

5. Пуговкин А. В. К теории брэгговских анализаторов спектра // Акустооптические методы и техника обработки информации.—Л.: ЛИАП, 1980.— Вып. 142.
6. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах.—М.: Сов. радио, 1973.

Поступила в редакцию 6 января 1989 г.

УДК 681.332(088.8) : 535.345.6

Е. Г. СТОЛОВ

(Ленинград)

СИНТЕЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Одна из важнейших задач технической кибернетики — разработка новых методов решения сложных нелинейных уравнений, возникающих при синтезе многокомпонентных систем с заданными физическими свойствами.

Анализ накопленных к настоящему времени данных позволяет заключить, что одним из наиболее перспективных направлений решения этой проблемы является поиск решений на сетке с последующей оптимизацией, так как такой метод универсален, не требует пулевого приближения, применим для любых видов функционала качества.

Для успешной реализации этого метода необходима разработка теории, обеспечивающей максимальное быстродействие при проверке точек, принадлежащих области изменения неизвестных, на соответствие уравнению.

Для разработки такой теории были проанализированы, с одной стороны, общие свойства реальных сложных физических систем, а с другой — возможности современных ЭВМ, являющихся пока единственным инструментом при решении громоздких задач обработки информации.

Кроме того, была учтена специфика рассматриваемой задачи: проверка в единицу времени как можно большего числа различных физических систем на наличие у них требуемых свойств.

Одна из важных особенностей реальных физических систем заключается в возможности их представления в виде нескольких более простых подсистем и описания конкретных свойств всей системы в целом с помощью нескольких «интегральных параметров», характеризующих каждую из подсистем. Термин «интегральные параметры» употреблен в том смысле, что они полностью характеризуют физические свойства подсистемы при определенных взаимодействиях и не содержат явно информации о конструктивном выполнении каждой подсистемы.

Например, пусть имеется система, состоящая из большого числа электрических зарядов, и нужно рассчитать действие такой системы на пробный заряд, расположенный в некоторой области пространства. Данную задачу можно решить, рассчитав поле каждого заряда системы в области расположения пробного заряда и сложив векторно все эти поля с целью нахождения результирующего поля. Другой путь, положенный в основу развитой теории, заключается в разбиении всей системы зарядов на несколько подсистем, определении напряженности поля, создаваемого каждой подсистемой, и сложении напряженностей полей подсистем, причем в последнем случае затраты времени на расчет одного варианта значительно меньше, чем в предыдущем. Напряженность электрического поля, создаваемого подсистемой, является «интегральным параметром», описывающим ее существенные в рамках решаемой задачи свойства, т. е. она характеризует взаимодействие подсистемы с другими зарядами и в то же время не содержит сведений о числе зарядов, входящих в подсистему, их величинах и расположении.

Другим важным общим свойством реальных физических систем является наличие таких подсистем, которые, будучи приведены во взаимодействие с исходной системой, не оказывают существенного влияния на ее физические свойства. Например, если систему электрических зарядов поместить внутрь равномерно заряженной сферы, то поле не изменится. Это свойство также было использовано при создании новой теории синтеза.

С другой стороны, были учтены свойства современных ЭВМ: возможность хранения в оперативной памяти больших массивов данных и возможность быстрого извлечения из нее нужных чисел в процессе вычислений, а также то обстоятельство, что один и тот же сигнал может параллельно поступать на несколько дешифраторов, каждый из которых связан со своим блоком памяти, и из каждого блока памяти извлекать требуемые числа, необходимые для дальнейших вычислений. Кроме того, было принято во внимание, что поскольку вычисление значений даже элементарных функций требует больших затрат машинного времени, то количество таких действий должно быть минимально.

Учтем возможность представления сложной системы в виде нескольких подсистем. Пусть рассматриваемая исходная система разбита на C подсистем. Очевидно, что если для каждой подсистемы будем брать S возможных вариантов, то, имея в оперативной памяти ЭВМ сведения о CS подсистемах, можно проанализировать $M = S^C$ систем. Например, при $C = 3$, $S = 100$, $M = 10^6$, т. е., имея в оперативной памяти ЭВМ предварительно заложенную информацию о небольшом числе подсистем, входящих в сложную систему, можно проанализировать свойства большого числа вариантов сложной системы.

Выведем общий вид нелинейного уравнения, описывающего физические свойства сложной системы через «интегральные параметры», характеризующие свойства подсистем. Пусть i -ю подсистему ($1 \leq i \leq C$) описывают «конструктивные» параметры $X_{r_1}^{(i)}, X_{r_2}^{(i)}, \dots, X_{r_{k_i}}^{(i)}$. Например, в рассмотренном выше случае электрической системы зарядов такими параметрами являются координаты зарядов и их величины.

«Интегральный параметр», описывающий i -ю подсистему, является функцией от вышеперечисленных конструктивных параметров и может быть записан в виде функции $\varphi_i(X_{r_1}^{(i)}, X_{r_2}^{(i)}, \dots, X_{r_{k_i}}^{(i)})$. В зависимости от конкретной задачи таких параметров может быть несколько. Например, в случае системы электрических зарядов их три — напряженности электрического поля в направлениях x, y, z . Свойства сложной системы через «интегральные параметры» будут описываться выражением

$$F(\varphi_1(X_{r_1}^{(1)}, X_{r_2}^{(1)}, \dots, X_{r_{k_1}}^{(1)}), \dots, \varphi_C(X_{r_1}^{(C)}, X_{r_2}^{(C)}, \dots, X_{r_{k_C}}^{(C)})). \quad (1)$$

Тогда нелинейное уравнение, которому должны удовлетворять $\{x_i\}$ для наличия у сложной физической системы совокупности требуемых свойств, принимает вид

$$F(\varphi_1(X_{r_1}^{(1)}, X_{r_2}^{(1)}, \dots, X_{r_{k_1}}^{(1)}), \dots, \varphi_C(X_{r_1}^{(C)}, X_{r_2}^{(C)}, \dots, X_{r_{k_C}}^{(C)})) = A, \quad (2)$$

т. е. представляет суперпозицию функций от неизвестных. Заметим, что одни и те же неизвестные могут входить в разные функции суперпозиции.

С учетом вышеизложенного для решения уравнений типа (1) в настоящей работе предложена следующая идея, позволяющая реализовать поиск на равномерной сетке в пространстве неизвестных, обеспечив при этом максимальное быстродействие. Значения функций φ_i , $i = 1, 2, \dots, C$, для точек из области изменения неизвестных, в которых производится поиск, вычисляются предварительно и вводятся в оперативную память ЭВМ под определенными номерами, зависящими от набора значений $(X_{r_1}^{(i)}, X_{r_2}^{(i)}, \dots, X_{r_{k_C}}^{(i)})$, где они удерживаются в течение всего

процесса вычисления. Причем для каждой φ_i формируется свой блок памяти и полное число таких блоков памяти равно C . Каждой точке из области изменения неизвестных, которая проверяется на соответствие уравнению (2), присваивается определенный номер, зависящий от значений всех неизвестных в этой точке. В процессе вычислений на определенном регистре последовательно формируются позиционные коды номеров точек из области изменения неизвестных. С этого регистра снимается информация о номерах ячеек в блоках памяти, хранящих значения φ_i , $i = 1, 2, \dots, C$. По этим номерам осуществляется обращение ко всем C блокам памяти и из них извлекают требуемые значения функций φ_i . Затем вычисляется функция $F(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_C)$ и ее значение сопоставляется с числом A , стоящим в правой части уравнения (2).

Опишем аналитическую схему расчетов. Не ограничивая общности, рассмотрим уравнение

$$F\left(\alpha\left(X_{k_1(1)}, X_{k_2(1)}, \dots, X_{k_m(1)}\right), \beta\left(X_{k_1(2)}, X_{k_2(2)}, \dots, X_{k_m(2)}\right), \gamma\left(X_{k_1(3)}, X_{k_2(3)}, \dots, X_{k_m(3)}\right)\right) = A, \quad (3)$$

где X_i — неизвестные, причем $i = 1, 2, \dots, 2m$, т. е. уравнение содержит $2m$ неизвестных и в каждую из функций суперпозиции входит по m неизвестных. Одни и те же неизвестные могут входить в разные функции суперпозиции. Будем искать решения на равномерной сетке в пространстве неизвестных, при этом каждое неизвестное может принимать t значений. Всего в результате вычислений будет проанализировано t^{2m} точек. Номер изменяется в интервале $0 \leq N < t^{2m}$. Номер точки N однозначно определяет значения неизвестных X_1, X_2, \dots, X_{2m} согласно формулам

$$X_i(N) = X_i + \frac{X_i^{(2)} - X_i^{(1)}}{t-1} a_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2m; \\ N = a_1 + a_2 t + \dots + a_{2m} t^{2m-1}, \quad (4)$$

где $[X_i^{(1)}, X_i^{(2)}]$ — область изменения X_i , $i = 1, 2, \dots, 2m$; a_i — целое неотрицательное число; $a_i < t$. Таким образом, число a_1, a_2, \dots, a_{2m} представляет число N в t -й системе исчисления.

Процесс решения уравнения типа (3) происходит следующим образом (см. рисунок).

1. На ЭВМ просчитываются значения функции

$$\alpha_l = \alpha\left(X_{k_1(1)}(a_{k_1(1)}), X_{k_2(1)}(a_{k_2(1)}), \dots, X_{k_m(1)}(a_{k_m(1)})\right), \quad (5)$$

$$l = a_{k_1(1)} + a_{k_2(1)} t + \dots + a_{k_m(1)} t^{m-1}, \quad 0 \leq l < t^m; \quad (6)$$

$$\beta_p = \beta\left(X_{k_1(2)}(a_{k_1(2)}), X_{k_2(2)}(a_{k_2(2)}), \dots, X_{k_m(2)}(a_{k_m(2)})\right), \quad (7)$$

$$p = a_{k_1(2)} + a_{k_2(2)} t + \dots + a_{k_m(2)} t^{m-1}, \quad 0 \leq p < t^m; \quad (8)$$

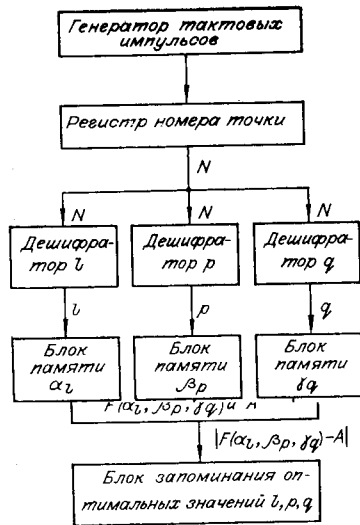
$$\gamma_q = \gamma\left(X_{k_1(3)}(a_{k_1(3)}), X_{k_2(3)}(a_{k_2(3)}), \dots, X_{k_m(3)}(a_{k_m(3)})\right), \quad (9)$$

$$q = a_{k_1(3)} + a_{k_2(3)} t + \dots + a_{k_m(3)} t^{m-1}, \quad 0 \leq q < t^m. \quad (10)$$

Вычисленные значения α_l , β_p и γ_q удерживаются в своих блоках памяти под номерами соответственно l , p и q .

2. Последовательно перебираются значения N от 0 до $(t^{2m} - 1)$, и для каждого N по формулам (6), (8), (10) определяются соответствующие значения l , p , q . По найденным l , p , q из блоков памяти извлекают значения α_l , β_p , γ_q и по ним вычисляют величины

$$F(\alpha_l \beta_p \gamma_q), \quad 0 \leq l, p, q < t^m, \quad (11)$$



Блок-схема алгоритма поиска решений нелинейного уравнения на равномерной сетке в пространстве неизвестных

т. е. значения функции, стоящей в уравнении (3) слева, в точке, принадлежащей области изменения неизвестных $-X_1(a_1), X_2(a_2), \dots, X_{2m}(a_{2m})$.

3. В процессе вычислений выявляются значения l, p, q , для которых выполняется соотношение

$$A - \varepsilon < F(\alpha_l, \beta_p, \gamma_q) < A + \varepsilon. \quad (12)$$

малына.

4. Для этих трех значений l, p и q определяют соответствующие им значения X_1, X_2, \dots, X_{2m} ; l, p и q представляют в t -й системе исчисления в соответствии с формулами (6), (8), (10), затем согласно формулам (4) определяют иско-

по найденным a_1, a_2, \dots, a_{2m} соответствующие значения X_1, X_2, \dots, X_{2m} .

5. После этого вычисленные значения неизвестных оптимизируются, например, по программе градиентного спуска или релаксационным методом [1, 2].

Достоинство описанной схемы расчетов заключается в достижении максимального быстродействия при поиске решений на сетке за счет полного предотвращения дублирования вычислительных операций в процессе анализа разных точек из области изменения неизвестных. Эффект достигается тем, что значения функций φ_i не вычисляются заново при проверке каждой точки из области изменений неизвестных, а берутся из оперативной памяти ЭВМ. Быстродействие метода определяется затратами времени на вычисление функции $F(\alpha_l, \beta_p, \gamma_q)$ и, что очень важно, не зависит от числа элементов (например, слоев интерференционного покрытия), входящих в сложную систему. Кроме того, достоинством развитой теории является ее возможность учитывать очень сложные взаимодействия, когда параметры одних и тех же элементов входят в описание разных подсистем.

Проиллюстрируем разработанный алгоритм на примере решения задачи синтеза интерференционных покрытий, обладающих требуемыми спектральными характеристиками.

Цель расчета: определение оптических толщин слоев покрытия, обеспечивающих на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ заданные значения энергетических коэффициентов пропускания. Показатели преломления слоев и обрамляющих покрытие сред при этом предполагаются фиксированными.

Любое интерференционное покрытие может при теоретическом рассмотрении представляться в виде структуры $\Pi_1 - P - \Pi_2$, где P — разделительный слой, роль которого может выполнять любой из внутренних слоев покрытия; Π_1 и Π_2 — части покрытия, расположенные слева и справа относительно разделительного слоя. В случае нормального падения светового потока и отсутствия поглощения в слоях энергетический коэффициент пропускания T , соответствующий длине волны λ , опреде-

ляется формулой [3]

$$T = \frac{(1 - \rho_1^2(\lambda))(1 - \rho_2^2(\lambda))}{1 + \rho_1^2(\lambda)\rho_2^2(\lambda) - 2\rho_1(\lambda)\rho_2(\lambda)\cos\left(\Delta_1(\lambda) + \Delta_2(\lambda) + \frac{4\pi n_a d_a}{\lambda}\right)}, \quad (13)$$

где $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ — модули амплитудных коэффициентов отражения обеих частей покрытия Π_1 и Π_2 ; $\Delta_1(\lambda)$ и $\Delta_2(\lambda)$ — сдвиги фазы электрического вектора при отражении со стороны разделительного слоя для частей покрытия Π_1 и Π_2 ; n_a и d_a — показатель преломления и геометрическая толщина разделительного слоя. $(2m + 1)$ -слоиное интерференционное покрытие может быть представлено в виде: Π_1 — первые m слоев, P — разделительный $(m + 1)$ -слой, Π_2 — $(m + 2)$ -, $(m + 3)$ -... $(2m + 1)$ -й слой.

В этом случае для нахождения оптических толщин покрытия, обладающего требуемыми энергетическими коэффициентами пропускания T_1, T_2, \dots, T_r на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ соответственно, получаем систему r уравнений:

$$\begin{aligned} T(\rho_1(X_1, X_2, \dots, X_m, \lambda_f), \Delta_1(X_1, X_2, \dots, X_m, \lambda_f), \\ \rho_2(X_{m+2}, X_{m+3}, \dots, X_{2m+1}, \lambda_f), \Delta_2(X_{m+2}, X_{m+3}, \dots \\ \dots, X_{2m+1}, \lambda_f), X_{m+1}, \lambda_f) = T_f, f = 1, 2, \dots, r, \end{aligned} \quad (14)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_{2m+1}$ — оптические толщины слоев покрытия.

Расчет значений ρ_1, Δ_1, ρ_2 и Δ_2 осуществляется по известному алгоритму [4].

Программа, реализующая вышеописанный метод численного решения нелинейных уравнений применительно к задаче синтеза интерференционных оптических покрытий, была составлена для ЭВМ ЕС 1040. В ЭВМ вводились следующие исходные данные: $[X_i^{(1)}, X_i^{(2)}]$, $i = 1, 2, \dots, (2m + 1)$, — границы областей изменения оптических толщин слоев покрытия в единицах $\lambda_0/4$ (λ_0 — условная единица измерения оптических толщин слоев покрытия и длин волн излучения); целые числа: t, r ; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ в единицах λ_0 и T_1, T_2, \dots, T_r ; $n_0, n_1, \dots, n_{2m+1}, n_{2m+2}$ — показатели преломления слоев покрытия и обрамляющих сред. После проведения расчетов по вышеуказанной программе конструкция покрытия оптимизировалась по программе градиентного спуска. После окончания расчетов на печать выводились оптические толщины слоев до и после оптимизации.

Ниже представлены результаты расчетов некоторых типов покрытий. В табл. 1 приводятся конструкции просветляющих покрытий на три длины волны для разных значений показателей преломления подложки n_p . Показатели преломления слоев равны $n_s = 2,0$ и $n_n = 1,45$.

Т а б л и ц а 1

Длины волн	$\lambda_1=0,5\lambda_0 \quad \lambda_2=1,0\lambda_0 \quad \lambda_3=1,2\lambda_0$									
	$n_p=1,52$		$n_p=1,60$		$n_p=1,65$		$n_p=1,70$		$n_p=1,75$	
Показатель преломления подложки										
Номер слоя	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1,400	1,388	1,400	1,396	1,400	1,401	1,200	1,205	1,200	1,200
2	0,600	0,597	0,600	0,589	0,600	0,588	1,200	1,187	1,200	1,200
3	1,200	1,158	1,200	1,188	1,200	1,194	0,200	0,212	0,200	0,200
4	0,200	0,194	0,200	0,185	0,200	0,184	1,400	1,391	1,400	1,400
5	1,400	1,409	1,400	1,396	1,400	1,386	0,200	0,193	0,200	0,200
6	0,200	0,190	0,200	0,215	0,200	0,229	1,000	0,986	1,000	1,000
7	1,000	1,014	1,000	1,008	1,000	1,017	0,200	0,193	0,200	0,200
$R_1, \%$	0,01	0,10	0,10	0,05	0,15	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05
$R_2, \%$	0,55	0,25	0,20	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05
$R_3, \%$	0,20	0,20	0,05	0,05	0,10	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05

что соответствует паре веществ $ZrO_2 - SiO_2$, причем к подложке и к воздуху прилегают слои SiO_2 .

Толщины слоев даны в единицах $\lambda_0/4$, длины волн — в единицах λ_0 . Слои нумеруются от воздуха. Внизу даны значения энергетических коэффициентов отражения покрытий на заданных длинах волн. В столбце 1 указаны значения оптических толщин до оптимизации, в столбце 2 — после оптимизации. Результаты подтверждают эффективность предлагаемой схемы расчетов.

Данный подход к синтезу сложных физических систем, основанный на учете их свойств, позволяет также расширить возможность методов оптимизации [4, 2]. Недостаток большинства существующих методов оптимизации заключается в их локальности, т. е. в том, что они позволяют осуществлять поиск в узкой зоне изменения параметров вблизи локального минимума функционала качества. Ряд авторов предлагает устранять это ограничение путем добавления к уже рассчитанной системе дополнительных подсистем и последующей оптимизации параметров образовавшейся системы [5, 6]. Однако авторы этих работ не приводят никаких критериев для выбора параметров добавляемых подсистем, а при произвольном их выборе характеристики системы могут настолько ухудшаться, что последующая оптимизация не позволяет достичь даже исходного уровня.

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее общих свойств большинства физических систем является наличие таких подсистем, которые, будучи приведены во взаимодействие с первичной системой, не изменяют ее свойств в определенной зоне пространства или спектра или в заданных временных интервалах.

Именно такие подсистемы целесообразно добавлять к рассчитанной системе с целью продолжения процесса оптимизации, так как данная добавка существенно не ухудшает свойств системы и в то же время позволяет продолжить оптимизацию, поскольку число варьируемых параметров увеличилось. Проиллюстрируем такой подход, как и в предыдущем случае, на примере синтеза интерференционных покрытий с заданными оптическими свойствами. В этом случае выбор параметров добавляемых слоев может осуществляться на основе теории эквивалентных слоев [7, 8], согласно которой любая симметричная система пленок по своим оптическим свойствам идентична одной пленке, обладающей эффективным показателем преломления N_E и эффективной оптической толщиной Γ_E , причем N_E и Γ_E меняются в зависимости от длины волны излучения. Известно, что секции типа

$$(qL)[2(1-q)H](qL) \text{ или } (qH)[2(1-q)L](qH), \quad (15)$$

где $[2(1-q)H]$ и $[2(1-q)L]$ — слои с высоким n_n и низким n_n показателями преломления соответственно и оптической толщиной $2(1-q)\lambda_0/4$; (qH) и (qL) — слои с высоким и низким показателями преломления соответственно и оптической толщиной $q\lambda_0/4$, изменяют свой эффективный показатель в интервале $n_n \leq N_E \leq n_n$ при вариации q в интервале $[0, 1]$. Причем вышеуказанные системы в широком интервале длин волн почти не меняют значение N_E . Это обстоятельство позволяет использовать их в качестве дополнительных групп слоев, вводимых в покрытие. В покрытие, оптические свойства которого необходимо улучшить и применительно к которому обычные методы оптимизации дальнейшего улучшения не дают, между интерференционным покрытием и одной из обрамляющих сред вводится одна или несколько систем типа (15). Величина q при этом выбирается таким образом, чтобы значение N_E было примерно равно показателю преломления обрамляющей среды. Затем значения оптических толщин оптимизируются градиентным или релаксационным методом. Далее процедура может повторяться. Для иллюстрации рассмотрим расчет ахроматического просветляющего покрытия. В качестве исходной конструкции было выбрано 5-слойное просветляющее покрытие, конструкция которого приводится в табл. 2, столбцы

Таблица 2

Номер слоя	Показатель преломления слоя	Оптические толщины слоев в единицах $\lambda_0/4$ (отсчет от подложки)			
		3	4	5	6
1	1,46	1,775	0,029	0,042	0,047
2	2,20	0,221	0,032	0,035	0,044
3	1,46	0,221	1,928	0,103	0,074
4	2,20	1,569	0,217	0,022	0,007
5	1,46	0,852	0,225	2,017	0,087
6	2,20		1,593	0,253	0,018
7	1,46		0,854	0,189	2,030
8	2,20			1,057	0,303
9	1,46			0,858	0,164
10	2,20				1,414
11	1,46				0,871
$\Phi \cdot 10^8$		644	530	411	351

1—3. В процессе расчета между подложкой и покрытием трижды вводилась система $(0,05L)(0,1H)(0,05L)$, после чего конструкция каждый раз оптимизировалась методом градиентного спуска. При этом функционал качества имел вид

$$\Phi(\mathbf{X}) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [R(\mathbf{X}, \alpha) - F(\alpha)]^2 d\alpha, \quad (16)$$

где \mathbf{X} — совокупность варьируемых параметров; $F(\alpha)$ — требуемая спектральная характеристика покрытия в интервале $[\alpha_1, \alpha_2]$, $\alpha = \frac{\pi \lambda_0}{2 \lambda}$; λ — длина волны излучения в вакууме. Конструкции покрытий, полученных в результате расчетов, представлены в табл. 2 (нижняя строка — значения функционала качества). Как видно из таблицы, по мере увеличения числа слоев значение Φ уменьшается, т. е. качество покрытий улучшается, что подтверждает эффективность рассмотренной схемы.

Таким образом, предлагаемые подходы к задаче синтеза, учитывающие физические свойства реальных систем, перспективны. Они являются универсальными. Для их адаптации к различным задачам необходимо только разработать математическое описание физических свойств сложной системы через «интегральные параметры» подсистем и методику расчета конструкций подсистем, не влияющих существенно на физические свойства системы, с которой они вступают во взаимодействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baumeister P. W. Design of multilayer filters by successive approximations // JOSA.— 1958.— 48.— P. 955.
2. Zycha H. Refining algorithm for the design of multilayer filters // Appl. Opt.— 1973.— 2.— P. 979.
3. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия.— Л.: Машиностроение, 1977.
4. Физика тонких пленок/Под ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна.— М.: Мир, 1972.— Т. 5.
5. Шатилов А. В., Тютикова Л. П. Пример расчета интерференционного светофильтра методом последовательного синтеза // Оптика и спектроскопия.— 1963.— 14.— С. 426.
6. Pelletier E., Klapisch M., Giacomo P. D'empilements de couches minces // Nouv. Rev. d'Opt. Appliquée.— 1971.— 2, N 5.— P. 247.
7. Herpin A. Calcul du pouvoir reflecteur d'un systeme stratific quelconque // Comp. rend. Acad. Sci.— 1947.— 182.— P. 225.
8. Epstein L. I. The design of optical filters // JOSA.— 1952.— 42, N 11.— P. 806.

Поступила в редакцию 6 апреля 1988 г.