

# 透可见、反红外宽带分色滤光片的设计

李恒义 李琼瑞

(华北光电研究所)

**摘要**——本文用金属膜具有高反射特性同时又可以进行透增透的原理, 设计了透可见、反红外宽带分色滤光片所需要的实际组合膜系——|介质|金属|介质|组合膜系。并给出分色片的实验结果: 可见区的透过率为 80~88%, 中、远红外区的反射率为 90%。

## 一、设计的指导思想

利用光学薄膜技术来达到可见与红外两大波段的分光目的是一种简单易行、效果良好的方法。鉴于分色片的透过带和反射带都很宽, 用纯介质膜堆来设计和制备已很困难, 而采用金属-介质组合膜系却可以达到膜层层数少、制备简单而分光性能好的目的, 我们通过在金属膜层两侧插入适当的介质匹配层, 改变出射导纳( $\hat{Y} = \alpha + i\alpha$ )和入射介质, 把金属膜层本身在可见区所具有的相当高的最大透射率诱导出来(即透增透), 并在入射侧设计减反层, 使组合膜系的吸收及反射损失都减到最小, 从而实现可见光谱区为高透射带。而所增加的介质层因其对中、远红外以后影响很小, 因此, 在中、远红外区仍保持金属膜层很高的反射率。

## 二、设计步骤及理论基础

### 1. 在保证中、远红外具有足够高的反射率的情况下确定所需金属膜层的最小厚度

图 1 表示入射在厚度为  $h$ 、折射率为  $\hat{n}_2 = n_2 - ik_2$ 、两侧介质分别为 1、3 的金属膜层的平面电磁波的情况。在垂直入射下, 根据电磁波在金属介质的传播原理可得到平面波经介面 1、2 和介面 2、3 后的反射率  $R$  为<sup>[1][5]</sup>:

$$R = \frac{\rho_{12}^2 e^{2k_2 \eta} + \rho_{23}^2 e^{-2k_2 \eta} + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos(\varphi_{23} - \varphi_{12} + 2n_2 \eta)}{e^{2k_2 \eta} + \rho_{12}^2 \rho_{23}^2 e^{-2k_2 \eta} + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos(\varphi_{12} + \varphi_{23} + 2n_2 \eta)} \quad (1)$$

其中,  $\eta = 2\pi h/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为自由空间波长,  $\rho_{12}$ 、 $\rho_{23}$ 、 $\varphi_{12}$ 、 $\varphi_{23}$  分别为介面 1、2 及介面 2、3 的反射振幅和相位。

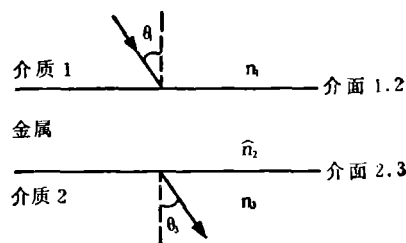


图 1 入射在厚度为  $h$  的金属膜上的平面波示意图

从式 (1) 可看出:  $R$  的大小主要取决

于含有  $e^{2k_2\eta}$  的项。而当金属层的厚度满足  $2k_2\eta > 1$  时, 式 (1) 中其他不含  $e^{2k_2\eta}$  的项都可以忽略不计<sup>[2]</sup>, 这时  $R \approx \rho_{12}^2$ , 这就是说, 只要  $h$  满足关系式  $2k_2\eta > 1$ , 当  $h$  继续增厚时,  $R$  并不增加, 而是趋向一个常数  $\rho_{12}^2$ 。关系式  $2k_2\eta > 1$  就是用来获得金属膜最大反射率的条件。根据这个条件, 只要  $h > \lambda_0/4\pi k_2 = d$ , 大于  $\lambda_0$  波长的光谱区都将获得最大反射率。例如  $\lambda_0 = 4 \mu\text{m}$ , 对银膜 ( $k_2 = 28.7$ ), 则  $d = 4000 \text{ nm}/4\pi \times 28.7 = 11 \text{ nm}$ 。这就是说, 对银膜而言, 只要其厚度超过  $11 \text{ nm}$ , 大于  $4 \mu\text{m}$  的波长区就可获得最大反射率, 这时  $R = \rho_{12}^2 = [(n_1 - n_2)^2 + k_2^2] / [(n_1 + n_2)^2 + k_2^2] \approx 99\%$ <sup>[5]</sup>。考虑到银的红外反射率高且可见区的最大透射率比其他金属高<sup>[8]</sup>, 因此, 我们选用银膜为金属层, 其初始厚度根据上述关系式来决定, 约为  $11 \sim 18 \text{ nm}$ 。

## 2. 金属膜出射侧负载导纳的设计<sup>[3], [5]</sup>

如果将这一百多埃厚的银层直接镀于基片  $K$ 。玻璃上, 由于吸收和入射侧的反射损失

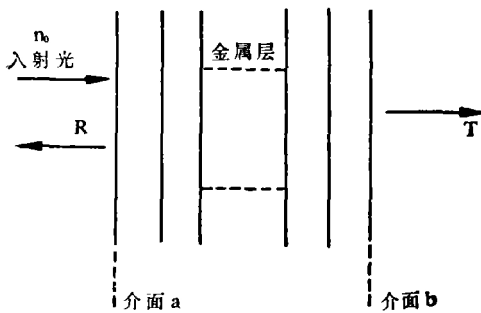


图2 含有金属层的膜系结构示意图

都较大, 因而, 在可见区的实际透射率是不高的, 要使金属膜在可见区实现高透, 就必须在已经确定的金属膜层两侧设计适当的介质匹配层, 一侧把金属膜层的最大透射率诱导出来 (诱增透); 另一侧设计减反膜层, 减少反射损失。

图2表示含有金属层的组合膜堆, 入射介质为  $n_0=1$ , 出射导纳为  $\hat{Y} = x + iz$ 。透射率  $\psi_a$  的定义就是出射界面与入射界面的透过能量之比:

$$\psi_a = S_b/S_a = T/(1-R). \quad (2)$$

其中  $T$  为实际透射率,  $R$  为反射率,  $S_b$ 、 $S_a$  分别为界面  $b$ 、 $a$  的玻印廷矢量对时间的平均值。

由  $\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} (\mathbf{E} \times \mathbf{H})$  可分别计算出  $S_b$  及  $S_a$ , 代入式 (2) 可得:

$$\psi_a = \text{Re}\{E_b(r)H_b^*(r)\} / \text{Re}\{E_a(r)H_a^*(r)\}, \quad (3)$$

其中  $\text{Re}$  表示取实部,  $*$  为共轭复数,  $E_a$ 、 $H_a$ 、 $E_b$ 、 $H_b$  分别界面  $a$ 、 $b$  的电矢量和磁矢量。对于只有一层金属膜的情况来说, 有:

$$\begin{pmatrix} \hat{E}_a \\ \hat{H}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_2 & \frac{i}{n_2 - ik_2} \sin \delta_2 \\ i(n_2 - ik_2) \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}_b \\ \hat{H}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + ib_1 & a_3 + ib_3 \\ a_2 + ib_2 & a_4 + ib_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}_b \\ \hat{H}_b \end{pmatrix},$$

其中  $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 - ik_2)h$ ,  $a_j$ 、 $b_j$  表示金属膜特征矩阵组元的实部和虚部。由上式矩阵相乘并根据导纳  $\hat{Y}$  的定义, 有  $\hat{H}_b = \hat{Y} \hat{E}_b$ , 并代入式 (3) 得:

$$\psi_a = x / [c_0 + c_1x + c_2z + c_3(x^2 + z^2)], \quad (4)$$

其中:

$$c_0 = a_1a_2 + b_1b_2, \quad c_1 = a_2a_3 + a_1a_4 + b_2b_3 + b_1b_4,$$

$$c_2 = b_1b_4 + a_3b_2 - a_1b_4 - b_3a_2, \quad c_3 = a_3a_4 + b_3b_4,$$

由式 (4) 可见,  $\psi_a$  除了与金属层的特征矩阵组元  $\hat{a}_i$  有关外, 还与出射导纳的实部  $x$  和虚部  $z$  有关。在金属层已定时 (即  $\hat{a}_i$  已定), 要想使  $\psi_a$  为最大值  $\psi_{a\max}$ , 就必须设计合适的负载导纳  $\hat{Y}_{\max} = x_{\max} + iz_{\max}$ , 只要对式 (4) 分别求导并令它们为零即可求出  $x_{\max}$  及  $z_{\max}$  来:

$$x_{\max} = (c_0c_3 - 0.25c_2^2)^{1/2}/c_3, \quad (5)$$

$$z_{\max} = -c_2/2c_3, \quad (6)$$

$$\psi_{\alpha_{\max}} = 1 / (c_1 + 2\sqrt{c_0 c_3 - 0.25c_2^2}) \quad (7)$$

式(5)和(6)即为设计匹配导纳的依据。例如:对130 Å厚的银膜,在λ=600 nm波长处,让其势透率最大时所需的匹配导纳为 $\hat{Y}_{\max} = 6.17 + i11.4$ ,这样大的导纳一般都要用多层膜才能达到,为了制备简单,我们选用一层ZnS层与基片K<sub>9</sub>玻璃一起组成出射导纳,并兼顾整个可见光谱区高透过要求,用计算机来优选这层ZnS膜厚为20~30 nm。

### 3. 入射侧减反膜的设计<sup>[5]</sup>

由式(2)  $T = \psi_{\alpha}(1-R)$ 知道,在 $\psi_{\alpha}$ 一定时,要想提高实际透过率 $T$ ,就要求减小 $R$ ,只有当 $R \rightarrow 0$ 时,才有 $T \rightarrow \psi_{\alpha}$ ,而 $\psi_{\alpha}$ 已由步骤2设计实现了 $\psi_{\alpha} \rightarrow \psi_{\alpha_{\max}}$ ,再加上 $T \rightarrow \psi_{\alpha_{\max}}$ ,才达到设计目的。使 $R \rightarrow 0$ ,实际上是设计减反膜的问题。设计时,将金属层与出射匹配层ZnS及基片一起视为新的组合导纳 $\hat{F} = F_1 + iF_2$ ,设要镀上的减反层的折射率为 $N_1$ ,相位厚度为 $\delta_1$ ,几何厚度为 $t$ ,它与 $\hat{F}$ 组合后的导纳为 $\hat{G} = p + iq$ (图3)。则反射率 $R = \left| \frac{n_0 - \hat{G}}{n_0 + \hat{G}} \right|^2$ ,其中

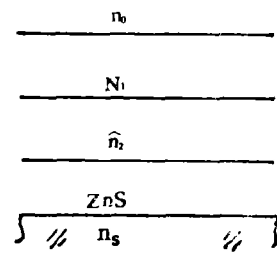


图3 设计减反膜用等效图

$$\hat{G} = \frac{F_1 \cos \delta_1 + i(N_1 \sin \delta_1 + F_2 \cos \delta_1)}{\left( \cos \delta_1 - \frac{F_2}{N_1} \sin \delta_1 \right) + i \frac{F_1 \sin \delta_1}{N_1}} \quad (8)$$

要使 $R=0$ ,则要求 $\hat{G} = n_0 = 1$ ,即式(8)的分子分母相等,最后解出一个复数相等联立方程得:

$$N_1 = \sqrt{\frac{F_2^2 + F_1(F_1 - 1)}{F_1 - 1}} \quad (9)$$

$$\delta_1 = \text{tg}^{-1}[(1 - F_1)N_1 / F_2] \quad (10)$$

再由 $t = \delta_1 \cdot \lambda / 2\pi N_1$ 得出减反膜层的几何厚度。例如,选择λ=600 nm作匹配点,则 $F_1 = 1.78$ , $F_2 = -1.53$ ,代入式(9)、(10)得到 $N_1 = 2.147$ , $t = 38$  nm。同样,要兼顾到整个可见光谱区的特性及工艺易于实现,我们选取折射率与其相接近的一层ZnS作减反层,用计算机优选其厚度为30~45 nm。整个膜系为:

$$K_9 | 20 \sim 30 \text{ nm ZnS} | 11 \sim 18 \text{ nm Ag} | 30 \sim 45 \text{ nm ZnS} | n_0$$

### 4. 验算中、远红外的反射特性

设整个膜系的组合导纳为 $\hat{G} = p + iq$ ,则反射率

$$R = \left| \frac{n_0 - \hat{G}}{n_0 + \hat{G}} \right|^2 = \frac{(n_0 - p)^2 + q^2}{(n_0 + p)^2 + q^2} = \frac{(1 - p)^2 + q^2}{(1 + p)^2 + q^2}$$

由于在中、远红外区 $|q|$ 很大,因此,膜系的反射率是很高的,3~14 μm光谱区的 $R$ 计算结果如表1所示:

表1 3~14 μm光谱区红外反射率计算结果

波长(μm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
反射率(%)	93	94.7	95.5	95.6	96.1	96.1	96.4	96.4	96.5	96.5	96.5	96.5

### 三、试验结果

我们采用非  $\lambda/4$  膜厚的监控方法对上述设计的膜系进行了试制, 所得结果良好。图 4 为  $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$  光谱区的实际透过率, 图 5 为中、远红外区的实际反射率。

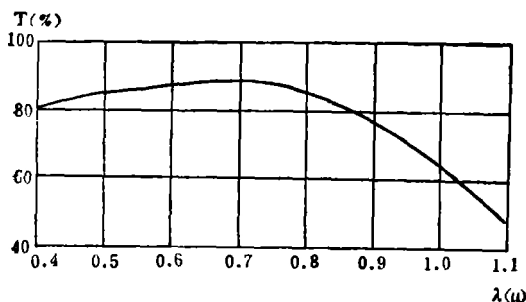


图 4  $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$  透过率曲线

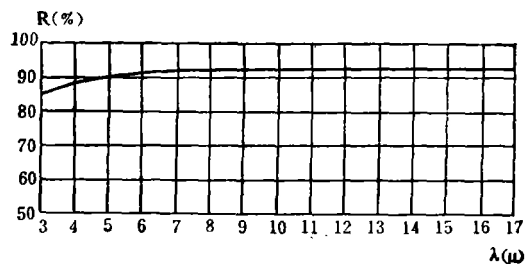


图 5 中、远红外反射率曲线

致谢——本工作得到刘胜永同志及浙江大学唐晋发、顾培夫老师的热情帮助, 在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 5th rev. ed, Oxford: Pergamon, 1975, Sec. 13.
- [2] B. Carli, *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977), 7, 908.
- [3] Pnili. W. Baumeister, *Appl. Opt.*, **8** (1969), 2, 423.
- [4] H. A. Macleod, *Optica Acta.*, **25** (1978), 2, 93~106.
- [5] 李恒义、李琼瑞, *激光与红外*, (1979), 10, 1~6.

## DESIGN OF THE WIDE BAND DICHROIC FILTER FOR TRANSMITTING VISIBLE AND REFLECTING INFRARED BANDS

LI HENGYI, LI QIONGRUI

(North China Research Institute of Electro-Optics)

#### ABSTRACT

A wide-band dichroic filter for transmitting visible and reflecting infrared bands is described, which is designed on the basis of the metal films with properties of both high reflection for infrared and induced transmission for visible bands. The combined thin film stack designed is a dielectric-metal-dielectric thin film system. Experimental results are presented: the transmittance of the dichroic filter in the visible region is  $80\sim 88\%$  while its reflectance in the intermediate and far infrared region is  $90\%$ .