

红外宽带增透膜系的设计与分析

许步云

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——依据等效多层膜的概念设计了红外宽带增透膜系, 利用一种膜系自动设计的方法——随机优选法——对宽带膜系实现最优化。提供了锗衬底在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 和 $2\sim 14\mu\text{m}$ 波长区的设计实例与实验结果。

一、引言

光学系统中, 对光学零件的增透工作是必不可少的。宽带增透的要求, 使增透层从单层发展到多层。可见区的宽带增透工作已做出很高的水平。随着红外多光谱技术及红外宽波段检测技术的发展, 为提高光学系统的效率, 红外宽带增透工作也日益受到重视。文献[1]对高折射率衬底的单层、双层及三层增透膜作了研究, 但是宽带工作也仅限于 $1\sim 7\mu\text{m}$ 之间。后来有人做过四层宽带增透工作^[2], 用了毒性较大的铊盐和易潮解的氟化物, 高透射带也仅做到 $2\sim 10\mu\text{m}$ 之间。当然, 近几年虽有更好一些的产品曲线广告, 但是具体研究报道甚少。

红外区高折射率衬底的宽带增透工作往往缺少比较理想的薄膜材料。在本文工作中, 依据矢量分析和对称等效组合膜概念设计了初始膜系, 并用“随机优选法”获得工作于 $2\sim 14\mu\text{m}$ 波长区的超宽膜系。在设计和实验制作中使用了三种膜料: Ge、ZnS、SrF₂, 这些膜料有较好的光学性能、机械性能及抗潮解性能, 而且这三种膜料毒性小, 工艺又较易实现。

二、初始膜系的设计

下面将对红外宽带增透膜的初始膜系设计作一概述。

1. 矢量分析法

由于红外区使用的光学材料的折射率一般比较高, 如 $n_{\text{Ge}}=4$, $n_{\text{Si}}=3.5$ 等。因而红外宽带增透膜系的各层折射率可以采取从衬底向空气逐渐过渡的方式。而用各层光学厚度都为 $\lambda_0/4$ 的矢量分析法确定各层折射率是很方便的^[3]。

根据矢量分析法, 设有 k 层增透膜, 每层光学厚度为 $\lambda_0/4$ (相位厚度为 90°), 当折射率满足下列关系时, 即:

本文 1981年 11月 4日收到。

$$\begin{aligned}
 n_1^{k+1} &= n_0^k n_s, \\
 n_2^{k+1} &= n_0^{k-1} n_s^2, \\
 n_3^{k+1} &= n_0^{k-2} n_s^3, \\
 &\vdots \\
 n_k^{k+1} &= n_0 n_s^k,
 \end{aligned}$$

其中, n_0 是空气折射率, n_k 是第 k 层折射率 (k 为整数), 则此宽带膜系就有 k 个零反射点, 所在波长位置为:

$$\frac{k+1}{2k} \lambda_0, \frac{k+1}{2(k-1)} \lambda_0, \frac{k+1}{2(k-2)} \lambda_0, \dots, \frac{k+1}{4} \lambda_0, \frac{k+1}{2} \lambda_0,$$

所得宽带增透膜系的最低反射点宽度 (即高增透区域) 为 $(k+1/2k)\lambda_0 - (k+1/2)\lambda_0$, 长波点与短波点之比为 k 倍。

据此, 为 Ge 衬底设计三层和五层的宽带和超宽带增透膜系, 每层光学厚度为 $\lambda_0/4$ 。由上述折射率的关系式并考虑到所用膜料而稍加修正所确定的折射率值见表 1。光谱曲线由图 1 和图 2 所示。

表 1 矢量分析法计算的折射率值

层数 \ 折射率	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	高透射带宽度
3	1.26	2.2	3.1			$0.66\lambda_0 - 2\lambda_0$
5	1.26	1.65	2.2	2.7	3.3	$0.60\lambda_0 - 3\lambda_0$

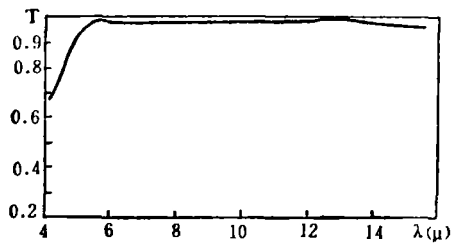


图 1 三层宽带增透膜系的计算光谱透射曲线

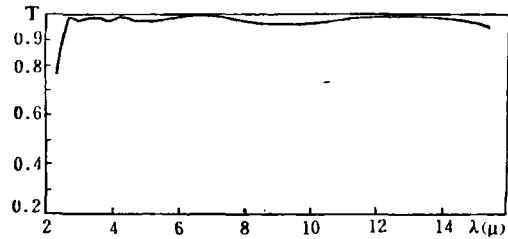


图 2 五层宽带增透膜系的计算光谱透射曲线

2. 对称等效组合膜的运用

前面说过, 我们仅用三种膜料 (Ge、ZnS、 SrF_2) 完成各宽带增透膜系的设计, 这三种材料的折射率分别为 $n_{\text{Ge}}=4$, $n_{\text{ZnS}}=2.2$, $n_{\text{SrF}_2}=1.26$ 。而表 1 中的其余折射率值诸如 1.65, 2.7, 3.1, 3.3 等都根据对称组合膜的概念^[4], 用同样方法以上述三种材料所构成的对称等效组合膜的等效折射率代之。

在本文所考察的 Ge 衬底多层增透设计实例中, 表 1 中三层增透膜系中的第三层 ($n_3=3.1$) 可用如下对称三层结构等效之:

$$0.2 M 0.44 H 0.2 M,$$

其中, M 代表 $\text{ZnS}(\lambda_0/4)$, H 代表 $\text{Ge}(\lambda_0/4)$ 。用 E 和 Γ 分别表示上述对称等效组合膜的等效折射率和等效相位厚度, 则该对称等效组合膜的 $E \sim \lambda_0/\lambda$ 曲线和 $\Gamma \sim \lambda_0/\lambda$ 曲线由图 3 所示。从曲线图上可以看出, 当设计波长 $\lambda_0=7.8 \mu\text{m}$ 时, 对应于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的 λ_0/λ 值约从

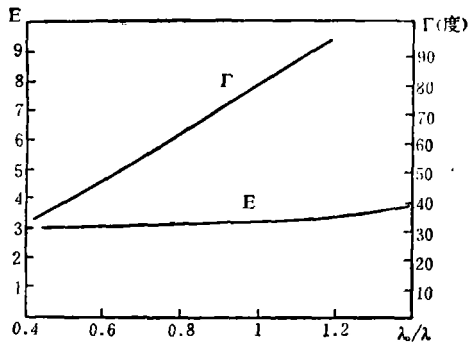


图3 对称等效组合膜 $0.2M0.44H$
 $0.2M$ 的 $E, \Gamma \sim \lambda_0/\lambda$ 曲线

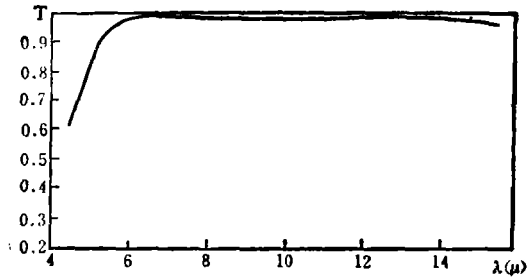


图4 设计等效三层膜 $Ge|0.2M0.44H$
 $1.2ML|A$ 用的计算光谱透射曲线

0.55 到 0.97, 等效折射率在 3.1~3.3 之间。在 $\lambda_0/\lambda=1$ 处 Γ 接近 90° 。这样, 包含一个对称等效组合膜的 Ge 衬底等效 3 层宽带增透膜系为:

$$Ge|0.2M0.44H1.2ML|A,$$

其中, L 代表 $SrF_2(\lambda_0/4)$, A 代表空气。显然, 图 4 的曲线已能很好地用来作 $8\sim 14\mu m$ 的宽带增透设计。

在本文 Ge 衬底宽带设计中, 表 1 中五层超宽带增透膜系之第 2, 4, 5 各层参数 ($n_2=1.65, n_4=2.7, n_5=3.3$) 各用如下的三层对称组合膜等效之:

$$\frac{(0.24L0.48M0.24L)}{n_2},$$

$$\frac{(0.36M0.24H0.36M)}{n_4},$$

$$\frac{(0.22M0.54H0.22M)}{n_5},$$

Γ 与 λ_0/λ 关系曲线由图 5 表示。这样, 包含三个等效组合膜的等效五层宽带增透膜系为:

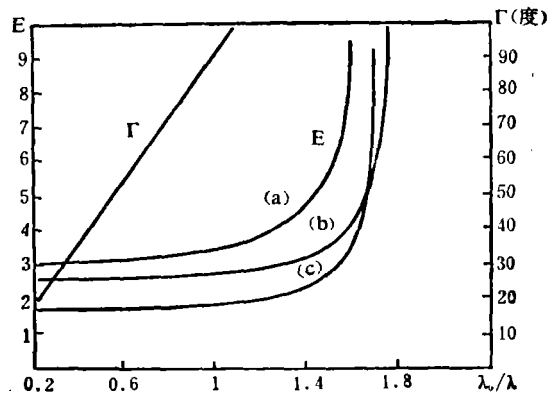


图5 $E, \Gamma \sim \lambda_0/\lambda$ 曲线
(a) $0.22M0.24H0.22M$
(b) $0.36M0.24H0.36M$
(c) $0.24L0.48M0.24L$

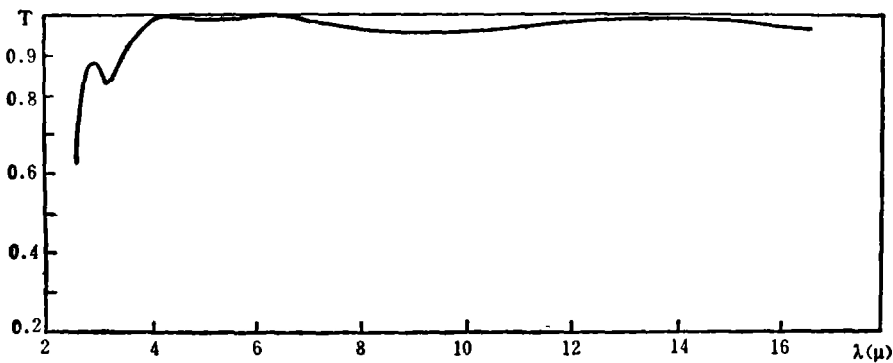


图6 等效五层宽带增透膜系(总数为八层)实验光谱透射曲线(每个等效膜层都取一个周期)

$$\text{Ge} | (0.22 M 0.54 H 0.22 M) (0.36 M 0.24 H 0.36 M) M \rightarrow \\ (0.24 L 0.48 M 0.24 L) L | A,$$

合并后为八层膜系:

$$\text{Ge} | 0.22 M 0.54 H 0.58 M 0.24 H 1.36 M 0.24 L 0.48 M 1.24 L | A,$$

计算光谱特性曲线见图 6。

显然, 在相同的设计波长 λ_0 (图中计算取 $\lambda_0 = 4.5 \mu\text{m}$), 曲线的高透射带在图 6 中比图 2 中要窄得多。这是因为图 6 的 $E \sim \lambda_0/\lambda$ 曲线, 在 $\lambda_0/\lambda \geq 1.2$ ($\lambda < 3.7 \mu\text{m}$) 时, 等效折射率 E 值偏离设计值较大。(设计值见表 1: $n_2 = 1.65$, $n_4 = 2.7$, $n_6 = 3.3$)。

三、“随机优选法”对超宽带增透膜系的最优化

从上节分析可以看出, 对层数不太多 (如三层) 的宽带增透膜系, 只须用一般的分析与试算就可获得比较满意的结果。而用于 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 的超宽带增透膜系, 当包含三个对称等效组合膜, 总层数为八层时, 图 6 等效光谱曲线与图 2 曲线相比, 有效增透宽度显著缩小。虽然可以采取缩小基本对称结构的相位厚度, 从而增加基本周期数来改善光谱曲线, 但这样做就会存在较多的非 $\lambda_0/4$ 层, 并且相位厚度较薄, 镀制困难。为此, 我们把上述八层膜系作为初始膜系进行最优化, 使用的方法是“随机优选法”^[31]。关于“随机优选法”在膜系自动设计中的运用有待进一步讨论, 这里仅将其基本思想及其在超宽膜设计中的运用作一扼要描述。

我们知道, 在膜系的最优化设计中, 通常或是把折射率, 或是把光学厚度作为光谱特性最优化的校正参数。若在折射率及其他条件都选定的情况下, 一组膜系的反射率 R 可以用下列函数形式表示:

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_n, \lambda)$$

式中 X_1, X_2, \dots, X_n 是各层光学厚度, n 为整数。上式表示, 在给定的波长上, R 是一个 n 维空间函数。如果在 n 维空间某一点:

$$X^*(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*),$$

有理想的 R 值, 则此点 X^* 为最优化的目标值。作为随机最优化的薄膜自动设计, 其过程是: 从上述 n 维空间中某一点 $X^0(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$ ——初始设计的参数出发, 在各层参数规定的变化范围内, 沿随机选取的方向和步长到 X' 点, 若 R 变小, 则继续前进; 若 R 变大, 则沿相反方向以同一步长前进, 若 R 变小, 就继续前进, 若 R 变大, 那么重新选取方向和步长, 依此类推。为了求得 R 的极小值, 并使 R 从某个局部极小跳到“较远”极小值, 可以对随机选取的方向和步长同除一个常数 C , 在优化过程中可以控制 C 的大小, 并加有步长加速措施。在电子计算机计算中 C 反复从小到大变化, 一直到设计出较满意的结果, 亦即使得校正参数 X 从 X^0 逐步逼近到 X^* , 以获得满意的 R 值。在最优化过程中, 若不用初始参数, 也可以用各参数被规定的变化范围的中点作为初始点, 按上述程序不断调优。

为设计 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 超宽增透膜系, 当仅使用 Ge, ZnS, SrF₂ 三种膜料而总层数为八层膜的膜系时, 光谱特性曲线是很不理想的。为此我们把这样的八层膜系作为初始结构, 规定在波长区 $2.2 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 13.4 \mu\text{m}$, 垂直入射时进行最优化。在优化过程中, 我们选取最大值膜

$$F = \max R(\lambda_i) \\ (1 \leq i \leq M)$$

(此处 M 是波点数) 作为评价函数。表 2 为最优化前后的各层光学厚度, 图 7 为最优化后的八层膜系计算的光谱特性曲线。在上述波长区, 经最优化后, 最大的一点为 $R_{\max}=0.024$ 。可以看出, 经随机调优后的八层膜显著地改善了初始八层膜系的光谱曲线。使之在 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 光谱区能有比较高的增透性能, 这充分显示了“随机优选法”对光学膜系最优化的功能。

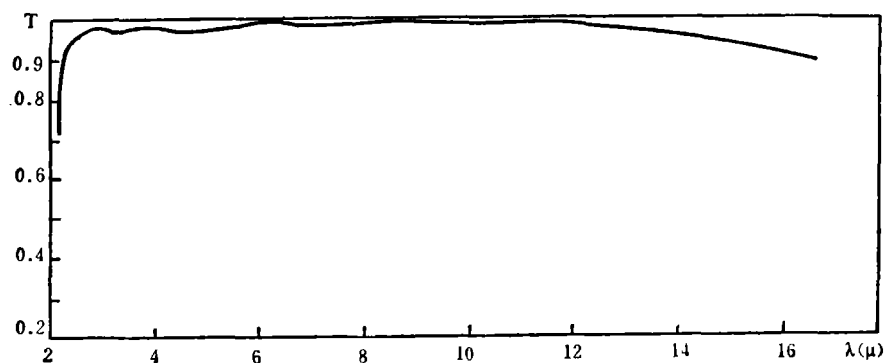


图 7 最优化后的八层计算光谱曲线($n_s=4$)

表 2 最优化前后八层厚度参数(单位: $\lambda_0/4$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
优化前	1.24	0.48	0.24	1.36	0.24	0.58	0.54	0.22
优化后	1.2	0.19	0.265	1.347	0.114	0.536	0.348	0.218

前面计算的 $T\sim\lambda$ 曲线都是只考虑基片单面的增透效果, 而基片的另一面是假定为无限延伸的, 下面给出的实验结果是基片两面镀上同样的膜系的结果。

四、实验结果与分析

我们在普通光学多层设备(DMD-450)上用比较片倍波控制, 并用非 $\lambda_0/4$ 控制曲线^[4], 控制各层光学厚度。要镀出实用的宽带增透膜系是不太难的。重复实验时性能稍有变化, 但每次实验曲线中透射率水平基本相同。图 8 是总层数为四层的等效三层宽带增透膜系之实验光谱特性曲线; 图 9 乃是最优化后的八层超宽膜系光谱特性曲线。

图 9 给出的实验曲线, 虽具有较好的增透性能, 但与计算值相比, 偏离稍明显。这种偏离, 一是因为在很宽的波长范围内, 理论计算未考虑材料的色散和吸收, Ge 、 ZnS 、 SrF_2 在 $13\ \mu\text{m}$ 后都有一些吸收, 在 $3\ \mu\text{m}$ 附近也存在水吸带的影响; 二是普通光电极值膜控仪控制非 $\lambda_0/4$ 点误差较大, 使实验曲线难以与计算值符合得很好。

尽管存在实验上的一些困难, 然而对于 Ge 衬底的 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 及 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 范围的宽带增透曲线, 平均透过率和最低一点的透过率都达到美国 OCLI 公司的商品指标。用于

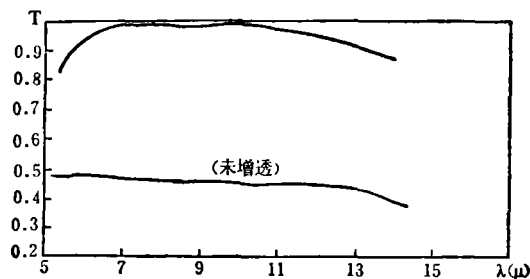


图 8 等效三层宽带增透膜系实验曲线(双面)

8~14 μm 的宽带增透曲线在 8~12 μm 内平均透过率和最低一点透过率为 $\bar{T}_{8\sim12} = 97.5\%$,

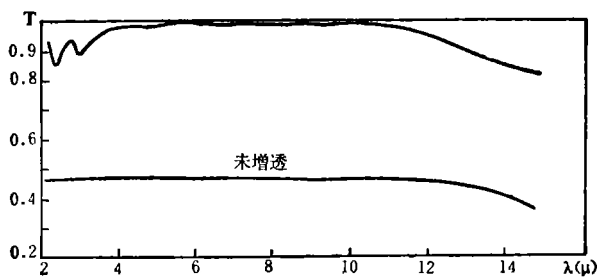


图9 利用“随机最优化”法所获得的
八层宽带增透膜系实验曲线(双面)

$T_{\min} = 94.5\%$, 用于 2~14 μm 的宽带增透曲线在 2.5~14 μm 内平均透过率和最低一点的透过率为 $\bar{T}_{2.5\sim14} = 94.6\%$, $T_{\min} = 82.5\%$ 。

虽然在 2~14 μm 波长区能找到一些其他材料来满足宽带增透中某些层的需要, 从而可能实现更好一些的光谱特性, 但从实际应用上看, 易潮解的、膜软的、毒性大的材料, 对制作

和使用都是不利的。因而作者选用了比较合适的材料 Ge、ZnS、SrF₂ 作为膜料, 虽然在设计和制作上增加了一些困难, 但还是较好地解决了 8~14 μm 及 2~14 μm 的宽带设计与制作课题。

本文的设计思想, 原则上也适用于设计和制作其他高折射率衬底的宽带增透膜系。

致谢——作者向对本工作设计与制作给予帮助的陶凤翔、朱福荣等同志表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] L. Young, *J. Opt. Soc. Am.*, **51** (1961), 967.
- [2] E. L. Church, et al, *Appl. Opt.*, **13** (1974), 1274.
- [3] H. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, London: Adam. Hilger. Ltd, 1969. 中译本: 光学薄膜技术, 周九林、尹树百译, 国防工业出版社, 1974.
- [4] P. H. Berning, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**(1962), 431.
- [5] 陶凤翔, 红外物理与技术, (1978), 4, 49.
- [6] 张凤山, 红外物理与技术, (1975), 3, 1.

DESIGN AND ANALYSIS OF INFRARED BROAD-BAND ANTIREFLECTION COATINGS

XU BUYUN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

It has been done to optimize an infrared broad-band coating on the theory of equivalent multi-layers by means of a computer program named "Random optimization". The practical design and experimental results for 8~14 and 2~14 micrometer wavelength-band on Ge substrate are presented.