

# 倍频激光薄膜——1.06 微米与 0.53 微米双波长增透膜

李庆国

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 我们用等厚度三层膜制备了双波长增透膜, 在 1.06 微米与 0.53 微米波长所达到的剩余反射率为 0.1~0.2%。

## Laser thin films for frequency doubling — two-wavelength antireflection coating at 1.06 $\mu\text{m}$ and 0.53 $\mu\text{m}$

Li Qingguo

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

**Abstract:** We prepared a two-wavelength antireflection coating with three layers of equal thickness. The residual reflectivity achieved is 0.1~0.2% at the wavelengths 1.06  $\mu\text{m}$  and 0.53  $\mu\text{m}$ .

### 引 言

倍频增透膜是指 1.06 微米和 0.53 微米双波长同时增透的薄膜, 它是一种新型激光薄膜。如果把这种薄膜镀在倍频晶体盒的窗口上, 可以减少系统的光损失, 提高倍频效率。

目前的激光增透膜主要有单层膜、“V”型膜、宽带膜等, 由于它们的增透波段狭窄, 所以均不能达到 1.06 微米与 0.53 微米同时增透的要求。

有关双波长增透膜的理论问题, 在 J. Mouchat<sup>[1]</sup> 的系列文章中已进行了详细的讨论。但是制备倍频增透膜的问题没有涉及。在文献 [2] 中作者介绍了可见波段 (0.43 和

0.66 微米) 的双波长增透膜, 然而该方法并不适合于制备倍频增透膜。

本文介绍用等厚度三层膜制备倍频增透膜的计算方法和计算公式, 根据计算结果研制了 1.06 微米与 0.53 微米双波长增透膜。

### 计 算

一组无吸收等厚度的奇(偶)数层膜系, 如果把每一层膜的相位  $\delta$  用  $\pi-\delta$  代替计算, 则该膜组的特征矩阵元  $M_{11}$  和  $M_{22}$  ( $M_{12}$  和  $M_{21}$ )<sup>[1]</sup> 的绝对值不变, 只是它们的符号同时变号。这时  $\delta$  和  $\pi-\delta$  所对应的波长给出相同的反射率, 一个波长增透, 另一个波长也增

收稿日期: 1983年2月16日。

透。

我们采用一个等厚度三层膜系制备双波长增透膜，图1表示该膜系的示意图。所谓等厚度是指每一层膜具有相同的光学厚度  $nt$ ，有相同的相位厚度  $\delta$ 。为了计算方便，制备工艺简单，常常是把等厚度膜化为某波长的四分之一波长厚的膜来处理。

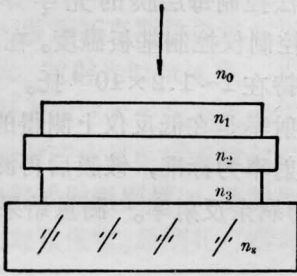


图1 双波长增透膜示意图

当光束垂直入射时，两个极值波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的相位分别为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_1} nt,$$

$$\pi - \delta = \frac{2\pi}{\lambda_2} nt.$$

把上面两式相加后得到

$$\pi = \frac{2\pi}{\lambda_1} nt + \frac{2\pi}{\lambda_2} nt. \quad (1)$$

根据零反射条件和公式(1)，我们得出  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  双波长零反射率所必须满足的条件：

$$\begin{cases} M_{11} - n_s M_{22} = 0 \\ n_s M_{12} - M_{21} = 0 \\ \frac{2\pi}{\lambda_1} nt + \frac{2\pi}{\lambda_2} nt = \pi \end{cases}$$

经过推导得到

$$\begin{cases} n_1(n_1 \tan^2 \delta - n_2)n_3^2 \\ + (n_1 + n_2)(n_s - n_1 n_2)n_3 \\ + n_2 n_s (n_1 + n_2 \tan^2 \delta) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)n_3^2 + \left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{n_1 n_s}{n_2} - \frac{1 - n_s}{\tan^2 \delta}\right)n_3 \\ - n_s(n_1 + n_2) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{2nt}. \quad (4)$$

式中： $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_s$  分别为第一层、第二层、

第三层膜及基板的折射率； $\delta$  为每层膜的相位。

用上面方程组求解  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  零反射率的条件是比较方便的。可以先给定  $n_s$ ，然后求出  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  之间的关系，从中选择适当的值，也可以采用画图法来寻找。图2表示用公式(2)~(4)计算以后由画图法寻找的结果，图中两条实线交点对应的  $n_2$ 、 $n_3$  即是满足 1.06 微米和 0.53 微米同时增透的折射率数值，在我们的工作条件下它们是： $n_0 = 1$ ， $n_1 = 1.46$ ， $n_2 = 1.675$ ， $n_3 = 1.92$ ， $n_s = 1.516(K_9)$ ， $nt = 1767 \text{ \AA}$ 。

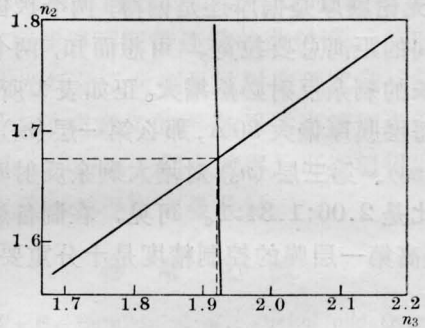


图2 1.06微米与0.53微米双波长增透膜的最佳值

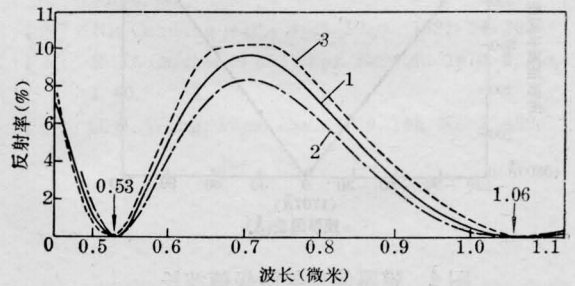


图3 1.06微米与0.53微米双波长增透膜的反射曲线

- 1— $n_s = 1.52$   $n_1 = 1.46$   $n_2 = 1.65$   $n_3 = 1.92$ ;
- 2— $n_s = 1.52$   $n_1 = 1.46$   $n_2 = 1.60$   $n_3 = 1.92$ ;
- 3— $n_s = 1.52$   $n_1 = 1.46$   $n_2 = 1.65$   $n_3 = 1.90$

我们在上述数值附近选取三组不同参数，计算了反射曲线，如图3所示。

从曲线3看出，当  $n_1 = 1.46$ ， $n_s = 1.52$  时， $n_2$ 、 $n_3$  值的变化会引起整个光谱曲线的变形，两个极值波长的位置随之而变化，从而增大

了两个特定波长(1.06微米和0.53微米)的剩余反射率。对于 $n_1$ ,我们常选用 $\text{SiO}_2$ 膜。如果 $n_1$ 变大,也会影响特定波长的剩余反射率,尤其对0.53微米波长的影响要大一些。当然,就我们真空镀膜而言,若想制备出与计算值完全相同的薄膜是不大可能的。不过我们计算表明,每层膜的折射率略有偏差也能获得较为满意的结果。

薄膜的光学厚度偏差是影响其剩余反射率的重要因素。如果膜厚与计算值有偏差,那么,光谱曲线的两个极值波长产生位移,图4表示膜厚的偏差与两极值波长间距偏差的关系。无论膜厚是偏厚还是偏薄,两个极值波长之间的距离总要拉宽。可想而知,两个特定波长的剩余反射必然增大。正如表1所示,如果每层膜厚偏大 $30 \text{ \AA}$ ,那么第一层( $n_1$ )、第二层( $n_2$ )、第三层( $n_3$ )对增大剩余反射率的贡献比是2.06:1.34:1。可见,在制备过程中,提高第一层膜的控制精度是十分重要的。

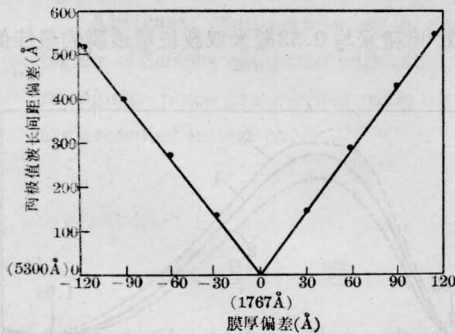


图4 膜厚偏差与两极值波长间距偏差的关系

表1 各层膜厚变化与剩余反射率的关系

变化层	剩余反射率 (%)		
	1737 Å	1767 Å	1797 Å
第一层变化	0.0154	0	0.0253
第二层变化	0.0149	0	0.0165
第三层变化	0.0059	0	0.0123

## 实验结果

整个工作是在DMD-450型镀膜机上进行的。用磁偏转电子枪蒸发高熔点氧化物: $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。 $\text{ZrO}_2$ 是压块材料, $\text{SiO}_2$ 是熔石英, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 是晶体。

用极值法控制每层膜的光学厚度。用WZK温度控制仪控制基板温度。在淀积时,真空度需保持在 $1 \sim 1.2 \times 10^{-4}$ 托。

剩余反射率是在低反仪上测得的。以镀膜玻璃的反射率为标准,镀膜后再测量其反射率,统称为剩余反射率。测量结果由表2、3列出。

表2 1.06微米与0.53微米双波长增透膜的测量结果

样品	剩余反射率 (%)		控制方法
	1.06微米	0.53微米	
12-7	0.5	0.75	透射
12-9	0.43	0.3	透射
12-16	0.2	0.08	反射
4-4-1	0.1	0.15	反射
4-5	0.1	0.15	反射

表3 样品4-5的剩余反射率

波长(微米)	0.51	0.52	0.53	0.532	0.54	1.0	1.055	1.06	1.07
R (%)	0.75	0.21	0.15	0.15	0.37	0.75	0.15	0.1	0.15

同时,我们把三块1毫米厚的 $\text{K}_9$ 玻璃板每面都镀上双波长增透膜。首先测出每一个面的剩余反射率,以此来计算三块样品(六个面)组合后的总透过率,再用 $c\phi_4$ 光谱仪测量1.06微米和0.53微米波长的透过率,两者透过率值很相近,如表4所列数据。

表 4 3 块样品组合测量结果

样 品	计算透射率(%)		测量透射率(%)	
	1.06 微米	0.53 微米	1.06 微米	0.53 微米
4-4-1/4-5	99.2	99	99.1	99

## 讨 论

从以上分析及测量结果看, 实验结果与计算结果有很好的吻合之处, 特别是两个极值波长的位置。但遗憾的是整个光谱曲线尚不能完全重合。因为, 计算是在理想状态下进行的, 往往要附加一些条件, 限定某些值, 更不能考虑到工艺上的随机误差。比如: 色散问题、薄膜非均匀性问题等都没考虑进去, 又如第二层膜的折射率比较难以达到。

光学薄膜的色散是人们熟知的。在可见波段的折射率比红外波段大, 不同材料色散情况不同, 不同的制备工艺色散的程度也有差异。因此, 要求我们注意薄膜材料的选择。ZrO<sub>2</sub> 膜的色散较少, 是一种理想的薄膜。同时, 工艺上要进行适当的修正。

氧化物薄膜的折射率非均匀性问题是比较严重的。目前对该问题的研究还不够完善, 测量方法不很健全。折射率的非均匀性跟制备工艺的关系极大, 所以, 我们尽可能控制各种条件, 保证淀积的重复性。ZrO<sub>2</sub> 膜受工艺条件的影响甚大<sup>[3]</sup>, 不仅折射率不稳定, 而且很不均匀。当基板温度大于 200°C, 为非均匀膜; 当基板温度在 120°C 左右, 为非均匀膜。因此, 在淀积时, 基板温度不宜过高。

关于薄膜的光学厚度误差的影响, 不仅在理论上而且在实验上都已得到证明。我们认为, 在目前的工艺水平, 使用反射控制为好。控制片要与样品同放一个夹具上, 这样基板温度就可以保持一致, 并且有一定的厚度补偿效果。

最后, 向帮助本工作的杨本祺、乔玉玲等同志致以感谢。

## 参 考 文 献

- [1] J. Mouchent; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 9, 2486.
- [2] K. N. Chopra *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 11, 1750.
- [3] E. Ritter; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 1, 21.

## 简 讯

### DJZ-1 型深井激光指向仪通过鉴定

由上海光学仪器修理厂和兖州煤炭基本建设公司共同研制的 DJZ-1 型深井激光指向仪已于 1983 年 6 月通过了技术鉴定, 并同意批量生产。

该仪器在井筒掘砌深度近 800 米处, 投点误差小于正负 50 毫米, 光斑呈圆形, 边缘清晰, 光斑直径不大于 60 毫米。望远镜系统能在 20~∞ 米的范围内连续调焦。配备电源额定电压有 220 伏和 127 伏两种。实践证明该仪器性能稳定, 置中精度较高, 达到了设计标准, 是适应我国深井建设的新产品。

该仪器的主要结构特点是: (1)、采用高倍率望远系统, 使激光束的光斑直径减小; (2)、光学系统

采用内调焦结构形式, 可缩短镜筒长度并进行连续调焦; (3)、在光学系统结构中设置针孔光阑, 改善光学系统的性能, 从而使光斑呈圆形、清晰; (4)、激光光源部分的套筒采用双层保温结构, 使激光管在工作过程中, 保持温度的恒定, 减少外界温度变化的影响, 并减小激光束的光束漂移; (5)、安平螺钉有粗调、微调, 保证仪器在调整过程中方便、可靠; (6)、采用高精度的轴系, 提高仪器的指向精度。

(山东兖州煤炭基本建设公司 李剑锋

1983 年 6 月 30 日收稿)