

以模拟计算的制造成品率为最终评价指标的光学薄膜自动设计

郑燕飞 唐晋发
(浙江大学光学工程系)

提 要

本文提出了一种自动设计思想,即在多层膜设计过程中考虑监控误差对多层膜光学特性的影响。在自动设计的评价函数中不仅包含了膜系的光学特性,而且还包含了计算机模拟的制备成品率,并以最高的生产成品率作为最终的优化目标。用这种方法设计出的膜系不仅满足光学特性要求,而且具有较大的制造允差,便于最经济地组织生产。以宽带减反射膜,可见光加 $1.06\ \mu\text{m}$ 的双波段减反射膜为例进行了自动设计,设计结果是令人满意的。

关键词: 光学薄膜自动设计; 制造成品率的模拟计算。

一、引 言

二十多年来,光学薄膜自动设计技术取得了长足的进步。并前后提出过多种自动合成光学薄膜的方法^[1~7]。但迄今为止,这些光学薄膜自动设计都是以最优的光学特性作为最终的设计目标。

很显然,在设计过程中仅仅考虑膜系的光学特性要求是不够的。因为,膜系的光学特性好,不一定意味着膜系的制备特性也好。对于特定的光学特性要求,完全可能有几种多层膜结构满足理论的特性要求。而这几种结构的折射率误差和厚度误差对光学特性的影响是不一样的。我们设计的膜系不仅应该满足光学特性要求,而且应该有尽可能宽容的制造允差,便于最经济地组织生产。与传统的光学薄膜自动设计不同,在设计阶段我们就力图考虑到膜系今后制造时的允差和成品率。

二、包含成品率因素的评价函数的构造

在薄膜自动设计中,要求合理地选择最优化方法,和根据要求慎重地构造评价函数。

迄今为止,几乎所有自动设计中的评价函数都只考虑光学特性要求。通过局部优化或总体优化得到的膜系,仅仅在理论的意义,其光学特性是最佳的或理想的。在制备过程中由于各种各样的误差的引入,实际制备的多层膜与理论设计总有一定的偏离,从而使实际的光学特性与理论特性不符。因此,仅仅寻求光学特性最佳的理论设计是不完善的。为了把光学特性和制造成品率两者有机地结合起来,我们构造了如下形式的评价函数:

$$F = W_1 \sum_{i=1}^m |R_i(\lambda) - RD_i(\lambda)|^2 + W_2(1 - P), \quad (1)$$

这里 $RD_i(\lambda)$ 是要求的光学特性, $R_i(\lambda)$ 是设计膜系计算的光学特性, P 是设计膜系在一定监控误差下, 由计算机模拟制备过程估算得到的成品率, W_1 和 W_2 分别是光学特性和成品率的权重因子。当设计膜系不满足光学特性要求时, 制造成品率是没有意义的, 因此取 $W_1 = 1, W_2 = 0$, 这时 F 称为光学特性评价函数。一旦膜系满足光学特性的要求, 制造成品率作为唯一的评价指标, 因而取 $W_1 = 0, W_2 = 1$, F 称为成品率评价函数。

基于上述评价函数, 我们在 IBM-PC 微机上编制了全新的自动设计程序。

三、光学薄膜自动设计程序

显然, 现在处理的评价函数是更为复杂的多峰函数。欲得到既满足光学特性要求, 制造允差宽容的膜系, 必须在大范围内搜索膜系的结构, 为此我们采用统计试验法进行膜系的设计。图 1 是自动设计的程序框图^[7]。下面仅对程序的主要特点作一简略的介绍:

1. 膜层的折射率既可作为设计变量也可预先选定

计算成品率时, 监控方式既可选用直接定值法, 也可选用间接定值法。对于直接定值法, 最后一层膜的监控既可以选用定值法, 也可以选用极值法。

2. 输入的初始参数主要有

光学特性的要求和允许的偏差; 监控信号的标准偏差; 膜层的折射率和光学厚度的搜索范围等等。

3. 膜层折射率的替代与合成

当折射率作为设计变量时, 设计得到的膜层的折射率往往在现有的薄膜材料中找不到, 这就需要用现有膜料的折射率进行替代或合成。当膜层的折射率与现有膜料的折射率相差较小时, 可直接替代, 当两者相差较大时, 则需要用三层对称膜系合成。

4. 用 Powell^[8] 方法优化膜系的光学特性

经过上述折射率替代或合成后的新膜系结构, 其光学特性不一定满足设计要求。因而接着用 Powell 方法对每一层膜的光学厚度进行优化。

5. 用单纯形法^[10]寻求成品率最高的膜系结构

用 Powell 方法优化得到的膜系结构, 其光学特性虽然比较好, 但成品率不一定高。因此我们以成品率作为评价标准, 用单纯形法在该膜系结构附近寻找成品率最高的解。

为了模拟计算膜系的制造成品率, 假定反射或透射监控信号的随机误差服从正态分布。根据随机变量的抽样理论, 利用计算机产生的在 $(0, 1)$ 之间均匀分布的伪随机数 ξ_1 和 ξ_2 , 借助于变换抽样法即可得到接近于正态分布的随机数 μ 。

$$\mu = (-2 \ln \xi_1)^{1/2} \cos(2\pi \xi_2), \quad (2)$$

如监控信号的标准偏差为 σ , 则第 i 层膜的反射率误差为

$$\Delta R_i = \mu_i \sigma, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

由此不难确定各层膜的实际厚度。如由于基板温度、淀积速率等工艺参数的随机变化引起膜层折射率的变化也服从正态分布, 则折射率为

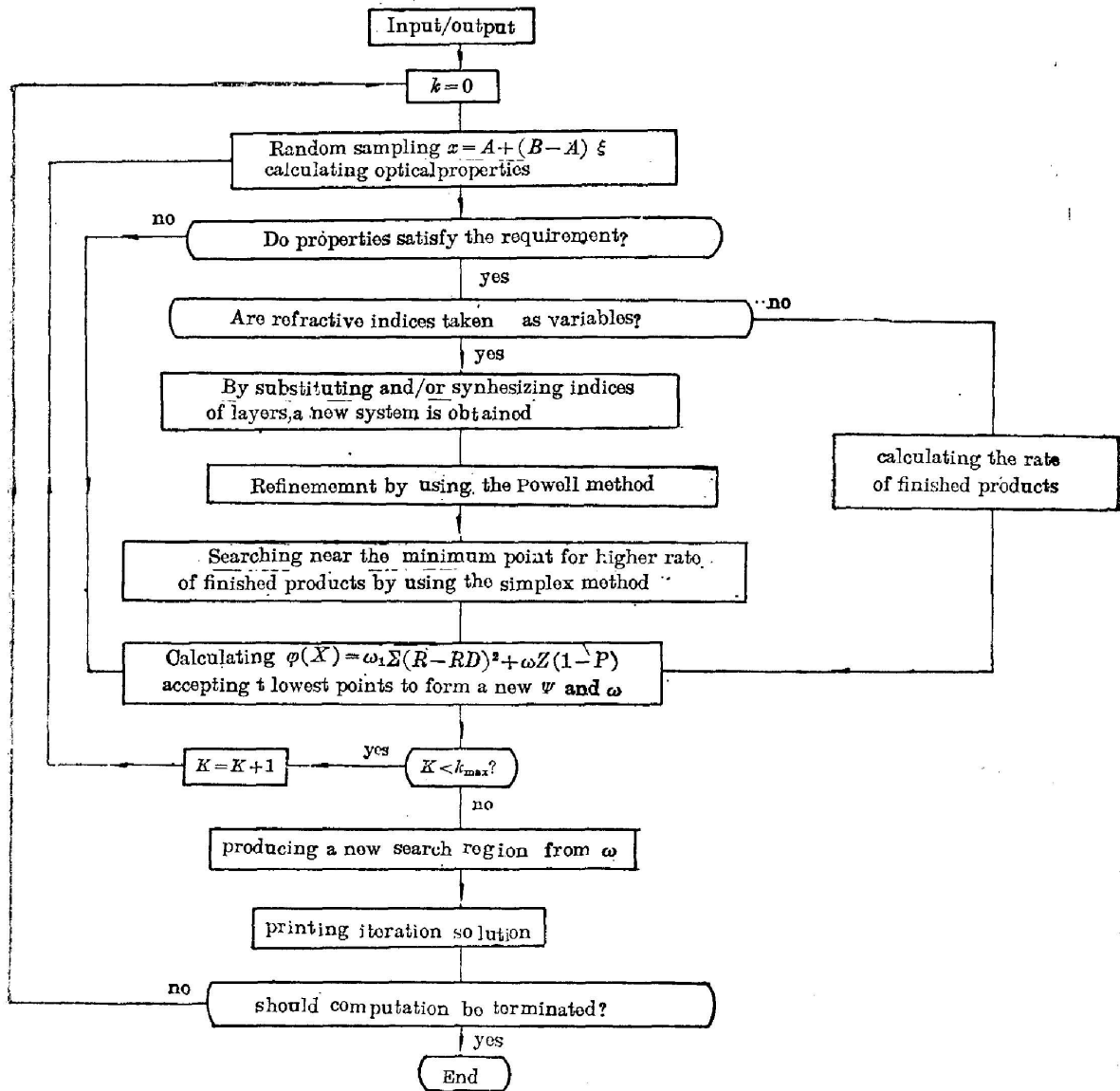


Fig. 1 Ablock diagram of the automatic design program taking the rate of finished products into account

$$n'_i = n_i + \mu_i \sigma_{ni}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

式中 n_i 是折射率的名义值, σ_{ni} 是折射率的标准偏差。从而可模拟计算膜系的光学特性⁽¹¹⁾。模拟次数愈多, 成品率模拟的精度就愈高。

为了考核程序的可行性, 我们以各种类型的减反射膜为例作了自动设计, 设计结果是令人满意的。

四、设计实例

为简单起见,在下面的设计实例中,我们作了如下假定:当膜层的折射率大于1.8时,折射率误差的标准偏差为0.02,否则取0.01;计算成品率时均采用反射式监控,反射率相对误差的标准偏差为0.01。

1. 宽带减反射膜的设计

设计一个五层宽带减反射膜,要求在波长400~680 nm范围内最大反射率值不超过1%,平均反射率值不大于0.5%。设计时固定各层膜的折射率,光学厚度的搜索范围为10~400 nm。计算成品率时,采用定值法间接控制,控制波长为520 nm。

如果在评价函数中不包括成品率这一项,那么利用统计试验法可得到光学特性最好的膜系A(即光学特性评价函数的总体极值点)。如果在评价函数中包含有成品率这一评价指标,则得到既满足光学特性要求,成品率又较高的膜系O。在膜系O附近还可找到光学特性评价函数的局部极值点B。表1列出了它们的结构参数和计算成品率值。可以看到,就光学特性来说总体极值点A的成品率最低,局部极值点B的成品率较高,而膜系O有最高的成品率。

2. 双波段减反射膜的设计

设计一个在波长450~650 nm范围内平均反射率不大于1%,在波长1.06 μm 处的反射率不超过0.2%的多层膜结构。一开始规定膜层的层数为四层,每层膜的折射率和厚度均作为设计变量,其搜索范围分别为1.35~2.5和50~400 nm。计算成品率时假定膜系用定值法间接控制,控制波长为530 nm。

在设计过程中,由于折射率作为设计变量,因此当设计的膜层折射率用现有薄膜材料替代或用两种材料的三层对称组合合成以后,往往会得到不同层数的膜系结构(见表2)。其

Table 1 The broad-band antireflection coatings

$$n_0=1.0, n_L=1.38, n_H=2.0, n_S=1.52$$

$n\lambda(\text{nm})$	system A	system B	system C
medium	massive	massive	massive
L	127.53	121.72	112.39
H	274.87	225.86	232.55
L	54.92	27.34	36.37
H	39.70	27.91	21.60
L	53.33	240.06	224.42
substrate	massive	massive	massive
$F = \sum(R - RD)^2$	$.2112 \times 10^{-4}$	$.2248 \times 10^{-4}$	$.7528 \times 10^{-4}$
P(%)	32	50	59

中六层膜结构 *A* 是设计得到的膜系, 期望的成品率很高。五层膜结构 *B* 和四层膜结构 *C* 虽然也满足光学特性要求, 但成品率较低, 它们在设计过程中被淘汰掉了。

Table 2 The double-band antireflection coatings

	system <i>A</i>		system <i>B</i>		system <i>C</i>	
	<i>n</i>	<i>nd</i> (nm)	<i>n</i>	<i>nd</i> (nm)	<i>n</i>	<i>nd</i> (nm)
medium	1.0	massive	1.0	massive	1.0	massive
1	1.38	172.05	1.38	166.38	1.38	128.01
2	2.0	66.86	2.0	73.40	1.62	689.01
3	1.38	35.94	1.38	37.97	2.0	266.73
4	2.0	286.36	2.0	309.82	1.62	170.00
5	1.38	25.13	1.62	116.26		
6	2.0	44.95				
substrate	1.52	massive	1.52	massive	1.52	massive
RAV*	$.5737 \times 10^{-2}$		$.5187 \times 10^{-2}$		$.9052 \times 10^{-2}$	
R1060	$.8503 \times 10^{-4}$		$.3456 \times 10^{-3}$		$.3283 \times 10^{-3}$	
P (%)	99		68		23	

* RAV is the average reflectance in the spectrum range from 450 to 650 nm.

R1060 is the reflectance at the wavelength of 1060 nm.

五、结 论

从上面的设计实例中可以看到, 以制造成品率为最终的评价标准对于减反射膜的设计是成功的。设计得到的多层膜结构不仅满足光学特性要求, 而且有较宽容的制造允差, 可以期望有较高的成品率, 这对于光学薄膜的实际制造是非常有意义的。

毫无疑问, 这种设计思想完全可用于其它种类的光学多层膜的设计。只是对于不同的问题, 需要构造不同形式的评价函数。此外, 使膜层监控误差和折射率误差的模拟更符合实际的制备过程是需要进一步研究的课题。当然, 对于层数较多、结构复杂的多层膜的设计, 成品率的模拟计算显著地增加了运算的工作量, 设计程序难以在微型机上实现。为此, 信息量的压缩和快速算法的建立也是有待解决的问题。

参 考 文 献

- [1] A. V. Shatilov; *Opt. Spectrosc.*, 1963, 14, 426.
- [2] J. A. Dobrowolski; *Appl. Opt.*, 1965, 4, No. 8 (Aug), 937.
- [3] W. E. Case; *Appl. Opt.*, 1983, 22 No.24 (Dec), 4111.
- [4] J. A. Dobrowolski; *Appl. Opt.*, 1973, 12, No. 8 (Aug), 1885.
- [5] L. Sossi; *Esti NSV Tead. Akad. Toim. Fuus. Mat.*, 1976, 25, 171.
- [6] J. A. Dobrowolski; *Appl. Opt.*, 1978, 17, No. 19 (Oct), 3039.
- [7] J. F. Tang; and Q. Zheng; *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72, No. 11 (Nov), 1522.
- [8] 金天峰; 中国科学院安徽光机所硕士学位论文, 1985.
- [9] M. J. D. Powell; *Computer J.*, 1965, 7, No. 4 (Jan), 303.
- [10] J. A. Nelder; *Computer J.*, 1965, 7, No. 4 (Jan), 308.
- [11] H. A. Macloed; *Optica Acta*, 19, No. 1 (Jan), 1.

Automatic design of optical coatings with calculated rate of finished products as the end merit index

ZHENG YANFEI AND TANG JINFA

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 12 September 1986; revised 30 October 1986)

Abstract

A new automatic design method of optical thin film systems is presented, in which the effect of the errors in monitoring of optical multilayer coatings on the performance is considered. The merit function in the design involves not only the optical properties but also the rate of finished products of the multilayer coatings by computer simulation, and the highest rate of finished products is taken as the end optimization goal. The thin film systems designed by this method not only satisfy the requirement of optical properties but also have larger manufacture tolerance. Hence, this method will be very effective in production. Some examples of the designs of broad-band and double-band antireflection coatings are given. The results of such designs are satisfactory.

Key Words: automatic design of optical coatings; rate of finished products of the multilayer coatings by computer simulation.