

倍频反射膜的研究

孙连春 刘亚辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

白继迅

(北京长城光学仪器厂)

提 要

本文导出了获得倍频高反射膜的较简单的必要条件,给出了倍频反射膜系的普遍形式和相应的控制波长公式。作为例子,计算出2、3、4、5倍频的光谱特性曲线;并对2倍频膜系进行了实验研究,给出了测量的光谱透射曲线。

一、引 言

随着激光技术的飞速发展,对光学薄膜器件提出越来越高的要求,不仅是质量,而且品种也有所增加,倍频反射膜就是其中之一。所以对其研究,无论对薄膜光学理论本身,还是从应用技术的角度出发,均显得很有必要。

在 R. W. Smith^[1] 推导出的公式基础上,本文从理论、膜系设计、控制波长的选择到制备技术,进行了比较系统的研究,得到了具有普遍意义的结果。

二、膜系设计与选择控制波长

倍频反射膜就是在 λ_f (基频波长)和 $\lambda_f/2$ 、 $\lambda_f/3$ 、 \dots 、 λ_f/k (k 为大于1的正整数)处同时获得高反射的膜层。一般的反射膜系不能满足这个要求。由薄膜光学理论^[2]可知,如果多层介质膜由 s 个重复的基本周期构成,那么多层膜的特征矩阵便为: $[\mu] = [M]^s$ 。式中 $[M]$ 是基本周期的特征矩阵。将 $[M]$ 写成: $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$,则可以证明,对于满足下式的各个波长区:

$$\left| \frac{M_{11} + M_{22}}{2} \right| \geq 1. \quad (1)$$

反射率将随周期数目的增加而稳定地增大,因此(1)式是高反射带必定存在的条件。

R. W. Smith用高低折射率组成的两层膜为一个基本周期,并且满足

$$\left. \begin{aligned} n_H d_H + n_L d_L &= \lambda_f/2, \\ n_H d_H &= \alpha \cdot \lambda_f/2, \\ n_L d_L &= (1 - \alpha) \lambda_f/2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

导出^[1]

$$\left| \cos \pi \alpha K \cos \pi (1-2) K - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) \sin \pi \alpha K \sin \pi (1-\alpha) K \right| \geq 1. \quad (3)$$

激光倍频反射膜的特点是只需要在特定波长处具有高反射值,而不必考虑带宽和其它波长的反射率。就目前所知道的 n_H/n_L 值,在可见和红外区约为 1.5 至 2.9 之间,故令: $\frac{1}{2} \left(\frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) = 1 + \varepsilon$ 。 ($0 < \varepsilon < 1$), 因为基频和倍频处 K 均为正整数,所以(3)式可进一步推导得

$$|\cos K\pi(1 + \varepsilon \sin^2 K\pi\alpha)| \geq 1. \quad (4)$$

(4)式比(3)式更加明显看出,如果基本周期的光学厚度为 $\lambda_f/2$,对给定 K 值,只需适当选择 α 值,满足(4)式条件,便可在基频和各倍频处同时获得高反射带。

基于上面的分析,便可通过改变高低折射率的厚度比来确定 α 值,进行膜系设计。

对二倍频膜系, $K=2$,取高低折射率层的光学厚度比为: $n_H d_H / n_L d_L = \alpha / (1-\alpha) = 1/2$ 。解之: $\alpha = 1/3$; $1-\alpha = 2/3$ 。所以 $n_H d_H = (1/3) \cdot (\lambda_f/2) = (2/3) \cdot (\lambda_f/4)$; $n_L d_L = (2/3) \cdot (\lambda_f/2) = (4/3) \cdot (\lambda_f/4)$ 。按常规可写为: $G[(2/3)H(4/3)L]^s(2/3)HA$ 。 s 为周期数,这就是熟知的二倍频反射膜系。

对于三倍频膜系, $K=3$,取 $\alpha/(1-\alpha) = 1/3$ 。有: $n_H d_H = (1/4) \cdot (\lambda_f/2) = (1/2) \cdot (\lambda_f/4)$; $n_L d_L = (3/4) \cdot (\lambda_f/2) = (3/2) \cdot (\lambda_f/4)$ 。可写为: $G[(1/2)H(3/2)L]^s(1/2)HA$ 。同理,对于四、五倍频乃至 K 倍频有膜系:

$$G[(2/5)H(8/5)L]^s(2/5)HA,$$

$$G[(1/3)H(5/3)L]^s(1/3)HA,$$

.....

$$G\{[2/(K+1)]H[2K/(K+1)]L\}^s[2/(K+1)]HA, \quad (5)$$

或者推导出:

$$G\{[2K/(K+1)]H[2/(K+1)]L\}^s[2K/(K+1)]HA. \quad (6)$$

(5)式与(6)式的膜系表示式具有相同的反射带光谱特性。实际工作中究竟采用(5)式或(6)式,主要是根据制备工艺的难易来确定。首要一点就是选择单一的控制波长。

分析(5)、(6)式,它们对基频波长 λ_f 虽然不是四分之一波长堆,无法使用光电极值法实现膜厚控制,但有共同因子 $2/(K+1)$,取控制波长

$$\lambda_c = \frac{2}{K+1} \lambda_f, \quad (7)$$

则(5)、(6)式可分别转化为

$$G(H'KL)^s H'A \quad (8)$$

和

$$G(KH'L)^s KH'A. \quad (9)$$

(8)、(9)式分别是 $1:K$ 堆或 $K:1$ 堆,这样选取控制波长 λ_c 就使得(5)、(6)表示式的膜系在工艺制备上方便多了。当然在实际镀膜中,要考虑到镀膜装置的系统误差, λ_c 稍有修正。

由(1)式可知,当 K 为奇数时, λ_c 处于高反射带,光电极值法控制厚度时可采用透射式;当 K 为偶数时, λ_c 处于通带,光电控制厚度时则可以采用反射式。

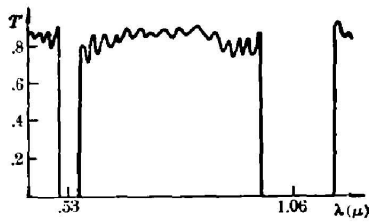


图 1 膜系 $G[(2/3)H(4/3)L]^{15}(2/3)HA$ 的计算透射率

Fig. 1 Computed transmittance curve of the

system $G\left(\frac{2}{3}H\frac{4}{3}L\right)^{15}\frac{2}{3}HA$

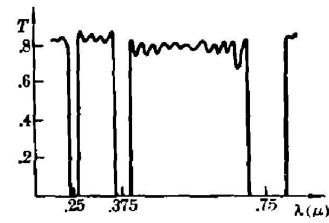


图 2 膜系 $G[(1/2)H(3/2)L]^{15}(1/2)HA$ 的计算透射率

Fig. 2 Computed transmittance curve of the

system $G\left(\frac{1}{2}H\frac{3}{2}L\right)^{15}\frac{1}{2}HA$

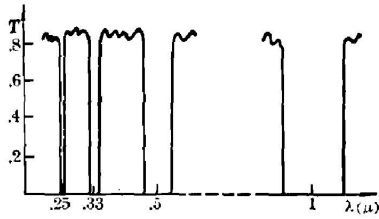


图 3 膜系 $G[(2/5)H(8/5)L]^{15}(2/5)HA$ 的计算透射率

Fig. 3 Computed transmittance curve of the

system $G\left(\frac{2}{5}H\frac{8}{5}L\right)^{15}\frac{2}{5}HA$

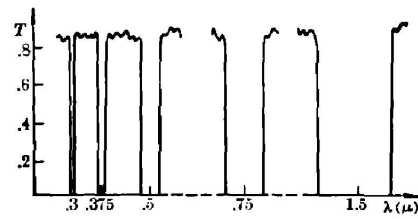


图 4 膜系 $G[(1/3)H(5/3)L]^{15}(1/3)HA$ 的计算透射率

Fig. 4 Computed transmittance curve of the

system $G\left(\frac{1}{3}H\frac{5}{3}L\right)^{15}\frac{1}{3}HA$

依据膜系(5)和控制波长公式(7), 本文取 $n_H=2.0$, $n_L=1.42$, $s=15$, 做出二、三、四、五倍频的光谱特性理论计算曲线, 分别列于图 1, 2, 3 和 4。

三、工 艺 实 验

实验是在北京仪器厂 1979 年制造的光学多层镀膜机上进行的。光电控制系统也用随机的 F-1 型放大器及其配套元器件, 整个装置未做任何改动。

本文以二倍频膜系制备为例, 取 $\lambda_f=1.06\mu$, $\lambda_f/2=0.53\mu$, 理论计算 $\lambda_c=0.7067\mu$ 。实

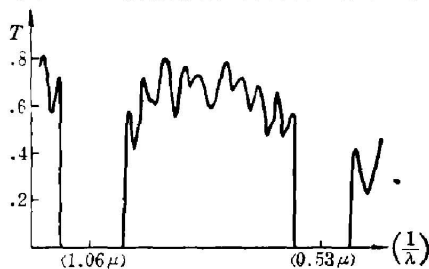


图 5 可见和近红外区三倍频反射膜的实测透过率曲线

Fig. 5 Measured transmittance curve of the double frequency high reflectance film at the visible and infrared regions

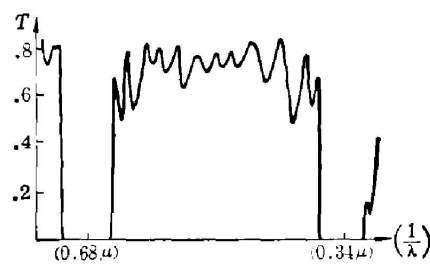


图 6 紫外和可见区二倍频反射膜的实测透过率曲线

Fig. 6 Measured transmittance curve of the double frequency high reflectance film at the ultraviolet and visible regions

验时除考虑到折射率外,还兼顾光谱透明区和色散影响,取高折射率材料为 ZrO_2 ,低折射率材料为 SiO_2 ,均用电子束加热蒸涂。

根据前面分析,膜厚采用光电反射式极值法控制,控制片另一面磨毛。为了控制准确而不造成极值判断错误,计算了 λ_0 处控制片 K 。玻璃上 ($n_g=1.516$) 每镀一层膜时反射率的理论值,如表 1 所示。由此表可以看出,反射光强呈周期性变化,每四层为一个周期。此外,还计算了第一个周期中两个低折射率层的光学厚度为 $\lambda_0/4$ 时的反射率值,加上括号放入表里,供蒸涂控制膜厚时作为判断极值走向时用。

表 1 在 λ_0 处二倍频反射膜层数相对应的反射率计算值

Table 1 Computed reflectivity corresponding to the number of layers of the double frequencies reflectance film at λ_0

层数	反射率	层数	反射率	层数	反射率	层数	反射率
1	20.18	8	4.30	16	4.43	24	4.64
2	(1.75) 20.18	9	20.14	17	20.04	25	19.89
3	4.27	10	20.14	18	20.03	26	19.88
4	(1.97) 4.27	11	4.35	19	4.51	27	4.75
5	20.17	12	4.35	20	4.52	28	4.77
6	20.17	13	20.10	21	19.97	29	19.79
7	4.30	14	20.09	22	19.96	30	19.78
		15	4.47	23	4.62	31	4.89

实验结果的测量曲线如图 5、图 6 所示。图 6 是控制波长不变,采用遮蔽技术得到的可见区~紫外区二倍频反射膜。遮蔽技术和多倍控制技术一样,是用来弥补光电接收系统工作波段有限这一不足的,当然采用时也要考虑到高低折射率两种膜料的色散影响。

四、结 语

从上述讨论看出,如果多层介质膜的基本周期由高低折射率两层膜组成,其光学厚度之和是基频的半个波长,采用不同的相对厚度比,就很容易得到倍频反射。本文给出了倍频反射膜系的普遍形式和控制波长公式。作为例子,制备出近红外区~可见区;可见区~紫外区的二倍频反射膜。

此项工作得到袁幼心同志的支持并审阅全文,王百莉同志参加工艺实验,李秀玉同志测试光谱曲线,特此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. W. Smith; *Optica, Acta*, 1978, **25**, No. 8 (Aug), 715.
 [2] H. A. Macleod; *Thin-Film Optical Filters*, (London Adam Hilger Ltd 1969), 95.

The study of reflective film at multiple frequencies

SUN LIANCHUN AND LIU YAHUI

(Chang Chun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

BAI JIXUN

(The Great Wall Optical Instruments Factory, Beijing)

(Received 26 April 1982)

Abstract

The necessary and simple condition for obtaining high reflectivity at multiple frequencies has been further derived, and the general form of the multilayer system and the corresponding formula of controlling wavelength are given in the paper.

To be an example, the computed transmittance curves for multiple-frequencies ($2\times$, $3\times$, $4\times$, $5\times$) are shown. We have experimentally studied the system of $2\times$ frequencies, on which the transmittance curves are presented.