

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ОТКЛОНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ

НГО ТХАЙ ФИ, Л. А. ГУБАНОВА, ФАМ ВАН ХОА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ngothaiphbn@gmail.com

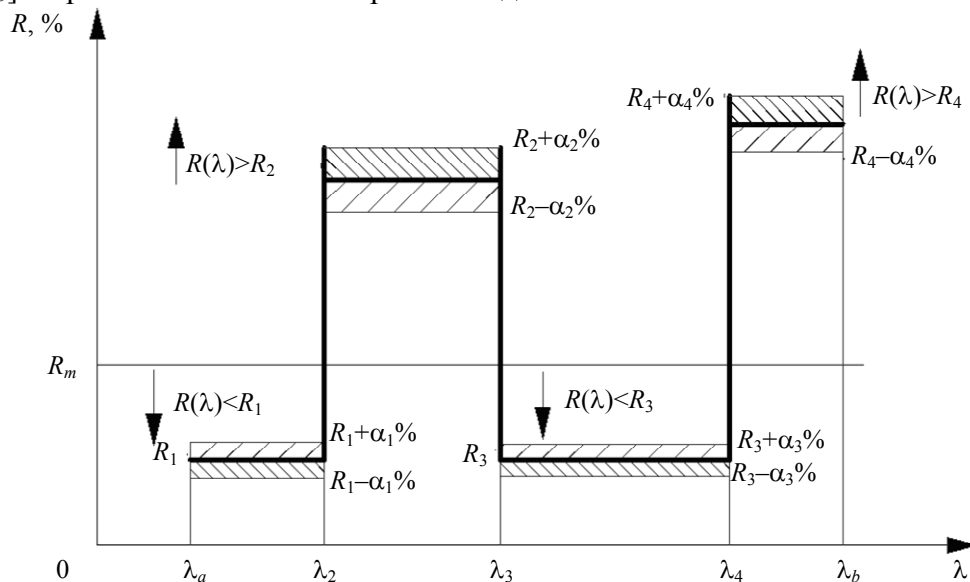
Предложено использовать функцию качества как целевую при расчете параметров интерференционного покрытия. Представлен алгоритм определения конструкции интерференционного покрытия, обладающего заданным энергетическим коэффициентом отражения или пропускания в определенном диапазоне спектра, у которого спектральные характеристики нечувствительны или малочувствительны к отклонениям параметров слоев от полученных в процессе синтеза. Анализ полученной конструкции покрытия подтверждает работоспособность данного алгоритма

Ключевые слова: синтез интерференционных покрытий, отклонение оптической толщины, целевая функция, стабильность, алгоритм, светоделиитель

В настоящей работе решается общая задача определения конструкций интерференционных покрытий, спектральные характеристики коэффициента отражения (и при использовании непоглощающих материалов, пропускания) которых удовлетворяют следующим условиям в рассматриваемом диапазоне длины волн $[\lambda_a—\lambda_b]$:

$$\begin{aligned} R(\lambda) < R_1 \pm \alpha_1 \% \text{ на участке спектра } [\lambda_a—\lambda_1]; \quad R(\lambda) > R_2 \pm \alpha_2 \% \text{ на } [\lambda_1—\lambda_2], \\ R(\lambda) < R_3 \pm \alpha_3 \% \text{ на } [\lambda_2—\lambda_3]; \quad R(\lambda) > R_4 \pm \alpha_4 \% \text{ на } [\lambda_3—\lambda_b], \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — допустимые отклонения коэффициента отражения от требуемого значения, $[\lambda_a—\lambda_b]$ — рабочая область спектрального диапазона.



На рис. 1 представлены общие требования к спектральным характеристикам коэффициента отражения интерференционных покрытий в заданном диапазоне спектра $\lambda_a—\lambda_b$.

Первым шагом в создании любого интерференционного покрытия является синтез его конструкции. С этой целью определяются несколько параметров конструкции покрытий (число слоев, оптическая толщина каждого слоя, показатели преломления материалов, из ко-

торых формируются слои), что позволяет получить требуемые или наиболее близкие к ним спектральные характеристики коэффициента отражения. При синтезе интерференционного покрытия в работах [1—8] использованы численные методы, позволяющие решить задачу минимизации функции качества $F(\mathbf{X})$. В работах [2, 3, 5, 7] рассмотрены различные параметры, определяющие функцию качества, в настоящее время наиболее часто используется среднеквадратичная функция [5]:

$$F(\mathbf{X}) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} v(\lambda)[R(\mathbf{X}, \lambda) - R(\lambda)]^2 d\lambda \quad \text{или} \quad F'(\mathbf{X}) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} v(\lambda)|R(\mathbf{X}, \lambda) - R(\lambda)| d\lambda, \quad (2)$$

если предположить, что $v(\lambda)=1$, то

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^L \Delta\lambda [R(\mathbf{X}, \lambda) - R(\lambda)]^2 \quad \text{или} \quad F'(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^L \Delta\lambda \cdot |R(\mathbf{X}, \lambda) - R(\lambda)|, \quad (3)$$

где $R(\lambda)$ — требуемые спектральные характеристики коэффициента отражения в заданном диапазоне спектра. \mathbf{X} — вектор искомых параметров системы в текущий момент времени, в общем виде $\mathbf{X} = \{n_1 d_1, n_1, n_2 d_2, n_2, \dots, n_k d_k, n_k, k\}$, k — число слоев в текущий момент времени, $n_i d_i$ — изменение значения оптической толщины i -го слоя, n_i — показатель преломления i -го слоя. $R(\mathbf{X}, \lambda)$ — спектральные характеристики коэффициента отражения, рассчитанные при параметре системы X :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_b - \lambda_a}{L},$$

L — число отрезков спектрального интервала $\lambda_a - \lambda_b$.

Из соотношений (2) и (3) видно, что значение функции качества всегда положительное и лучший вариант конструкции покрытия получается, когда это значение близко к нулю. В таком случае $R(\lambda)=R_1$ на участке спектра $[\lambda_a - \lambda_1]$, $R(\lambda)=R_2$ в $[\lambda_1 - \lambda_2]$, $R(\lambda)=R_3$ в $[\lambda_2 - \lambda_3]$, $R(\lambda)=R_4$ в $[\lambda_3 - \lambda_b]$. Поэтому в процессе синтеза нереально получить интерференционные покрытия, у которых спектральные характеристики лучше заданных. При оптимизации структуры покрытий в какой-то момент качество покрытия с текущими параметрами слоев становится выше требуемого, но при этом значение функции качества не достигает минимального значения. Программа продолжает оптимизацию до получения минимального значения функции качества. Например, в случаях $R(\lambda) < R_1$ на $[\lambda_a - \lambda_1]$, $R(\lambda) > R_2$ на $[\lambda_1 - \lambda_2]$, $R(\lambda) < R_3$ на $[\lambda_2 - \lambda_3]$, $R(\lambda) > R_4$ на $[\lambda_3 - \lambda_b]$ спектральные характеристики коэффициента отражения покрытий удовлетворяют требованиям технического задания, и полученное значение функции качества достигает минимума. Такой вариант несколько хуже, чем $(R(\lambda)=R_1$ на участке спектра $[\lambda_a - \lambda_1]$, $R(\lambda)=R_2$ на $[\lambda_1 - \lambda_2]$, $R(\lambda)=R_3$ на $[\lambda_2 - \lambda_3]$, $R(\lambda)=R_4$ на $[\lambda_3 - \lambda_b])$.

Рассмотрим новую целевую функцию $F_{ц}(\mathbf{X})$:

$$F_{ц}(\mathbf{X}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^N |D(\mathbf{X}, \lambda_j)| \Delta\lambda, \quad (4)$$

где N — число точек в спектральном диапазоне, $\Delta\lambda=(\lambda_a - \lambda_b)/N$,

$$D(\mathbf{X}, \lambda_j) = \begin{cases} 0 \text{ в } [\lambda_a - \lambda_1] \text{ или } [\lambda_2 - \lambda_3] \text{ если } R(\mathbf{X}, \lambda) \leq R(\lambda), \\ R(\lambda) - R(\mathbf{X}, \lambda) \text{ в } [\lambda_a - \lambda_1] \text{ или } [\lambda_2 - \lambda_3] \text{ если } R(\mathbf{X}, \lambda) \geq R(\lambda), \\ 0 \text{ в } [\lambda_1 - \lambda_2] \text{ или } [\lambda_3 - \lambda_b] \text{ если } R(\mathbf{X}, \lambda) \geq R(\lambda), \\ R(\mathbf{X}, \lambda) - R(\lambda) \text{ в } [\lambda_1 - \lambda_2] \text{ или } [\lambda_3 - \lambda_b] \text{ если } R(\mathbf{X}, \lambda) \leq R(\lambda), \end{cases} \quad (5)$$

где $R(\lambda)$ — требуемые спектральные характеристики коэффициента отражения.

Из рис. 1 и формулы (2) видно, что при $F_{ц}(\mathbf{X})=0$ значение коэффициента отражения на участках $[\lambda_a-\lambda_1]$ и $[\lambda_2-\lambda_3]$ возможно меньше заданного R_1 и R_3 , соответственно, а на участках $[\lambda_1-\lambda_2]$ и $[\lambda_3-\lambda_b]$ — больше, чем R_2 и R_4 . В этом случае полученные спектральные характеристики коэффициента отражения удовлетворяют требованиям. Далее задача определения параметров интерференционного покрытия решается как задача минимизации целевой функции $F_{ц}(\mathbf{X}) \rightarrow \min$. Это значит, что чем меньше значение целевой функции, тем ближе получаемые в процессе синтеза характеристики коэффициента отражения полученного покрытия к требуемым. Значение целевой функции пропорционально площади, соответствующей различию заданных и полученных спектральных характеристик синтезированного покрытия для рассматриваемых участков спектра.

В процессе синтеза интерференционных покрытий обязательно учитывается отклонение параметров каждого слоя и одновременно анализируется влияние этих отклонений на спектральные характеристики покрытий. Из условия (1) можно рассчитать значение вышеуказанных площадей:

$$S_{\max}=(\lambda_2-\lambda_1)\alpha_{1+}+(\lambda_3-\lambda_2)\alpha_{2+}+(\lambda_4-\lambda_3)\alpha_{3+}+(\lambda_5-\lambda_4)\alpha_4. \quad (6)$$

Свойства интерференционных покрытий имеют разброс, обусловленный особенностями технологии. Высокоустойчивыми интерференционными покрытиями считаются те, у которых отклонения параметров слоев незначительно влияют на спектральные характеристики коэффициента отражения (или пропускания). Это влияние определяется значением $F_{ц}(\mathbf{X})$, и при $F_{ц}(\mathbf{X}) < S_{\max}$ конструкцию можно считать устойчивой к ошибкам в толщине слоев и показателях преломления пленкообразующих материалов, возникающим при изготовлении интерференционного покрытия. Спектральные характеристики коэффициента отражения таких сформированных покрытий удовлетворяют требованиям,

При изготовлении интерференционных покрытий наиболее часто используется фотометрический метод контроля оптической толщины слоев, что позволяет определить максимальное значение отклонения параметров слоев (оптические толщины, показатель преломления, коэффициент поглощения). Обычно это отклонение находится в определенном диапазоне. Отклонение оптической толщины каждого слоя зависит от многих факторов, включая отклонения предыдущих слоев [9, 10]. Рассмотрим конструкцию интерференционных покрытий вида:

$$P \ M_1 \ M_2 \ M_3 \ \dots \ M_k,$$

где k — число слоев ($1 \leq i \leq k$), M_i — материал i -го слоя.

Параметры каждого изготовленного слоя могут быть записаны в виде:

$$n_i d_i = n_{0i} d_{0i} + \Delta n_i d_i \quad \text{и} \quad n_i = n_{0i} + \Delta n_i, \quad (7)$$

где $n_{0i} d_{0i}$ и n_{0i} — расчетные толщина и показатель преломления i -го слоя, $\Delta n_i d_i$ и Δn_i — абсолютное и случайное отклонение оптической толщины и показателя преломления i -го слоя; $\Delta n_{i \max}$ — максимальное отклонение показателя преломления i -го слоя.

Если рассмотреть ситуацию, при которой шаг отклонения в оптической толщине и показателе преломления каждого слоя равны β и μ соответственно, после изготовления получим

$$P = \frac{\Delta n d_{1 \max}}{\beta} \frac{\Delta n d_{2 \max}}{\beta} \dots \frac{\Delta n d_{k \max}}{\beta} \frac{\Delta n_{1 \max}}{\mu} \frac{\Delta n_{2 \max}}{\mu} \dots \frac{\Delta n_{k \max}}{\mu} = \frac{1}{\mu^k \beta^k} \prod_{i=1}^k \Delta n_i d_{i \max} \Delta n_{i \max}$$

вариантов покрытий конструкции. Далее из P вариантов возможных экспериментальных покрытий рассчитаем значение функции $F_{ц}(\mathbf{X})$ и получим вектор значения отличия площади $F_{ц}(\mathbf{X}) = \{F_{ц1}, F_{ц2}, \dots, F_{ц \max}\}$, как показано на рис. 2.

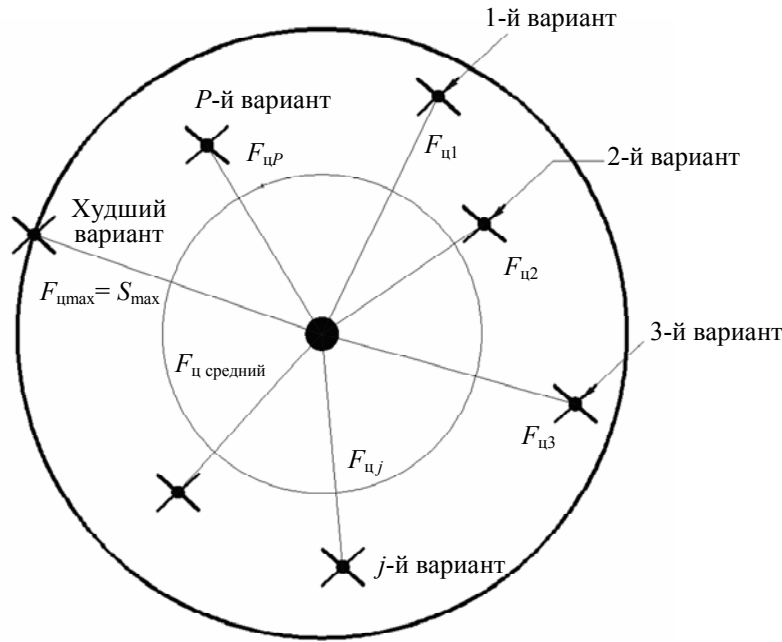


Рис. 2

Определим конструкцию путем нахождения максимального значения функции $F_{ц\text{ max}} = \max\{F_{ц1}, F_{ц2}, \dots, F_{ц\text{ max}}\}$. Если спектральные характеристики коэффициента отражения покрытия удовлетворяет заданным условиям, то интерференционное покрытие устойчиво к отклонениям в оптических толщинах и показателях преломления материалов формирующих их слои. Другим словами, если максимальное значение вектора $F_{ц}(\mathbf{X})$ ($F_{ц\text{ max}}$) меньше S_{max} , то все экспериментальные спектральные характеристики интерференционного покрытия удовлетворяют заданным требованиям. В этом случае отклонения параметров слоев несущественно влияют на спектральные характеристики рассматриваемого покрытия, и такое покрытие считается устойчивым. Поэтому в процесс синтеза интерференционных покрытий необходимо рассматривать P вариантов полученной структуры.

Для определения конструкции интерференционных покрытий использовалась программа, написанная на языке MathLab, алгоритм которой представлен на рис. 3.

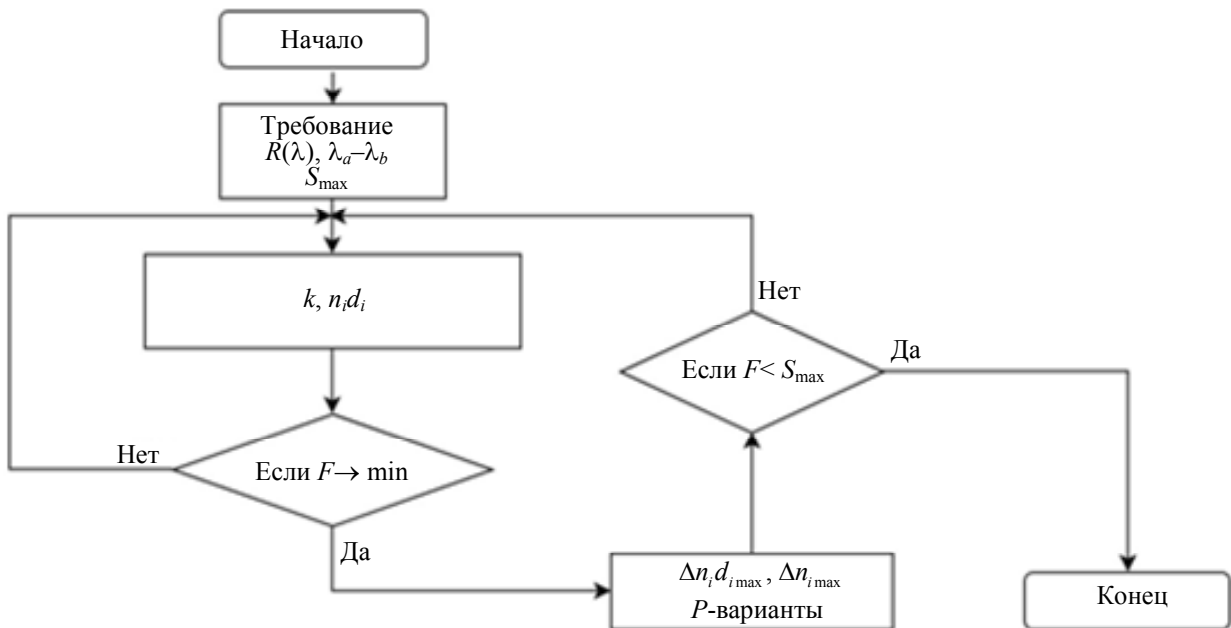


Рис. 3

Проиллюстрируем работу полученного алгоритма на примере светоделителя следующей конструкции:

$$П0,7В\ 2,6Н\ ВН\ (В2НВ)^5\ В\ 1,5Н\ 1,5В,$$

где П — подложка, изготовленная из оптического стекла марки К8 с показателем преломления $n_m = 1,52$; В, Н — слои, формирующиеся из материалов TiO_2 и SiO_2 , с $n_B = 2,2$ и $n_H = 1,46$. Спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания рассматриваемого светоделителя должны удовлетворять следующим техническим требованиям: $T > 95\%$ и $T_{max} > 98\%$; в диапазоне 1,2—1,9 мкм; $T < 5\%$ в диапазоне 0,9—1,08 мкм; и $C = 0,7T_{max}/70$ нм; $\Delta C \leq 0,05C$.

В таблице приведены некоторые возможные отклонения оптической толщины слоев, входящих в состав рассматриваемого светоделителя.

N_0	Слой	Δnd , нм				
		A0	A1	A2	A3	A4
1	1,5 TiO_2	7	5	-4	-6	-6
2	1,5 SiO_2	10	-5	6	3	3
3	2 TiO_2	-10	10	-10	8	-8
4	2 SiO_2	10	4	10	9	-9
5	2 TiO_2	-10	-8	10	10	-5
6	2 SiO_2	5	5	6	-10	-10
7	2 TiO_2	10	6	3	6	6
8	2 SiO_2	-10	5	8	3	3
9	2 TiO_2	5	7	-8	2	2
10	2 SiO_2	10	4	-9	-6	-6
11	2 TiO_2	5	5	6	7	7
12	2 SiO_2	7	-6	8	5	5
13	TiO_2	5	5	4	-10	-8
14	2,6 SiO_2	10	4	-5	6	6
15	0,7 TiO_2	10	2	6	-5	-5

На рис. 4 приведены спектральные характеристики коэффициента пропускания, соответствующие некоторым отклонениям в толщине слоев. Значения этих отклонений приведены в таблице. На рис. 4, а приведена коротковолновая область спектра, видно, что спектральные характеристики имеют незначительное расхождение. На рис. 4, б представлена длинноволновая область спектра покрытия, здесь расхождения спектральных характеристик значительно больше, но все они удовлетворяют техническому заданию.

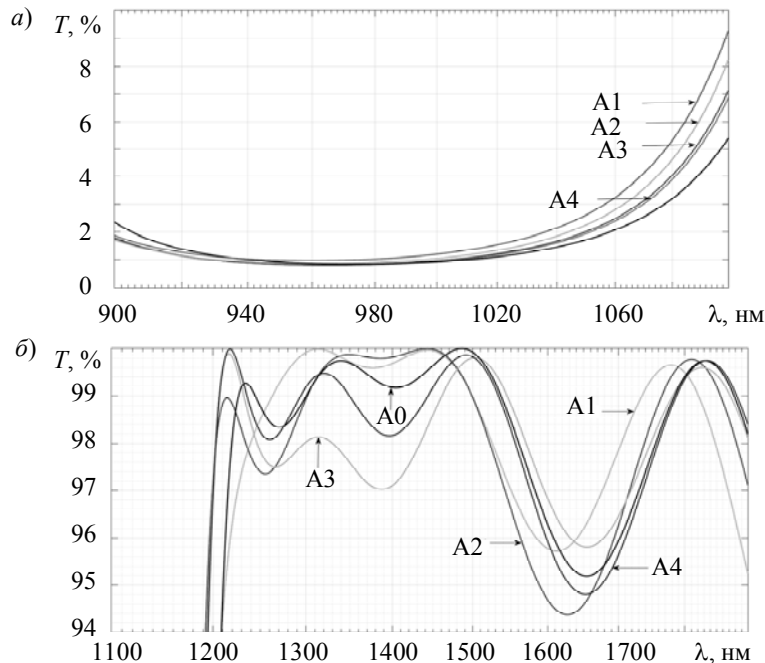


Рис. 4

Это значит, что отклонения толщины слоев, входящих в состав рассматриваемого покрытия, мало влияют на его спектральные характеристики.

Заключение. В работе предложено использовать функцию качества как целевую при расчете параметров интерференционного покрытия. Предложен алгоритм определения конструкции покрытия, обладающего заданным энергетическим коэффициентом отражения или пропускания в определенном диапазоне спектра, спектральные характеристики которого оказываются нечувствительны или малочувствительны к отклонениям параметров слоев от полученных в процессе синтеза. Анализ полученной конструкции покрытия подтверждает работоспособность данного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минков И. М. Об определении глобального минимума в задаче синтеза тонкослойных покрытий // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 50, № 4. С. 755—765.
2. Евтушенко Ю. Г. Методы поиска глобального экстремума // Исследование операций. М.: Изд-во АН СССР. 1974. Вып. 4. С. 39—68.
3. Vaumeister P. W. Design of multilayer filters by successive approximations // J. Opt. Soc. Amer. 1958. Vol. 48. P. 955—958.
4. Мешков Б. Б., Яковлев П. П. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение. 1987. 185 с.
5. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. СПб: ГУАП, 2010. 185 с.
6. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
7. Столов Е. Г. Синтез интерференционных оптических покрытий // ОМП. 1982. № 5. С. 10—11.
8. Столов Е. Г. Синтез интерференционных оптических покрытий // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64, вып. 1. С. 147—150.
9. Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М.: Сов. радио, 1977. 768 с.
10. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Оптические покрытия. СПб: Лань, 2016. 268 с.

Сведения об авторах

- Нго Тхай Фи** — аспирант; Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики; E-mail: ngothaiphbn@gmail.com
- Людмила Александровна Губанова** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики; международная научная лаборатория современных фотонных материалов и технологий; E-mail: la7777@mail.ru
- Фам Ван Хоа** — аспирант; Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики; E-mail: phamhoa0303@mail.ru

Поступила в редакцию
01.03.19 г.

Ссылка для цитирования: Нго Тхай Фи, Губанова Л. А., Фам Ван Хоа. Расчет конструкции интерференционных покрытий, устойчивых к отклонению параметров слоев // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 734—740.

CALCULATION OF THE STRUCTURE OF INTERFERENCE COATINGS RESISTANT TO LAYERS PARAMETERS DEVIATION

Ngo Thai Fi, L. A. Gubanova, Fam Van Khoa

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: ngothaiphbn@gmail.com

The quality function is proposed to use as a target function in calculation of interference coating parameters. An algorithm is presented which determines the design of interference coating to provide a specified energy reflectance or transmittance in a certain wavelength range, with the additional condition of insensitiveness or low sensitiveness of the spectral characteristics to deviations in the layers' parameters. The proposed algorithm efficiency is confirmed by analysis of obtained coating design.

Keywords: synthesis of interference coating, optical thickness deviation, objective function, stability, algorithm, beam splitter

REFERENCES

1. Minkov I.M. *Optics and Spectroscopy*, 1981, no. 4(50), pp. 755–765. (in Russ.)
2. Evtushenko Yu.G. *Issledovaniye operatsiy* (Operations Research), Moscow, 1974, is. 4, pp. 39–68.
3. Baumeister P.W. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1958, vol. 48, pp. 955–958.
4. Meshkov B.B., Yakovlev P.P. *Proyektirovaniye interferentsionnykh pokrytiy* (Design of Interference Coatings), Moscow, 1987, 185 p. (in Russ.)
5. Kotlikov E.N., Varfolomeyev G.A., Lavrovskaya N.P., Tropin A.N. *Proyektirovaniye, izgotovleniye i issledovaniye interferentsionnykh pokrytiy* (Design, Manufacture and Study of Interference Coatings), St. Petersburg, 2010, 185 p. (in Russ.)
6. Furman Sh.A. *Tonkosloynnye opticheskiye pokrytiya* (Thin Layer Optical Coatings), Leningrad, 1977, 264 p. (in Russ.)
7. Stolov E.G. *Soviet Journal of Optical Technology*, 1982, no. 5, pp. 10–11. (in Russ.)
8. Stolov E.G. *Optics and Spectroscopy*, 1988, no. 1(64), pp. 147–150. (in Russ.)
9. Maissel L.I., Glang R. *Handbook of Thin Film Technology*, McGraw-Hill, 1970.
10. Putilin E.S. Gubanova L.A. *Opticheskie pokrytiya* (Optical Coating), St. Petersburg, 2016, 268 p. (in Russ.)

Data on authors

Ngo Thai Fi	— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Photonics and Optical Information; E-mail: ngothaiphbn@gmail.com
Ludmila A. Gubanova	— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Photonics and Optical Information, International Research Laboratory of Modern Photonic Materials and Technologies; E-mail: la7777@mail.ru
Fam Van Khoa	— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Photonics and Optical Information; E-mail: phamhoa0303@mail.ru

For citation: Ngo Thai Fi, Gubanova L. A., Fam Van Khoa. Calculation of the structure of interference coatings resistant to layers parameters deviation. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 8. P. 734—740 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-734-740