

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА КОРОТКОВОЛНОВЫХ ОТРЕЗАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

И. Н. Шкляревский, В. И. Храмцова и Е. А. Лунашко

Предложен графический метод расчета коротковолновых отрезающих фильтров, основанный на представлении об эффективных границах. Рассчитан коротковолновый отрезающий фильтр, состоящий из 15 чередующихся слоев сернистого цинка и криолита. Подавление вторичных максимумов отражения осуществлено путем изменения оптических толщин центрального и обрамляющих слоев четвертьволнового многослойника.

Наиболее распространенной конструкцией коротковолновых отрезающих фильтров являются [1-3]

$$S_1HL \dots LH0.5LS_2 \quad (1)$$

или

$$S_10.5LHL \dots LH0.5LS_2, \quad (2)$$

где H и L — чередующиеся слои с высоким n_H и низким n_L показателем преломления, оптические толщины которых равны $d = t_H n_H = t_L n_L = 0.25\lambda_0$, а S_1 и S_2 — ограничивающие среды. Такие фильтры имеют низкое пропускание T в спектральной области

$$1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \varphi \geq \nu \geq 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \varphi \quad (3)$$

и прозрачны в области

$$2 + \frac{2}{\pi} \arcsin \varphi \geq \nu \geq 2 - \frac{2}{\pi} \arcsin \varphi, \quad (4)$$

где $\varphi = (n_H - n_L)/(n_H + n_L)$ и $\nu = \lambda_0/\lambda$. Область низкого пропускания T тем шире, чем сильнее отличаются друг от друга n_H и n_L . Как показано в [4], отрезающие фильтры имеют наиболее выгодные характеристики при определенном соотношении показателей преломления чередующихся слоев и ограничивающих сред.

В случае $n_H = 2.2$ (ZnS) и $n_L = 1.32$ (Na_3AlF_6) в области (3) T близко к нулю при $N = 15-17$. Но при таком числе слоев N в области прозрачности T существенно меньше единицы. При меньших же N в области (3) T заметно возрастает. В работах [5-10] описаны более совершенные конструкции коротковолновых отрезающих фильтров, — между ограничивающими средами и четвертьволновым многослойником включены согласующие слои. К сожалению, многие из них трудно осуществимы экспериментально.

В ряде случаев могут быть использованы отрезающие фильтры, область высокой прозрачности у которых меньше, чем (4). Ниже описывается предложенный нами графический метод синтеза отрезающих фильтров, в основу которого положено представление об эффективных границах [11, 12]. Заметим, что метод эффективных границ до сих пор обычно применялся для синтеза узкополосных фильтров.

Схему синтезируемого симметричного коротковолнового отрезающего фильтра можно записать

$$SH'k(LH)L'k(HL)H'S, \quad (5)$$

где S — ограничивающие среды, а H' и L' — слои с показателями преломления n_H и n_L и отличными от $d=0.25\lambda_0$ оптическими толщинами. Последние определяются так, чтобы в области прозрачности пропускание фильтра было максимально. У симметричного фильтра оптические тол-

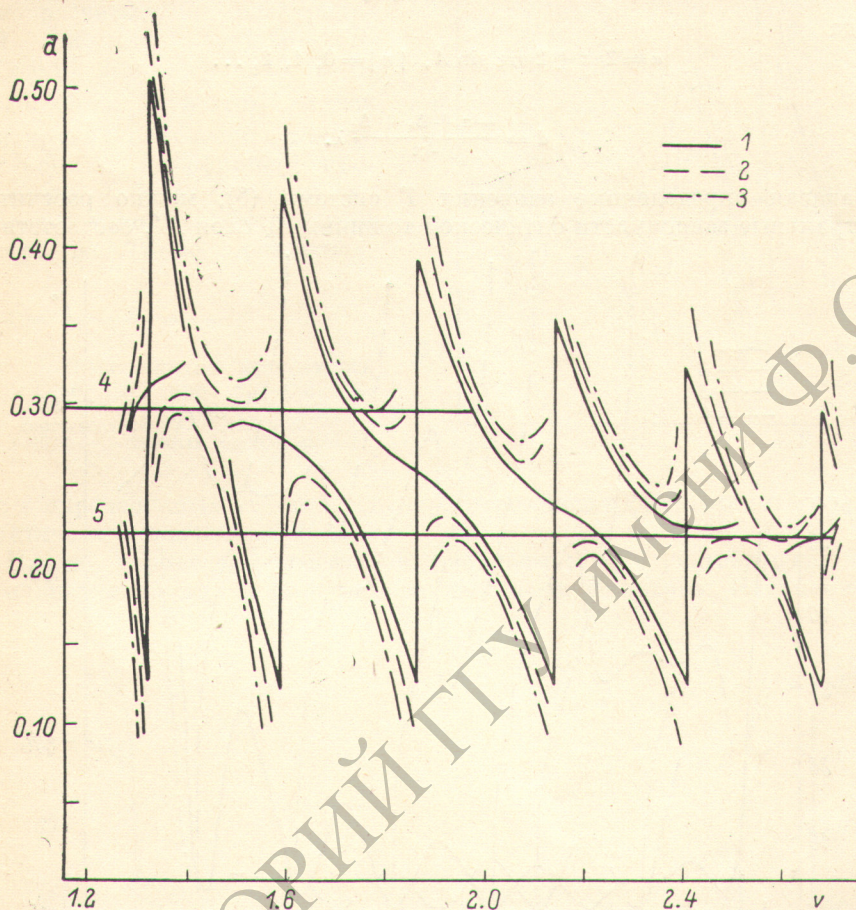


Рис. 1. Спектральные зависимости $d(v)$ слоев H' .

1—3 соответствуют $T=0.967, 0.95, 0.93$; 4, 5 — найденные толщины слоев H' .

щины обоих слоев H' в отличие от несимметричного фильтра должны быть одинаковы. Метод расчета одинаково пригоден как для тех, так и для других фильтров.

Проиллюстрируем графический метод расчета на примере отрезающего фильтра с $N=15$, $n_H=2.2$, $n_L=1.32$ и $n_S=1.52$. Для нахождения оптической толщины слоев H' рассмотрим систему

$$SH'3(LH)S_L, \quad (6)$$

где S_L — среда с показателем преломления n_L . Пропускание такого покрытия можно найти, рассматривая интерференцию света в слое H' , ограниченном подложкой S и шестислойником $3(LH)S_L$. Коэффициенты отражения и скачки фаз на соответствующих границах обозначим через R_1, Δ_1 и R_2, Δ_2 . Величины R_2 и Δ_2 легко рассчитать, а при пренебрежении дисперсией $R_i=0.33$ и $\Delta_i=0$.

Коэффициент пропускания системы (6) записывается

$$T = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 \alpha/2}, \quad (7)$$

где $\alpha = \Delta_1 + \Delta_2 - 4\pi d/\lambda$. Решая (7) относительно $\sin^2 \alpha/2$, получим

$$\sin^2 \alpha/2 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2) - T(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}{4T\sqrt{R_1 R_2}} = A^2, \quad (8)$$

откуда

$$\alpha = 2n\pi \pm 2 \arcsin A, \quad |n| = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

и

$$d = \frac{-\alpha + \Delta_1 + \Delta_2}{4\pi} \lambda. \quad (10)$$

Задавая определенные значения T системы (6), можно рассчитать спектральные зависимости оптической толщины d_H слоя H' , соответствующие

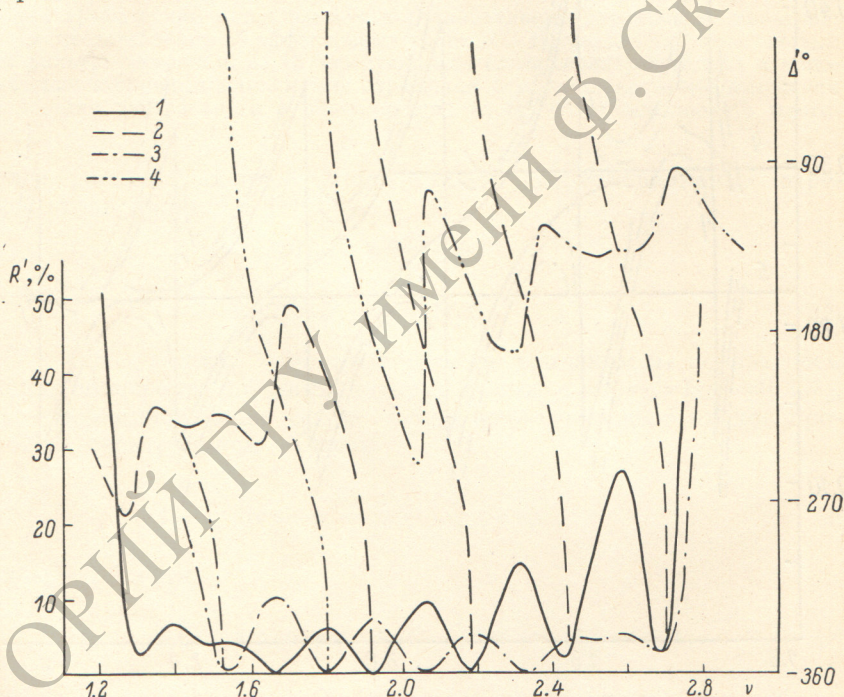


Рис. 2. Спектральные зависимости $R'(\nu)$ (1, 3) и $\lambda'(\nu)$ (2, 4) системы $SH'3(LH) S_L$.

1, 2 соответствуют $d_H = 0.294\lambda_0$, 3, 4 — $d_H = 0.219\lambda_0$.

щие этим заданным T . На рис. 1 приведены зависимости $d_H(\nu)$ для $T = 0.967, 0.95, 0.93$ при $n = -1$. Верхние кривые соответствуют положительному, а нижние — отрицательному знаку в (9).

Теперь не представляет труда найти такую толщину d_H слоя H' , при которой в заданном спектральном интервале ν величина T будет максимальной. Как следует из рис. 1, в интервале $\nu = 1.27 - 2$ и $\nu = 1.72 - 2.72$ коэффициент пропускания системы (6) $T \geq 0.93$ при оптических толщинах слоя H' , соответственно равных $0.297\lambda_0$ и $0.219\lambda_0$.

Следующий этап — расчет коэффициентов отражения R' и скачков фаз Δ' покрытия (6) со стороны S_L для найденных значений оптической толщины слоя H' . Рассчитанные величины приведены на рис. 2.

Нахождение оптической толщины d_L слоя L' проводится аналогичным образом. Для заданных значений T многослойника (5) с помощью формул (7) — (10) рассчитываются спектральные зависимости $d_L(\nu)$. Они приве-

дены на рис. 3 для оптической толщины слоя H' $d_H = 0.297 \lambda_0$. Как следует из рис. 3, в интервале значений $\nu = 1.22 - 1.96$ оптимальная оптическая толщина d_L слоя L' равна $0.219 \lambda_0$. В этом интервале частот $T \geq 0.93$. При $d_L = 0.266 \lambda_0$ в интервале $\nu = 1.29 - 1.81$ коэффициент пропускания $T \geq 0.97$, а при $d = 0.25 \lambda_0$ $T \geq 0.99$ в интервале $\nu = 1.39 - 1.58$.

Как показывают аналогичные расчеты, в спектральной области $\nu = 1.76 - 2.78$ $T \geq 0.91$ при $d_H = 0.219 \lambda_0$ и $d_L = 0.266 \lambda_0$. И в этом случае при других оптических толщинах слоя L' коэффициент пропускания T будет большим, но в более узком спектральном интервале. Такие просветлен-

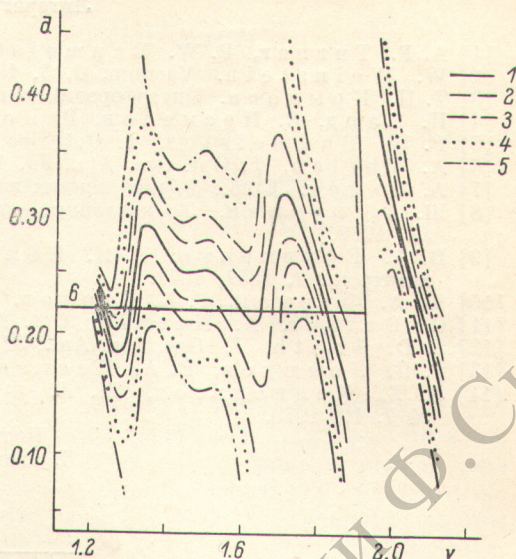


Рис. 3. Спектральные зависимости $d(\nu)$ слоев L' при $d_H = 0.297 \lambda_0$.

1—5 соответствуют $T = 1.00, 0.99, 0.97, 0.93, 0.90$, б — найденная толщина слоя L' .

ные в определенных участках спектра отрезающие фильтры имеют важное практическое значение [13, 14].

На рис. 4 приведены спектральные зависимости $R(\nu)$ четверть волнового пятнадцатислойника и синтезированных нами фильтров. Изменение оп-

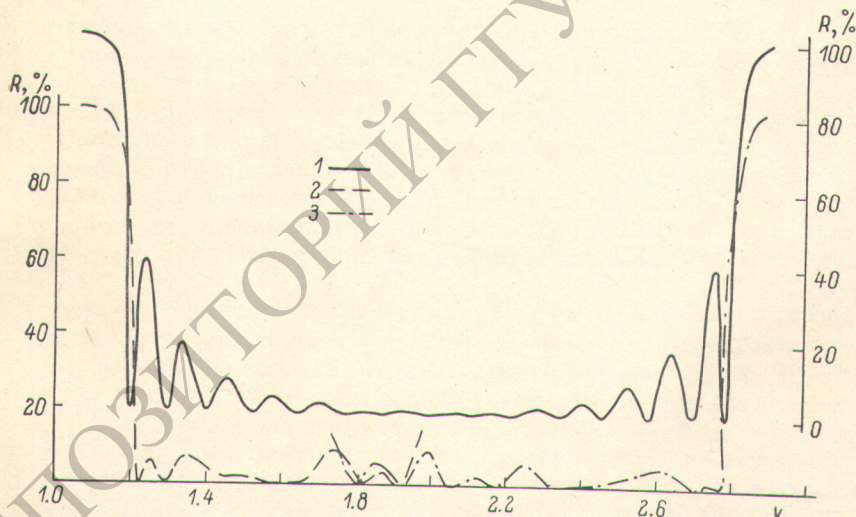


Рис. 4. Спектральные зависимости $R(\nu)$ многослойника $SH'3(LH)L'3(HL)H'S$.

1 — $d_H = d_L = 0.25 \lambda_0$; 2 — $d_H = 0.297 \lambda_0, d_L = 0.219 \lambda_0$; 3 — $d_H = 0.219 \lambda_0, d_L = 0.266 \lambda_0$.

тических толщин слоев H' и L' целенаправленным образом приводит к существенному подавлению вторичных максимумов отражения в соответствующих областях спектра. При этом оптические характеристики области низкого пропускания практически не изменяются: коэффициенты отражения в точке $\nu = 1$ уменьшаются от 99.85 до 99.83 и 99.77% соответственно для фильтров 2 и 3 на рис. 4. В последнем случае область прозрачности и область низкого пропускания разделены значительным спектральным

интервалом. Но и такие фильтры во многих случаях могут найти практическое применение.

Все расчеты были выполнены на ЭВМ М-222 матричным методом.

Литература

- [1] A. F. Turner, P. W. Baumeister. Appl. Opt., 5, 69, 1966.
- [2] W. Weinstein. Vacuum, 4, 3, 1954.
- [3] Т. Н. Крылова. Интерференционные покрытия. Машиностроение, Л., 1973.
- [4] П. Кард, Е. Несмелов, Г. Конюхов. Изв. АН ЭССР, 17, 314, 1968.
- [5] P. W. Baumeister. J. Opt. Soc. Am., 48, 955, 1958.
- [6] A. Thelen. J. Opt. Soc. Am., 56, 1533, 1966.
- [7] А. Телен. В сб.: Физика тонких пленок, 5, 46. «Мир», М., 1972.
- [8] Ш. А. Фурман. Тонкослойные оптические покрытия. «Машиностроение», Л., 1977.
- [9] В. А. Ефременко, Г. Я. Колодный, Б. Б. Мешков. Квант. электрон., 1, 1857, 1974.
- [10] Ш. А. Фурман, Г. Е. Столов. Опт. и спектр., 38, 356, 1975.
- [11] C. Dufour, A. Herpin. Opt. Acta, 1, 1, 1954.
- [12] S. D. Smith. J. Opt. Soc. Am., 51, 1255, 1961.
- [13] Г. П. Конюхов, Е. А. Несмелов. Опт. и спектр., 34, 976, 1973.
- [14] Л. Б. Кацнельсон, Ш. А. Фурман. Оптико-механич. промышл., № 7, 19, 1973.

Поступило в Редакцию 12 сентября 1978 г.
В окончательной редакции 20 августа 1979 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени С.С. Корень