

薄膜吸收对宽带反射镜的影响

金林法 章宏芬 杨本祺

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

对二组 $\lambda/4$ 膜系迭加的宽带反射镜进行了分析和计算。当膜层的复折射率为 $N_H = 2.3 - i5 \times 10^{-4}$ 和 $N_L = 1.46 - i1 \times 10^{-5}$ 时, 反射镜出现二个吸收峰, 峰值达 7%, 文中阐述了产生吸收峰的原因, 并提出了一种改善吸收峰的简单膜系。

一、引 言

随着可调谐激光器的发展, 要求有宽波段, 低损耗和高损伤阈值的硬膜反射镜。扩展反射镜带宽的方法比较多^[1], 最简单的是采用二组或二组以上的 $\lambda/4$ 膜系迭加, 这样的宽带反射镜可以用一般的极值法监控来制备。但若膜层存在散射或吸收损耗时, 则将严重降低宽带反射镜在某些波长处的反射率。J. Ebert 等人研究了散射损耗对宽带反射镜的影响^[2], 指出在二组 $\lambda/4$ 膜系迭加的宽带反射镜中, 出现了散射损耗峰。在散射峰值处的反射率约减至 90%, 文中提到吸收损耗甚小, 可以忽略, 然而当选用硬膜时, 往往属于氧化物薄膜, 这些薄膜的散射损耗并不大, 而吸收损耗就不可忽视了。例如, 为了要获得层数少、反射带宽的膜系, 则膜层的高、低折射率之差要大, 故选用 TiO_2 和 SiO_2 薄膜, 若 TiO_2 的复折射率 $N_{\text{TiO}_2} = 2.3 - i5 \times 10^{-4}$, SiO_2 的复折射率 $N_{\text{SiO}_2} = 1.46 - i1 \times 10^{-5}$, 则一组 21 层反射膜的反射率可达 99.9%, 但在二组 $\lambda/4$ 膜系迭加的 31 层宽带反射镜中, 就出现了低反射峰, 峰值处的反射率仅为 92.6%。同时曾实测了峰值处的散射损耗, 约为 7×10^{-3} , 则吸收损耗达 7%, 可见吸收的影响是很重要的, 因此本文研究了薄膜吸收对宽带反射镜的影响。

二、宽带反射膜的计算

采用矩阵法计算多层膜的反射率和透过率。若不考虑膜的散射, m 层膜则有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} &= \frac{1}{t_1 t_2 \dots t_{m+1}} \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & r e^{i\delta_1} \\ r_2 e^{-i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} e^{i\delta_m} & r_{m+1} e^{i\delta_m} \\ r_{m+1} e^{-i\delta_m} & e^{-i\delta_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_m^+ \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\prod_{i=1}^{m+1} t_i} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

于是, m 层膜的反射率 $R_m = E_0^- / E_0^+ = c/a$, m 层膜的透射率 $T_m = E_{m+1}^+ / E_0^+ = \prod_{i=1}^{m+1} t_i / a$ 。

式中 E_0^+ , E_0^- 及 E_{0m+1}^+ 表示入射介质中的正向、反向传播以及基片内正向传播的电矢量。 r_m , t_m 是第 m 层和第 $m-1$ 层界面上菲涅耳系数。 r_{m+1} , t_{m+1} 是第 m 层和基片界面上的菲涅耳系数。 δ_m 是第 m 层膜厚引起的位相差。当膜有吸收时, 则在菲涅耳系数中, 折射率 n 应变为复折射率, 即 $(n-ik)$, 这里 k 为膜的消光系数, 则 r_m 、 t_m 、 δ_m 亦为复数。对计算公式进行相应的修正后, 同样可计算多层膜的反射率和透过率。

本文是用 TRS-80 微型计算机进行计算的。对可见光区的宽带反射镜可由二个反射膜迭加而成, 设为 $A(H_1L_1)^6H_1L_2(H_3L_3)^8H_3G$ 。其中, $(H_1L_1)^6H_1$ 为第一个反射膜, 每层膜厚等于 $460\text{ nm}/4$, $(H_3L_3)^8H_3$ 为第二个反射膜, 膜厚为 $620\text{ nm}/4$, L_2 为耦合层, 膜厚为 $540\text{ nm}/4$ 。折射率 $n_{H_1}=2.38$, $n_{H_3}=2.3$, $n_{L_1}=n_{L_2}=n_{L_3}=1.46$ 。为了考虑吸收的影响(令消光系数 $k_{H_1}=k_{H_3}=k_H$), 就下面三种不同的 k 值分别进行了计算, 计算结果示于图 1 中的曲线 1, 2, 3。

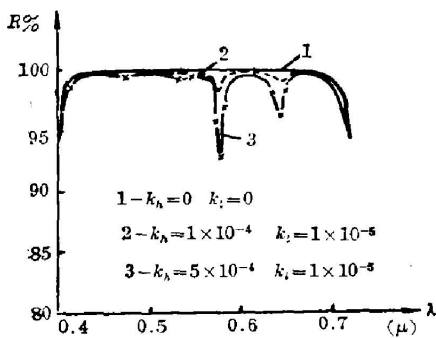


图 1 宽带反射镜的光谱反射率
Fig. 1 Spectral reflectance of broadband mirrors

从计算结果可以看出, 若薄膜无吸收, 又不考虑散射时, 则在 420 nm 到 700 nm 的光谱范围内, 反射率均大于 99% 。当膜层的 $k_H=5 \times 10^{-4}$, $k_L=1 \times 10^{-5}$ 时, 宽带反射镜在某些波长处出现吸收峰值, 使反射率大为下降。例如在波长 574 nm 处, 反射率为 92.6% , 吸收峰的半宽度约为 100 \AA , 透射率为 4×10^{-3} , 吸收为 7% , 在另一峰值为 648 nm 处, 反射率为 96.3% , 吸收峰的半宽度约为 200 \AA , 透射率为 3.6×10^{-3} , 吸收为 3.3% , 其它波长的反射率均在 99% 以上。当 $k_H=1 \times 10^{-4}$, $k_L=1 \times 10^{-5}$ 时, 则波长 574 nm 处的反射率上升到 98.1% , 波长 648 nm 处的反射率已达到 99% 。

从上述结果可以看到, 对有吸收系数稍大的 TiO_2 薄膜组成的宽带反射镜, 不能只用透过率曲线来代表宽带反射镜的反射率, 而一定要测量其反射率曲线, 才能确定该宽带反射镜的实际情况。

三、宽带反射镜产生吸收峰的原因

1. 宽带反射镜膜系内部场强分布

介质薄膜中的吸收损耗与膜层内部场强平方和消光系数的乘积成正比。在一定的工艺条件下, 薄膜的消光系数是一定的, 所以薄膜中的吸收损耗大小随着膜层内部场强大小而变化。从多层薄膜的矩阵表达式出发^[3], 可以计算出宽带反射镜膜系内部的场强分布。为了对比起见, 计算了宽带反射膜在非吸收峰值波长处(例 545 nm)的场强分布, 如图 2(a) 所示。同时, 又计算了吸收峰值波长(574 nm)处的场强分布, 如图 2(b) 所示。

图 2(a) 中的场强分布曲线与 $\lambda/4$ 膜系的单个反射膜的场强分布是相似的^[4]。在膜系内部, 场强主要集中在表面几层中, 以后就迅速减弱, 到第 11 层以后的场强已经降低到最大场强的 4% , 所以非吸收峰值波长处的吸收损耗主要集中在前面几层中, 在以后各层中就很微弱了。因此, 与一组反射膜系一样, 可以达到很高的反射率 ($R=99.6\%$)。但是从图 2(b) 看

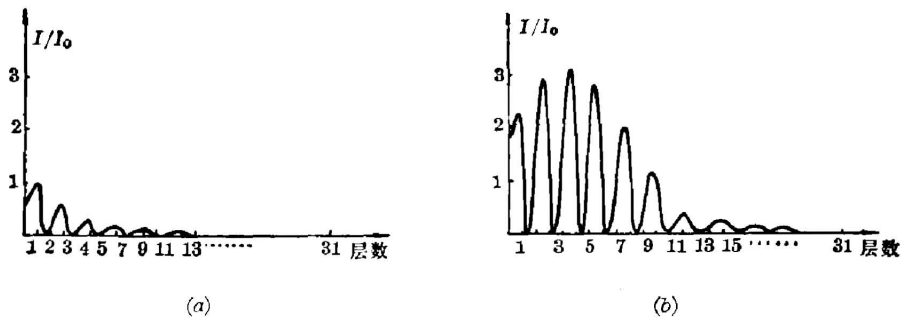


图2 膜内场强分布

Fig. 2 Intensity distribution of the electric field in layers

到,在吸收峰值波长处的场强分布与 $\lambda/4$ 膜系的单个反射膜的场强分布差异很大,在宽带反射镜中的第一个反射膜内(即前面13层)场强均很大,并且主要发生在高折射率的膜层内,尤其以第5层为最强,是非吸收峰值波长处最大场强的三倍多。所以对于同样大小的消光系数,当然要形成较大的吸收损耗。

2. 第一个反射膜的损耗

对第一个反射膜即 $(H_1L_1)^6H_1$ 膜系单独进行了从截止带到通带区的吸收损耗计算。结果示于图3。图中曲线1是单个反射膜系的吸收率,曲线2是宽带反射镜的吸收率。图3表明,后截止带内其吸收是较小的,也比较平坦。但到通常区则形成一个吸收峰,故当用两个反射膜迭加的办法来制备宽带膜时,若膜层稍有损耗,则光通过第一个反射膜的通带区时,便引起吸收损耗,然后进入另一个反射膜的截止带,由于其高反射,使得又一次通过第一个反射膜的通带区,由于干涉结果使吸收大为增加,在某些波长处形成吸收峰。从图3还可以看到第一个反射膜的吸收峰的波长位置也就是整个宽带反射镜的吸收峰位置。吸收损耗从单个反射膜的1.4%增加到7%,形成了一个吸收高峰,反射率也就下降为92.6%。

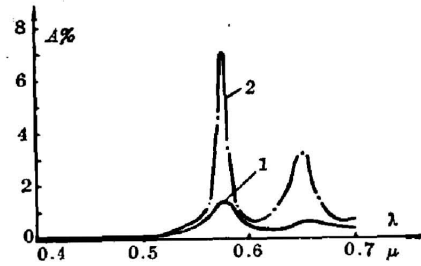


图3 反射镜的光谱吸收率

Fig. 3 Spectral absorptance of reflectors

四、讨 论

从上面的计算和分析结果可以看出,用二个反射膜迭加的宽带反射镜,如欲使宽带膜没有较大的吸收峰,则必须减少第一个反射膜的吸收损耗,每层膜的消光系数应小于 1×10^{-4} 。但按照目前的蒸发工艺,要使 TiO_2 薄膜的消光系数达到这个水平是有困难的。一般都在 $k = 5 \times 10^{-4}$ 左右^[5],所以吸收峰是免不了的。即使薄膜镀好后放在烘箱中高温烘烤,也不能得到彻底改善。因为烘烤只能使表面几层膜加强氧化,减少吸收。假如,经过烘烤,宽带反射镜中最外面二层的 TiO_2 的消光系数从 5×10^{-4} 减至 1×10^{-5} ,吸收峰值的损耗仅从7%减至6%。这种结果正好用图2(b)中的场强分布来说明,仅仅减少表面几层的吸收,还不能降低后面几层高场强中的吸收损耗。

为了降低吸收峰值,从减少第一个反射膜系的损耗峰出发,设计了另一种膜系,即把上述膜系中最外面一层的 H 改为 $H/2$,即

$$A \frac{H_1}{2} (L_1 H_1)^6 L_2 (H_3 L_3)^8 H_3 G,$$

$$\lambda_1 = 475 \text{ nm},$$

$$\lambda_2 = 550 \text{ nm},$$

$$\lambda_3 = 620 \text{ nm}.$$

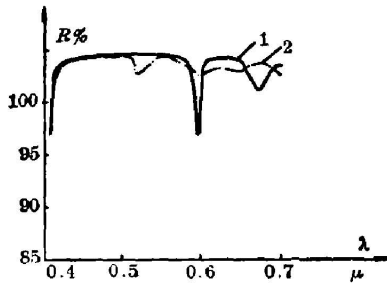


图4 二种宽带反射镜的光谱反射率
Fig. 4 Spectral reflectance of two types of broadband mirrors

从计算结果可以得出吸收峰处的反射率从 92.3% 提高到 97.4%,从而得到了显著改善,结果见图 4,其中曲线 1 为原来的膜系,曲线 2 为新膜系。但从曲线可以看到,除了吸收峰之处外其它波长的反射率比原来的稍有降低,故要获得一个更好的宽带反射镜,又能用简单的工艺方法来实现,还需要作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Z. Les; *Appl. Opt.* 1981, **20**, No. 1 (Jan), 61.
- [2] J. Ebert, H. Pannhorst *et al.*; *Appl. Opt.* 1979, **18**, No. 6 (Mar), 818.
- [3] 范正修;《激光》, 1981, **8**, No. 8, 45.
- [4] 光学薄膜编写组;《光学薄膜》, (上海人民出版社, 1976), 23.
- [5] H. K. Pulker; *Thin Solid Film*, 1976, **34**, No. 2 (May), 343.

Effect of film absorption on broadband mirrors

JIN LINFA ZHANG HONGFEN AND YANG BENQI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 31 Marh 1982)

Abstract

Broadband mirrors with two quarterwave stacks superimposed on the same substrate have been analysed. When the refractive indices of films are $N_H = 2.3 - i5 \times 10^{-4}$ and $N_L = 1.46 - i1 \times 10^{-5}$, two narrow absorption bands are induced in this broad band mirror. The peak value reaches 7%. The causes which inducing absorption band are explained in this paper and a broad band mirror with simple construction to reduce the absorption peak at the absorption band is also proposed.