

三倍频分光膜的设计与试制

范瑞英 陆月妹 范正修

(中国科学院上海光机所)

提要: 报道了基频高反射, 二倍频、三倍频高透射的倍频薄膜设计方法, 并给出设计结果和实验结果。

Design and experiment of multiple frequency beam splitting thin films

Fan Ruiying, Lu Yuemei, Fan Zhengxiu

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

Abstract: Design of a multiple frequency thin film is reported which possesses high reflectance at primary frequency and high transmittance at doubled and tripled frequencies. The experimental results are given.

一、引言

随着倍频激光系统的发展, 要求镀制一种倍频分光膜, 使它对激光基频为高反射, 而对其二、三倍频为高透射。对于这种新型薄膜的设计和制备技术尚未见到报道。我们在 Alfred^[1] 工作的基础上, 用矢量合成法设计了三倍频分离膜, 并对设计出的几种膜系进行了实验研究, 得出比较满意的结果。

二、设计

1. 基本膜系的考虑

由薄膜光学原理可知, 对于一个多层周期膜系 $[A, B, C, D, \dots]^l$, 它的一个周期

内的薄膜特征矩阵可写为:

$$[M] = [m_A] \cdot [m_B] \cdot [m_C] \cdot [m_D] \dots \\ = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

其中 M_{11} 、 M_{12} 、 M_{21} 、 M_{22} 称为该周期的矩阵元。当 $\frac{1}{2}|M_{11} + M_{22}| > 1$ 时可以构成反射膜; 而 $\frac{1}{2}(M_{11} + M_{22}) = \cos \Delta / |t|$ (t 为该周期的透射系数的数值, Δ 为一个周期的位相厚度), $\Delta = \sum \delta_i$ (δ_i 为第 i 层膜的位相厚度, $\delta_i = 2\pi n_i d_i / \lambda$)。所以, 只要满足 $\cos \Delta / |t| > 1$ 就能构成反射膜, 而且随着周期的增加, 反射率会越来越高。只要选择适当的周期数 l , 就可获得高反射。

一般情况下 $|t| < 1$, 所以只要 $\Delta = m\pi$ (m 为正整数) 就能满足 $\cos \Delta / |t| > 1$ 的条件, 于

收稿日期: 1986年2月17日。

是该周期内的光学厚度为 $\frac{m\lambda}{2}$ 。因此当某一波长出现高反射时,则在波长为 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 、 $\lambda/4$ …… λ/m 处均可能出现高反射带。

对于本文所要求的倍频分光膜,显然只希望在 λ 处为高反射,而在 $\lambda/2$ 和 $\lambda/3$ 处为高透射。因此必须考虑一个在 $\lambda/2$ 和 $\lambda/3$ 处不满足条件 $\cos \Delta/|t| > 1$ 的基本周期,从而抑制该两波长处的反射带。简单的方法是使该两波长处的 $|t| = 1$ 。

为简单起见,考虑一个 $\lambda_0/4$ 的对称的基本周期 $[A、B、C、B、A]$,使它在 $\lambda/2$ 和 $\lambda/3$ 处同时满足零反射,因此关键是寻找此两波长同时为零反射的位相条件和折射率条件。

(1) 位相厚度的确定

根据双波长增透的原理,选择合适的光学厚度,可以同时满足在 $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} nd$ 和 $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} nd = \pi - \delta_1$ 处为零反射,可推得 $nd = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 + \lambda_2)}$ 。因此,当 $\lambda_1 = \frac{\lambda}{2}$, $\lambda_2 = \frac{\lambda}{3}$ 时, $nd = \frac{\lambda}{10}$,只要选择 $\lambda_0 = 4nd = \frac{2\lambda}{5}$ 为中心波长,就可满足在 $\frac{\lambda}{2}$ 和 $\frac{\lambda}{3}$ 同时增透的位相条件。

但对主波长 λ 而言,每层的位相厚度为:

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{10} = \frac{\pi}{5}$$

而该基本周期的总位相为:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sum nd = \frac{2\pi}{\lambda} \times 5 \times \frac{\lambda}{10} = \pi$$

正好满足在主波长处高反射的条件。

(2) 折射率的确定

在基本周期确定后,关键是寻找满足两个波长均为零反射的薄膜折射率值。

为方便起见,用矢量作图法粗略计算各折射率 n_A 、 n_B 、 n_C 之间的关系,并确定具体数值,将算出的值送入计算机算出光谱反射

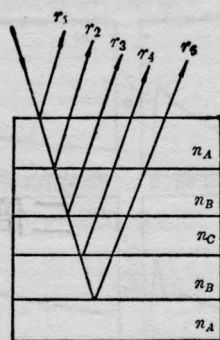


图 1

率。

考虑膜系 $[A、B、C、B、A]$ ($\lambda_0 = \frac{2\lambda}{5}$), 分别把两边的 n_A 看作为入射介质和基底(如图 1), 使该膜组的反射系数为零。

计算对波长为 $\lambda_1 = \frac{\lambda}{2}$, 第 i 层的位相厚度: $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_1} nd = \frac{2\pi}{\lambda/2} \cdot \frac{\lambda}{10} = \frac{2\pi}{5}$, 因此各反射系数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 之间的夹角分别为 $\frac{4\pi}{5}$ 。

作矢量图(如图 2), 要求 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 的合矢量为零, 即要求它们在 x 轴和 y 轴上的投影为零, 于是可以列出两个方程式, 即:

$$\begin{cases} r_1 + r_4 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + r_3 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) = r_2 \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) \\ r_2 \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) + r_4 \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) = r_3 \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \end{cases}$$

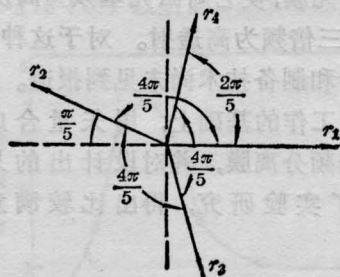


图 2

并将 $r_1 = \frac{n_A - n_B}{n_A + n_B}$, $r_2 = \frac{n_B - n_C}{n_B + n_C}$, $r_3 = \frac{n_C - n_B}{n_C + n_B} = -r_2$, $r_4 = \frac{n_B - n_A}{n_B + n_A} = -r_1$ 代入, 解得 n_A 、 n_B 、 n_C 之间的关系式为:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \cos \frac{\pi}{5}\right) n_B^2 \\ & - \left(1 - 2 \cos \frac{2\pi}{5} - \cos \frac{\pi}{5}\right) n_A n_B \\ & + \left(1 - 2 \cos \frac{2\pi}{5} - \cos \frac{\pi}{5}\right) n_B n_C \\ & - \left(1 + \cos \frac{\pi}{5}\right) n_A n_C = 0 \end{aligned}$$

当选定某两种材料, 由关系式可求出第三种材料的折射率, 因此可以得到一系列的折射率组合。例如:

- ① $n_A=1.40, n_B=1.80, n_C=2.1$
- ② $n_A=1.38, n_B=1.79, n_C=2.1$
- ③ $n_A=1.46, n_B=1.83, n_C=2.1$
- ④ $n_A=1.38, n_B=1.9, n_C=2.3$
- ⑤ $n_A=1.33, n_B=1.765, n_C=2.1$
- ⑥ $n_A=1.46, n_B=1.77, n_C=2.0$
- ⑦ $n_A=1.40, n_B=1.70, n_C=1.92$

用反射率计算程序在计算机上校验该基本周期膜组的反射率是符合要求的, 如当主波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时, 折射率组合 ① 的计算结果, 在 $0.53 \mu\text{m}$ 与 $0.353 \mu\text{m}$ 处获得了接近于零的反射, 从而证明了我们的设计方案是正确的。

要获得 λ 处的高反射率, 就得选择合适的周期数 l , 如对上述 ①、② 组合, 当 l 取为 10 时, 就可获得 $R(\lambda) > 99\%$ 的结果, 而对上述 ③ 的组合, 则需取 $l=11$ 。

在折射率、厚度和周期数确定以后, 用计算机计算多层周期与基底 ($n_s=1.52$) 组合在入射介质 $n_0=1$, 入射角为 0° 时的光谱反射率值 (采用一般的反射率矩阵计算方法, 下同), 结果在主波长处满足高反射要求, 而在其二、三倍频波长处, 由于设计是使多层周期膜堆在该两波长处透射率为 1, 所以加上基底后, 反射率 $R \approx 4\%$ 。

2. 倍频波长处反射率的修正膜系

为了获得倍频波长处增透的效果, 还需加上几层修正层。修正层的位相厚度仍考虑与主膜系的一致, 因此只要求出满足该两波

长为零反射的折射率条件。利用双波长增透的原理, 仍然只求满足一个波长的折射率条件就行。考虑较简单的 $\lambda_0/4-\lambda_0/2$ 膜系和 $\lambda_0/4-\lambda_0/4-\lambda_0/4$ 膜系 ($\lambda_0 = \frac{2\lambda}{5}$)。

(1) $\lambda_0/4-\lambda_0/2$ 膜系

考虑对 $\frac{\lambda}{2}$ 处的修正:

主膜系对 $\frac{\lambda}{2}$ 和 $\frac{\lambda}{3}$ 为虚设层, 因此可以把主膜系的多层组合看成一等效层, 其位相厚度接近于 π , 其余两层的位相厚度分别为:

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_0}{4} = \frac{2\pi}{\lambda/2} \cdot \frac{\lambda}{10} = \frac{2\pi}{5},$$

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_0}{2} = \frac{4\pi}{5}.$$

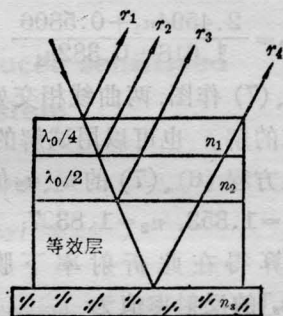


图 3

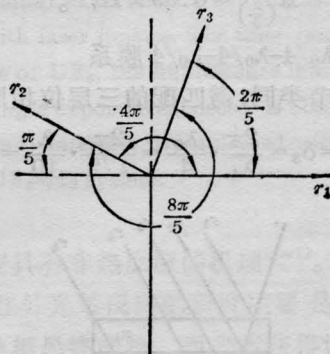


图 4

所以各界面反射矢量之间的夹角如图 4 所示, r_1 与 r_2 夹角为 $\frac{4\pi}{5}$, r_2 与 r_3 夹角为 $\frac{8\pi}{5}$ 。

与前面类同的方法, 为使 $\lambda_0/4-\lambda_0/2$ 双

层膜对某一波长增透,可用作图法,使各界面反射合矢量为零,即只要各矢量在 x 、 y 轴上的投影为零。因此可由矢量图列出如下方程组:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (1)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_s}{n_2 + n_s} \quad (3)$$

$$r_1 + r_3 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) - r_2 \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) = 0 \quad (4)$$

$$r_2 \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) + r_3 \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) = 0 \quad (5)$$

解这方程组可得到 n_1 和 n_2 之间满足如下关系:

$$n_2 = n_1^2 / n_0 \quad (6)$$

$$n_2 = \frac{2.4594n_1 + 0.5806}{1.618 + 0.382n_1} \quad (7)$$

由方程 (6)、(7) 作图,两曲线相交处的 n_1 、 n_2 即为所要求的解。也可以用试解的方法,求出同时满足方程 (6)、(7) 的 n_1 、 n_2 值,得到:

$$n_1 = 1.353, n_2 = 1.8307;$$

由计算机算得在此折射率下膜系组合 $[n_0(L2H)n_s]$ 的反射率值为

$$R_{\left(\frac{\lambda}{2}\right)} = 6.9 \times 10^{-6},$$

$$R_{\left(\frac{\lambda}{3}\right)} = 6.09 \times 10^{-6}.$$

(2) $\lambda_0/4-\lambda_0/4-\lambda_0/4$ 膜系

与上节类同,需匹配的三层位相厚度为:

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_0}{4} = \frac{2\pi}{\lambda/2} \cdot \frac{\lambda}{10} = \frac{2\pi}{5},$$

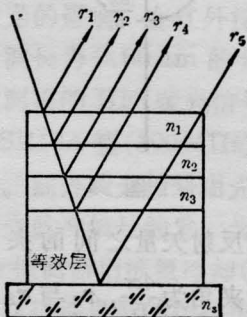


图 5

图 5 为加匹配层后的膜系组合,图中 r_1 与 r_2 、 r_2 与 r_3 、 r_3 与 r_4 的夹角均为 $\frac{4\pi}{5}$,其矢量图如图 6 所示。为使其合矢量为零,必须满足如下方程组:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \\ r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \\ r_3 = \frac{n_2 - n_s}{n_2 + n_s} \\ r_4 = \frac{n_3 - n_s}{n_3 + n_s} \\ r_2 \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) = r_1 + r_3 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + r_4 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) \\ r_2 \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) + r_4 \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) = r_3 \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \end{cases}$$

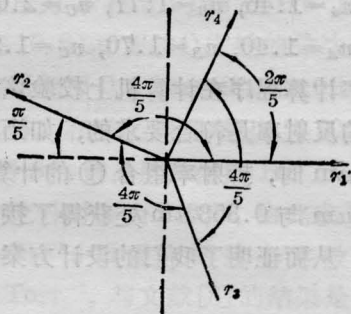


图 6

由上述方程组可以解得满足零反射的折射率 n_1 、 n_2 、 n_3 之间的关系为:

$$\begin{cases} n_3 = \frac{3.399n_1^2 + 0.3587n_1 + 1.52n_1n_2 - 1.52n_2}{n_1 - n_1^2 + 2.236n_2 + 0.233n_1n_2} \\ n_3 = \frac{0.618n_1n_2 - 1.382n_1^2n_2 + 2.618n_2^2 + 0.618n_1n_2^2}{2.618n_1^2 + 0.618n_1 - 1.382n_2 + 0.618n_1n_2} \end{cases}$$

同样可用作图法,在确定 n_1 的情况下,得到 $n_2 \sim n_3$ 的关系曲线,两方程所得两曲线之交点即为所求的折射率值(同样也可用试解法),解得结果为:

$$\textcircled{1} n_1 = 1.38, n_2 = 1.89, n_3 = 1.867; \text{ 对}$$

应的反射率为: $R_{\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \approx 8.4 \times 10^{-6}$ 和 $R_{\left(\frac{\lambda}{3}\right)}$

$\approx 9.4 \times 10^{-6}$ 。

② $n_1=1.46, n_2=2.07, n_3=1.97$; 对应的反射率值为: $R_{(\frac{\lambda}{2})}=4.3 \times 10^{-5}$ 和 $R_{(\frac{\lambda}{3})}=4.6 \times 10^{-5}$ 。

在二倍频及三倍频处均获得了很好的增透效果。

3. 总的膜系

综合 1、2 的设计, 为获得三倍频分光的总膜系应为如下两组:

(1) $L_1 2H_1 (L_2 m H_2 m L_2)^{10}$, 其中 $n(L_1)=1.353, n(H_1)=1.8307$; L_2, m, H_2 的折射率值可取设计 1 中所列七组中的任一组, 还可以是其它的组合。

(2) $L_1 H_1 m_1 (L_2 m_2 H_2 m_2 L_2)^{10}$, 其中 $n(L_1)=1.38, n(H_1)=1.89, n(m_1)=1.867$; 或 $n(L_1)=1.46, n(H_1)=2.07, n(m_1)=1.97$; 而 L_2, m_2, H_2 的折射率值也可取设计 1 中所列的七组中的任一组, 还可以取其它的组合。

计算机算得的该两种膜系的光谱透射率曲线(图 8、9)与未加修正层的曲线(图 7)相比, 在二、三倍频波长处获得了好的增透效果, 尽管在其它波长处出现了明显的反射峰,

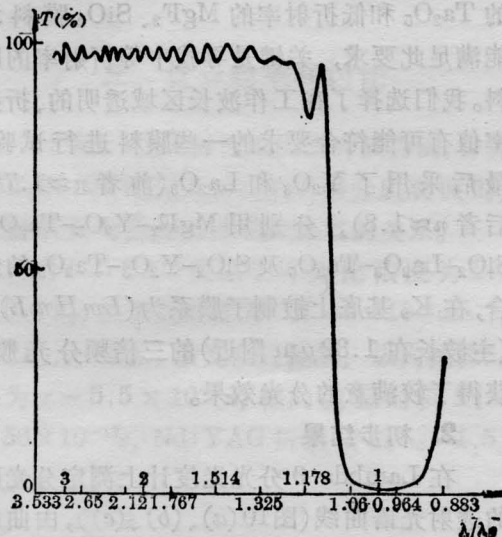


图 7 未经修正的分光膜透射率理论曲线
膜系: $n_0(LmHmL)^{10}n_s$, 其中 $n_L=1.46, n_m=1.83, n_H=2.1, n_0=1.0, n_s=1.52$ 。横坐标 λ/λ_0 中的 λ 为主波长, λ_0 为任意波长, 下同

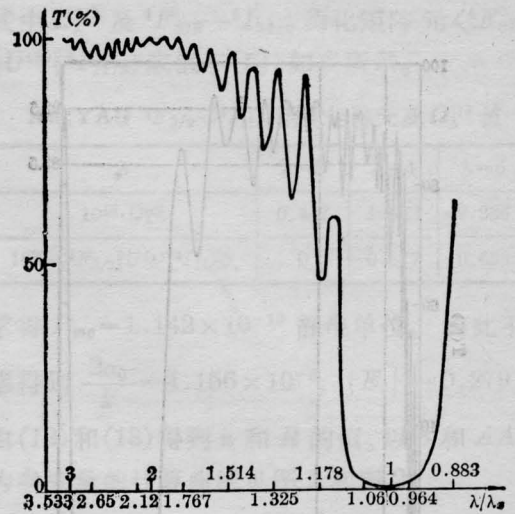


图 8 加修正层后分光膜的透射率理论曲线

膜系: $n_0 L_1 H_1 m_1 (L_2 m_2 H_2 m_2 L_2)^{10} n_s$, 其中 $n_{L_1}=1.38, n_{m_1}=1.867, n_{H_1}=1.89, n_{L_2}=1.46, n_{m_2}=1.83, n_{H_2}=2.1$

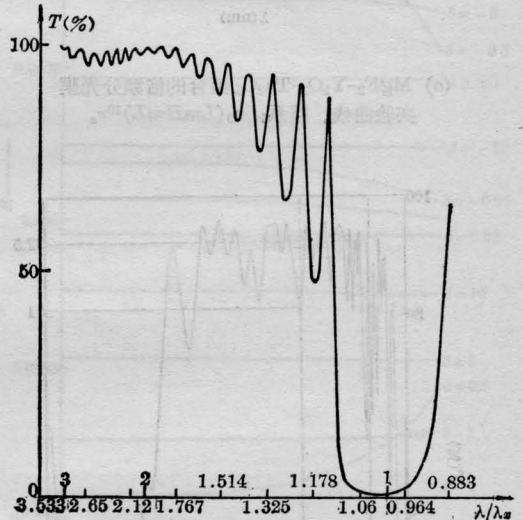


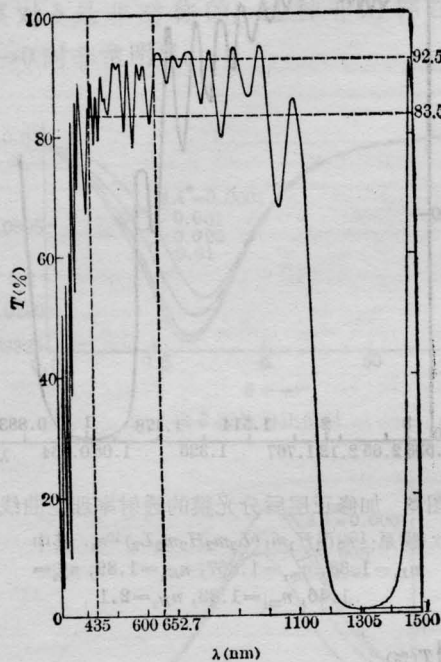
图 9 加修正层后分光膜的透射率理论曲线

膜系: $n_0 L_1 2H_1 (L_2 m_2 H_2 m_2 L_2)^{10} n_s$, 其中 $n_{L_1}=1.353, n_{H_1}=1.8307, n_{L_2}=1.46, n_{m_2}=1.83, n_{H_2}=2.1$

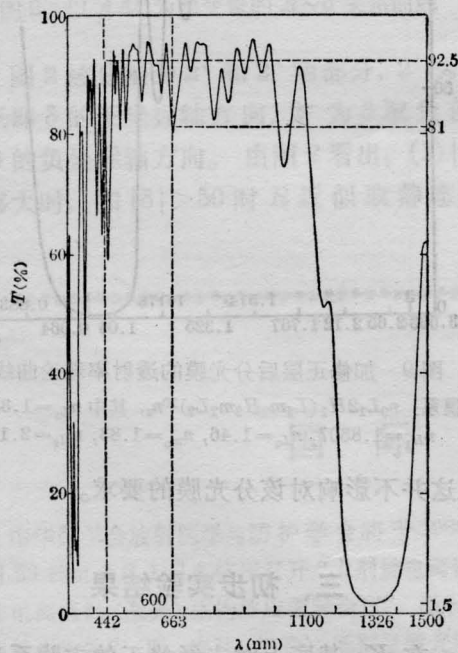
但这并不影响对该分光膜的要求。

三、初步实验结果

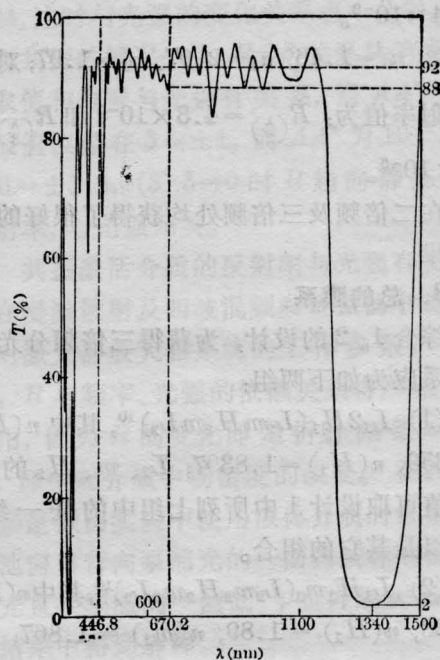
在 K_9 基底上对未经修正的主膜系进行了试验。(在一般的带电子枪的高真空镀膜机上进行)。



(a) $\text{MgF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 组合的倍频分光膜实验曲线。膜系: $n_0(LmHmL)^{10}n_s$



(b) $\text{SiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 组合的倍频分光膜实验曲线。膜系: $n_0(LmHmL)^{10}n_s$



(c) $\text{SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 组合的倍频分光膜实验曲线。膜系: $n_0(LmHmL)^{10}n_s$

图 10

1. 膜料的选择

因该分光膜工作于三个波长, 所以必须考虑在那些区域透明的膜料, 同时要求它们的折射率值符合理论设计值。作为高折射率的 Ta_2O_5 和低折射率的 MgF_2 、 SiO_2 膜料均能满足此要求, 关键是寻找中等折射率的膜料。我们选择了在工作波长区域透明的、折射率值有可能符合要求的一些膜料进行试验, 最后采用了 Y_2O_3 和 La_2O_3 (前者 $n \approx 1.78$, 后者 $n \approx 1.8$), 分别用 $\text{MgF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 及 $\text{SiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 的组合, 在 K_9 基底上镀制了膜系为 $(LmHmL)^{10}$ (主波长在 $1.32 \mu\text{m}$ 附近) 的三倍频分光膜, 获得了较满意的分光效果。

2. 初步结果

在 Lambda-9 分光光度计上测定分光膜的透射光谱曲线(图10(a)、(b)、(c)), 由曲线得出表 2 的结果。

从透射率曲线看, 基本上满足了基频高反, 二、三倍频高透的要求。但由于膜的层数

表 1 膜系修正前后的 R 值的比较

波 长	膜 系		
	$n_0(LmHmL_s)^{10}n_s$	$n_0L_1H_1m_1(L_2m_2H_2m_2L_2)^{10}n_s$	$n_0L_12H_1(L_2m_2H_2m_2L_2)^{10}n_s$
λ	99.021×10^{-2}	99.123×10^{-2}	99.224×10^{-2}
$\lambda/2$	4.26334×10^{-2}	1.42629×10^{-5}	1.12774×10^{-5}
$\lambda/3$	4.25262×10^{-2}	5.93013×10^{-4}	3.86668×10^{-6}

注：表中的三个膜系的光谱曲线分别对应于图 7、8、9。

表 2 几组膜系组合的 T(%) 值实验结果

膜 料 组 合	波 长		
	λ	$\lambda/2$	$\lambda/3$
(a) $MgF_2-Y_2O_3-Ta_2O_5$	~2	~91	~87
(a') $MgF_2-Y_2O_3-Ta_2O_5$	~2	~93	~83
(b) $SiO_2-Y_2O_3-Ta_2O_5$	~2	~80	~93
(c) $SiO_2-La_2O_3-Ta_2O_5$	~2	~82	~92

较多，控制过程中多次换控制片，致使厚度误差得不到补偿，给通带区的影响是较明显的，造成通带区不稳定，常会出现一些明显的次峰。

另外，在膜的机械性能方面，对 $MgF_2-Y_2O_3-Ta_2O_5$ 的组合，由于层数多， MgF_2 的

应力大，因此膜上往往呈现细毛状的裂纹，而采用 $SiO_2-Y_2O_3-Ta_2O_5$ 组合，此弊病得到了克服。

3. 讨论

(1) 设计是可以实现的。从实验结果看，较好地抑制了二、三级次的反射峰。

(2) 增加周期数可以提高主波长的反射率，但层数太多会带来制备上的困难。

(3) 由于厚度控制误差、折射率误差和色散等因素的影响，短波部分出现不规则的反射次峰，影响了实验结果的稳定性。

参 考 文 献

[1] Alfred Thelen; *JOSA*, 1963, **53**, No 10, 1266.

(上接第 294 页)

图 1(a) 的实验结果进行比较，将图 6 中 $x=0$ 处的相对光声信号变换为 8.4，则曲线变换为图 1 的曲线(b)，由图 1 可以看出，理论曲线与实验曲线相一致。

在分析中只考虑了一次反射是基于以下原因：声波不是理想的柱面波，由于样品很薄，更接近球面波。因此经多次反射，波的扩散很厉害，即波的振幅衰减很大。另外，实际样品表面也不是完整的圆柱表面，因此也造成柱面波向圆片样品的两个侧面传播而落不到压电陶瓷上。再加上其它的声波衰减因素，因此考虑一次反射是适宜的。

还需要指出的是，由于我们实验中所用的样品边缘并不是规则的圆柱形，另外，我们

使用 CO_2 激光作为光源，虽然经过聚焦，但光斑直径也在 1mm 左右，再加上样品表面清洁度的影响，使得实验曲线与理论曲线稍有偏差。

这一研究表明在用光声法测量材料的低光吸收系数时，必须考虑光束照射位置；当比较不同材料的光吸收系数或与已知样品的光吸收系数相比较时，都必须保证光束照射位置相同。一般情况下，应选择光束的照射位置位于样品中心，这样可以得到较大的光声信号，以提高测量精度。

参 考 文 献

[1] 王桂芬等；《激光》，1981, **8**, No. 1, 33.