1,45 и с n (Ge) = 4,0 для системы (12). Кривые 3, 4, 5 описывают характеристики $T_{\text{геом}}$ (°), рассчитанные согласно (2), для исходной системы (12), для системы после первого шага оптимизации и для оптимизированной системы (13). Кривая 6 соответствует прозрачности оптимизированной системы (13) с n (Ge) = 4,0.

условие выбора наибольшего значения характеристики кривизны [10]. Изложенный способ оптимизации реализован на ЭВМ ЕС-1033. В таблице приведены величины толщин слоев дополнительных систем w , v , рассчитанные для трех примеров выделения полос прозрачности заданной ширины. В качестве точек оптимизации выбираются значения $\varphi_{iv(iw)}$ в окрестности центра полосы. Спектральные характеристики сформированных таким образом фильтров представлены кривыми 2, 4, 6 на рис. 1.

Рассмотрим примеры оптимизации конструкций многополуволновых систем [1-3]. На рис. 3 представлены спектральные характеристики интерференционной системы, приведенной в работе [1],

$$GHHLHLHHLHLHLHLHLHLHH. \quad (12)$$

Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 3), которые соответствуют выбору значений $n=1.45$ и $n=4.0$, показывает существенную зависимость гладкости спектрального профиля фильтра от выбора показателя преломления n подложки G . С целью оптимизации покрытия на подложке из Ge ($n=4.0$) опишем, согласно (1), конструкцию (12) следующими составными блоками $w=H$, $q=HLHLH$, $v=H$, что соответствует параметрам исходной системы $m=4$, $N_q=5$, $n_1=n_H$, $n_2=n_L$, $n_{Ng}=n_H$, $g_{1w}=1$, $g_{1v}=1$. Осуществим оптимизацию в результате последовательного поиска толщин g_{2w} , g_{3w} , g_{4w} трех слоев системы w . В качестве точек оптимизации для многополуволновых систем выбираются значения $\varphi_{iv(iw)}=\pi/2$, соответствующие точкам центра полосы. На рис. 3 кривыми 5 и 6 представлены

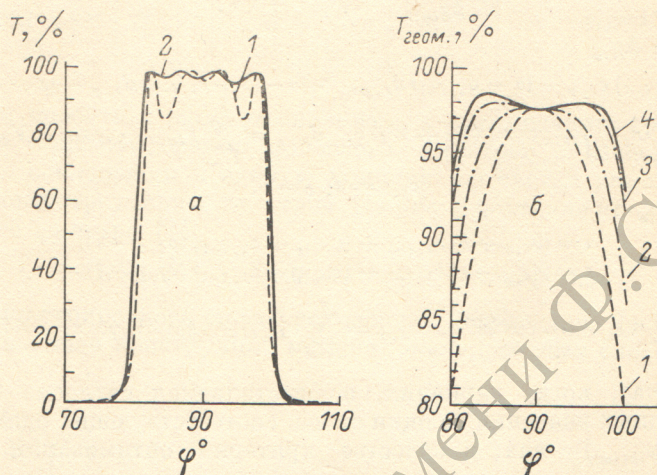


Рис. 4. Спектральные характеристики полосовых фильтров (14), (15) при выборе $n_H=2.2$, $n_L=1.35$, $n=1.45$.

спектральные характеристики $T_{\text{геом}}(\varphi)$ и $T(\varphi)$ полученной в результате оптимизации системы

$$GLLHLH(HLHLH)^4H. \quad (13)$$

В качестве второго примера оптимизации многополуволновых систем рассмотрим систему фильтра с полосой $4 \div 5$ мкм

$$GLHLLHLHLHLHLHLHLHLHLHLHL, \quad (14)$$

расчет конструкции которой проведен в работе [3]. Для конструкции (14), представленной кривой 1 на рис. 4, а, с составными блоками $w=LHL$, $q=LHLHL$, $v=LHL$ находим толщины $g_{1w}=2$, $g_{4w}=2$, $g_{5w}=0.5$. Кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 4, б соответствуют исходной системе, первому, второму и третьему шагам оптимизации. Оптимизированная система, представленная кривой 2 на рис. 4, а принимает вид

$$G0.5LHHLHL(LHLHL)^4LHLHN. \quad (15)$$

Последний пример (рис. 4) хорошо иллюстрирует особенность предложенного метода, которая заключается в возможности сглаживать осцилляции величины коэффициента пропускания в широкой области полосы прозрачности. Метод учитывает в основе своей общие закономерности, присущие полосовым системам [1-3], и может быть использован в конструировании различных типов фильтрующих покрытий.

В заключение автор выражает благодарность Р. К. Мухамедову за участие в расчетах.

Литература

- [1] Н. А. Маскелд. Thin—Film Optical Filters. London, 1969.
- [2] Н. А. Борисевич, В. Г. Верещагин, М. А. Валидов. Инфракрасные фильтры. Наука и техника, Минск, 1971.
- [3] Ю. Н. Марков. Опт. и спектр., 53, вып. 5, 1982.

- [4] Ю. Н. Марков, Е. А. Несмелов, И. С. Гайнутдинов. Опт. и спектр., 49, 990, 1980.
- [5] Ю. Н. Марков, Е. А. Несмелов, А. С. Никитин, И. С. Гайнутдинов. Опт. и спектр., 43, 984, 1977.
- [6] П. Г. Кард. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Валгус, Таллин, 1971.
- [7] Ю. Н. Марков. Опт. и спектр., 46, 961, 1979.
- [8] Е. А. Несмелов, Г. П. Конюхов. Опт.-мех. промышл., № 10, 10, 1961.
- [9] L. I. Erstein. J. Opt. Soc. Am., 42, 806, 1952.
- [10] Ю. Н. Марков, Е. А. Несмелов, А. С. Никитин, И. С. Гайнутдинов. Ж. прикл. спектр., 33, 536, 1980.

Поступило в Редакцию 29 января 1981 г.