

针法与初始膜系设计*

林永昌 顾永琳 张 诚 周 健
(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

0484.8

摘 要 讨论了膜系自动设计中的初始膜系设计, 特别是针法自动设计中的初始膜系设计, 提出了一种改进针法自动设计的方法, 即任意膜系的针法自动设计, 都从同一膜厚的单层膜开始, 用控制评价函数值自动修改初始膜厚度的方法求膜系的最佳设计。

关键词 针法, 膜系自动设计, 初始膜系设计。

膜系的光学特性不仅仅是膜层的折射率和厚度的函数, 还是膜层层数的函数^[1]。但是一般的优化技术, 其评价函数只是膜层折射率和厚度的函数, 而不是膜层层数的函数^[2, 3]。在针法膜系自动设计中^[4], 不仅优化膜系的厚度, 还改变膜层层数, 它会随着寻优过程的进行, 自动加减膜层层数, 因此它可以达到最优值。

由于上述原因, 一般的优化技术强烈地依赖于膜系的初始设计, 初始设计(包括膜层折射率, 厚度和层数)好, 则优化结果好。下面举二例初始膜设计和优化结果。

例 1, 红膜膜系设计, 初始膜系为 $A/(0.5LH0.5L)^{11}/G$, $n_H = 2.35$, $n_L = 1.38$, $n_s = 1.52$, $n_a = 1$, $\lambda_0 = 775 \text{ nm}$, 光线垂直入射, 用共轭斜量法优化, 可得较好的红膜膜系设计, 即 $A/0.541L1.098H1.055L1.031H1.006L1.012H0.981L1.01H0.973L0.994H0.971L0.993H0.965L1.006H0.966L1.01H0.976L1.005H0.994L1.011H1.055L1.17H0.426L/G$, 式中数字表示该层膜的光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的倍数, 图 1 是初始膜光谱透过率曲线, 图 2 是优化设计后的光谱透过率曲线。

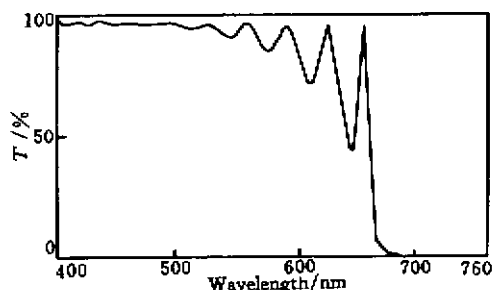


Fig. 1 Transmittance curve of initial coating stack with red colour

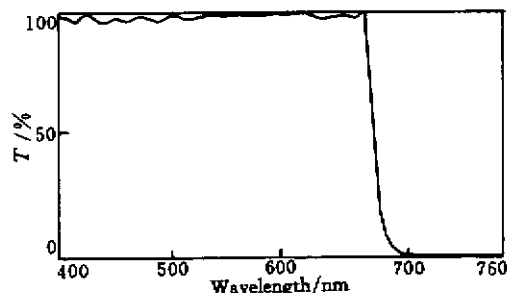


Fig. 2 Transmittance curve of optimization design of coatings with red colour

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-06-15; 收到修改稿日期: 1998-09-16

例 2, 用 $n_H = 2.1$, $n_L = 1.38$ 设计眼镜片增透膜, $n_s = 1.62$, 初始膜系为: A/L2H250L150H250L/G, $\lambda_0 = 530$ nm。式中 250 表示膜层的几何厚度为 25 nm, 150 表示几何厚度为 15 nm, 2 表示膜层的光学厚度为 $\lambda_0/2$, 数字 1 省略, 表示膜层的光学厚度为 $\lambda_0/4$, 显然, 250L150H250L 表示一个三层对称等效膜系, 用它来等效一个中等折射率的 $\lambda_0/4$ 膜。

用上述初始膜系出发设计眼镜片增透膜, 要求反射光呈绿色, $\lambda_0/4$ 膜层与半波层不参与

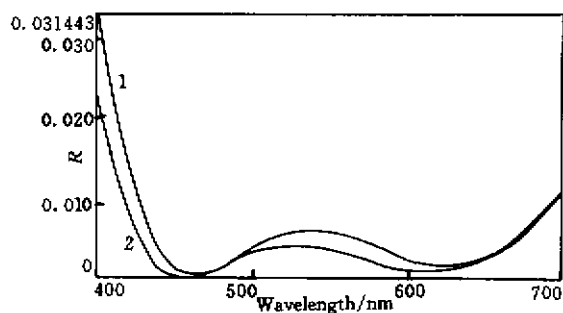


Fig. 3 Reflectance curves of anti-reflection coatings

优化, 即只优化 1、2、3 层, 用单纯形法优化, 优化结果是 A/L2H249L141H148L/G, $\lambda_0 = 530$ nm; 图 3 中曲线 1 是眼镜片初始膜系光谱反射率曲线, 曲线 2 为优化后的光谱反射率曲线。

显然, 在上述优化设计过程中, 初始膜系的建立要求设计人员有丰富的薄膜光学知识, 或建立有膜系数据库, 问题是: 初始膜系的建立能否不依赖于这些条件?

1 针法中的初始膜系设计

针法有两个显著特点: 1) 评价函数下降迅速; 2) 优化设计可以从单层膜开始, 随着优化过程的进行, 它可以自动加减膜层, 改变膜层结构, 自动寻找最优值。由于任何膜系都可以从单层膜开始, 因此它就在一定程度上克服了初始膜系设计的专业性和难度, 但研究表明: 在针法设计中, 初始单层膜的厚度不同, 优化设计的结果也不同。即对不同的膜系设计, 存在不同的最佳初始膜厚度和最佳评价函数值。因此为得到理想的光谱性能, 还必须优化初始膜厚度。

例 1: 400~1100 nm 波长范围的增透膜, $R = 0.5\%$, k_9 玻璃, $n_s = 1.52$, 希望用 TiO_2 ($n_H = 2.35$) 和 SiO_2 ($n_L = 1.45$) 设计增透膜, 光线垂直入射。采用五种不同厚度的单层膜作初始膜, 它们分别是 2H、4H、6H、8H、10H, $\lambda_0 = 550$ nm, 针法优化后的结果见表 1, 评价函数 f 与初始膜厚的关系见图 4。

Table 1. Merit function as a function of layer thickness for initial coating in anti-reflection design

initial thickness	2H	4H	6H	8H	10H
number of layers	11	16	19	13	16
merit function	0.0204	0.0111	0.0047	0.257	0.0117

从表 1 可见, 初始膜厚为 6H 时可得到最优设计结果, 因此 6H 是最佳初始膜厚。在采用 6H 作初始膜厚, 用针法作优化设计得 $f = 0.0047$ 的一个 19 层膜以后, 改用共轭斜量法作二次优化, 并合并 $d < 2$ nm 的薄层, 得到 $f = 0.00199$ 的 13 层膜, A/1081.4L205.9H47.5L40.3H160.3L1144.6H145.9L296.9H418.9L152.1H520.1L35.5H60.8L/G, 式中数字是膜层的几何厚度, $n_H = 2.35$, $n_L = 1.45$, 其光谱反射率曲线见图 5。

例 2: 设计一个 45° 使用的平板分光镜, $n_s = 1.52$, $n_0 = 1$, 波长范围: 400~800 nm, 光谱性能要求是 $R:T = 1:1$, 使用 TiO_2 和 SiO_2 作为膜料, $n_H = 2.35$, $n_L = 1.45$ 。设计过程是: 采用 4 种不同厚度的单层膜作初始膜, 它们是 2H、4H、6H、8H, $\lambda_0 = 550$ nm。针法优化设计的结

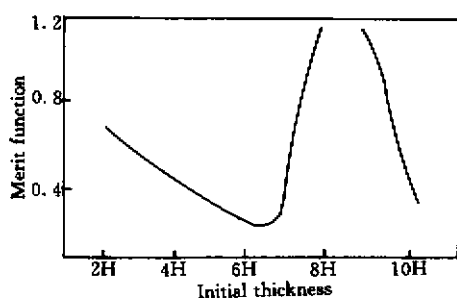


Fig. 4 Merit function as a function of layer thickness for initial coating in anti-reflection design

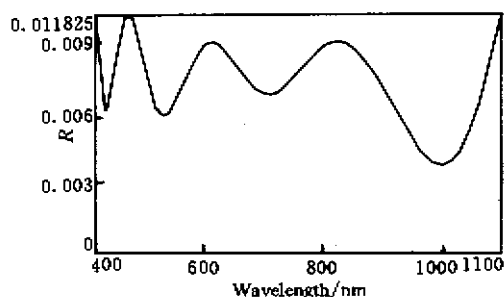


Fig. 5 Reflection curve of a thirteen-layer anti-reflection coatings

果见表 2, 评价函数 f 与初始膜厚的关系曲线见图 6。

Table 2. Merit function as a function of layer thickness for initial coating in beam splitters

initial thickness	2H	4H	6H	8H
number of layers	3	7	11	13
merit function	0.539526	0.045057	0.071133	0.052267

从图 6 可见, 4H 是最佳初始膜厚。采用 4H 作初始膜, 用针法进行优化设计, 得 $f = 0.045$ 的一个 7 层膜以后, 改用共轭斜量法作二次优化, 并合并 $d < 2 \text{ nm}$ 的膜层, 得到一个 $f = 0.0269$ 的 6 层分光膜, 其膜系结构是: A/610.2H1077.2L669.7H291.8L244H1070.1L/G, 式中数字是膜层的几何厚度, $n_H = 2.35$, $n_L = 1.45$, 其光谱反射率曲线见图 7。

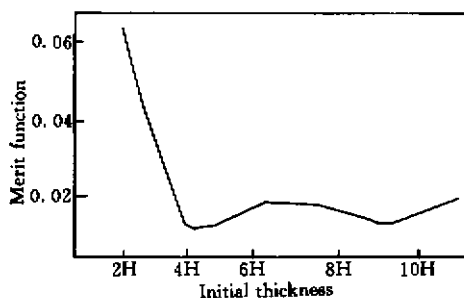


Fig. 6 Merit function as a function of layer thickness for initial coating in beam splitters

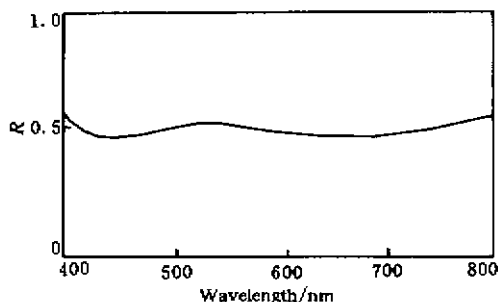


Fig. 7 Reflection curve of a $R:T = 1:1$ beam splitter

2 针法优化设计的改进

在针法自动设计中, 可以用单层膜作初始膜自动设计多层膜, 但是初始单层膜的厚度将影响到最后的结果。一般说来, 如果初始单层膜的厚度比较薄, 则比较适合于设计总厚度比较薄的多层膜膜系; 如果初始单层膜的厚度比较厚, 则比较适合设计总厚度比较厚的多层膜膜系。

现在的问题是: 能否在针法自动设计时自动寻找最佳初始膜厚, 回答是肯定的。方法是: 在针法自动设计中, 将初始膜厚都定为 H , 先用针法进行膜系设计, 当评价函数趋于一稳定的最小值 f_0 时, 判断膜系光谱性能是否接近设计要求, 若是, 则采用共轭斜量法优化, 输出

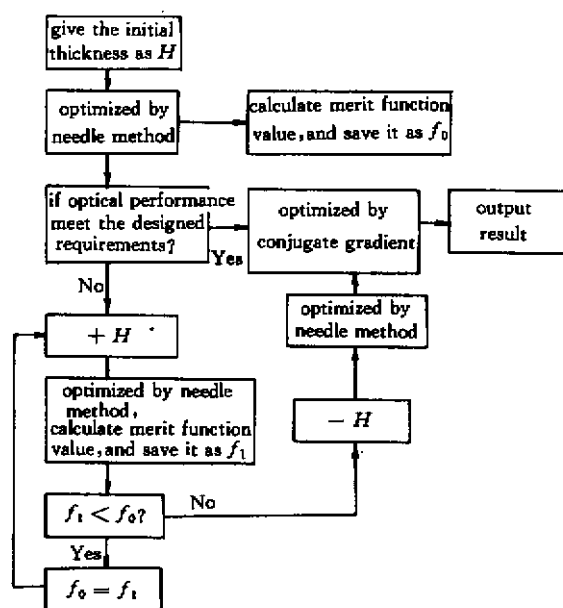


Fig. 8 Frame of an amelioration of needle method
单层膜求得不同光谱性能的膜系的最佳设计。

结果, 结束设计。否则将初始膜厚度自动增加 H , 重新进行针法优化, 得到一新的评价函数稳定的最小值 f_1 , 判断 f_1 是否小于 f_0 , 若是, 将 f_0 赋值为 f_1 , 将初始膜厚再增加 H , 重复前述过程, 直到得到 f_1 大于 f_0 的结果, 这时将初始膜厚减 H , 此时的初始膜厚为最佳的初始膜厚。用该初始膜层进行优化并输出结果。改进的针法自动设计框图见图 8。

结 论 1) 在膜系自动设计中, 针法可以用任意给定的单层膜作为初始膜结构。2) 初始单层膜的厚度将影响针法设计的优劣, 不同光谱性能的膜系对应不同的最佳初始膜。3) 在针法自动设计中, 用自动修改初始膜厚度的方法, 可以用同一厚度的

参 考 文 献

- [1] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1985. 239~312
- [2] Liddell, *Compute-aided Techniques for The Design of MultiLayer Filters*, Bristol: Adam Hilger Ltd, 1981. 90~102
- [3] 唐晋发, 郑 权. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 364~426
- [4] 周 健, 林永昌. 一种新的光学薄膜设计方法-Needle 法. 光学学报, 1997, 17(10): 1445~1449

Needle Method and Initial Coating Design

Lin Yongchang Gu Yonglin Zhang Cheng Zhou Jian
(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)
(Received 15 June 1998; revised 16 September 1998)

Abstract The initial coating design in the coating optimization is discussed, especially, the initial design in Needle method and an amelioration of Needle method is presented. It begins from the same thickness of single layer to work out the optimum design in the way of automatically revising the initial thickness by controlling the value of the merit function.

Key words needle method, coating optimization design, initial coating design.