

# 红外高能激光分色镜的初步研究

高劲松

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 本文主要介绍了利用 PVD 方法研究制透可见及近红外(1.064 $\mu\text{m}$ )、反 10.6 $\mu\text{m}$  的分色镜的初步研究。采用金属-介质组合膜方案设计分色镜的膜系,对金属及介质材料进行优选,设计并采用可行的镀制工艺和镀后处理工艺。所制得的分色镜在光学性能,激光阈值,机械强度及化学稳定性等方面获得了比较理想的效果。

## 1 引言

高能 CO<sub>2</sub> 激光技术的发展,使之被广泛地应用于医学、激光加工、表面热处理等方面。并且由于 CO<sub>2</sub> 激光所固有的一些优点,它还成为激光武器系统中常用的一种激光器。在高能 CO<sub>2</sub> 激光的上述具体应用中经常需要有可见光或近红外激光进行跟踪、瞄准或测距,以提高整个光学系统的精度。又由于采用提高 CO<sub>2</sub> 激光和“跟瞄”所用可见及近红外光共用一个光学系统的设计方案具有许多优点,如减少了系统的尺寸、重量用调整的复杂性,消除了因不准直或象差等原因造成的偏差等。而采用共用光学系统的设计方案就要要有既能承受高能 CO<sub>2</sub> 激光又能将可见及近红外光同 CO<sub>2</sub> 激光高效分开的分色镜

本文利用金属-介质组合膜有透可见反红外的特点,选择适当的金属和介质材料,对膜系和镀制工艺进行设计镀制出了高反 10.6 $\mu\text{m}$  激光并可见区或可见区兼近红外有较好透射的分色镜,这种分色镜有较高的激光阈值,并且有较好的牢固性和稳定性。

## 2 膜系设计及材料选择

### 2.1 基本原理

光波作为一种电磁波,它在通过薄膜系统时同样遵守电磁场传播的一般规律:麦克斯韦方程组。且由可以得到表征每层光学薄膜的特征矩阵

$$\begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$$

其中  $\delta_j = 2\pi N_j d_j \cos \theta_j / \lambda$

$P$ -分量  $\eta_j = N_j / \cos \theta_j$       $S$ -分量  $\eta_j = N_j \cos \theta_j$

而对于多层膜可以得到膜系的特征矩阵

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{pmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{pmatrix}$$

并由此得到多层膜和基片的组合导纳为  $Y=C/B$  也可以得到反射率  $R$ , 透过率  $T$ 、位相  $\varphi$ 。

### 2.2 分色膜设计

某些金属膜层(如银、金等)具有很大的色散,即在红外具有很大的  $n$ 、 $R$  值即有很高的反射率。而在可见及近红外又有一定的势透射能力,如果匹配恰当的介质层,这部分透过即会被诱导出来。这样就可以实现透可见反红外的功能。

如图 1 所示的含金属层的膜系中势透射率的定义为  $\psi_a = T/1-R$  由此定义,势透射率也即是界面  $a$ , 和界面  $b$  的能流密度,即坡印廷矢量模之比  $\psi_a = P_a/P_b$  其中

$$P_a = C \cdot R_e(\hat{E}_a \cdot \hat{H}_a^*) / 8\pi$$

$$P_b = C \cdot R_e(\hat{E}_b \cdot \hat{H}_b^*) / 8\pi$$

式中  $R_e$  表示实部 \* 是共轭复数

又由于膜系的特征矩阵

$$\begin{pmatrix} E_a \\ H_a \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{pmatrix} \cos \delta_j & \sin \delta_j / N_j \\ i N_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_b \\ H_b \end{pmatrix}$$

$$\text{又令} \begin{pmatrix} E_a \\ H_a \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \hat{a}_1, \hat{a}_3 \\ \hat{a}_2, \hat{a}_4 \end{pmatrix}$$

其中  $\hat{a}_j = a_j + j b_j$  由导纳定义可以得到

$$\psi_a = x / [C_0 + C_1 x + C_2 z + C_3 (x^2 z^2)]$$

其中  $C_0, C_1, C_2, C_3$  是与  $a_j, b_j$  有关的膜系的光学常数。

由上式可以看出膜系的势透射率与膜的光学常数及出射导纳有关。又分别对  $x, z$ , 求导则得到势透射率的最大值

$$\psi_{\max} = \frac{1}{C_1 + 2 \sqrt{C_0 C_3} - 0.25 C_2^2}$$

及与之相匹配的出射导纳

$$x_{\max} = \sqrt{C_0 C_3 - 0.25 C_2^2} / C_3$$

$$z_{\max} = -C_2 / 2 C_3$$

由此可以看出最大势透射率仅仅决定于金属层的光学常数。

我们通过计算对几种金属的最大势透射率进行了比较,结果表明银最高,金次之铝则比之银和金相差较大,如在

$\lambda = 650\text{nm}$  处  $d = 20\text{nm}$   $\psi_{\max}(\text{Ag}) = 6.987$   $\psi_{\max}(\text{Au}) = 0.975$   $\psi_{\max}(\text{Al}) = 0.639$ , 考虑到化学稳定性及镀制工艺等问题,采用 Au 作为金属层材料。在一定厚度的 Au 层两侧加以适当的匹配层及减反层就可以得到在可见或可见及近红外有较好的透射又在红外有比较高的反射的分色膜。最后我们给出了只考虑可见透过程和同时考虑可见匹及  $1.064\mu\text{m}$  透过的两个膜系,透过率曲线如图 2

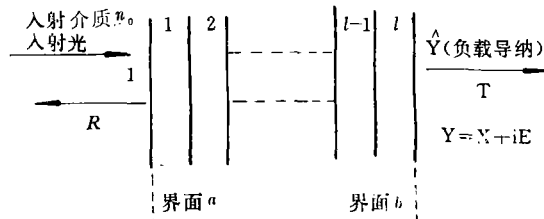


图 1

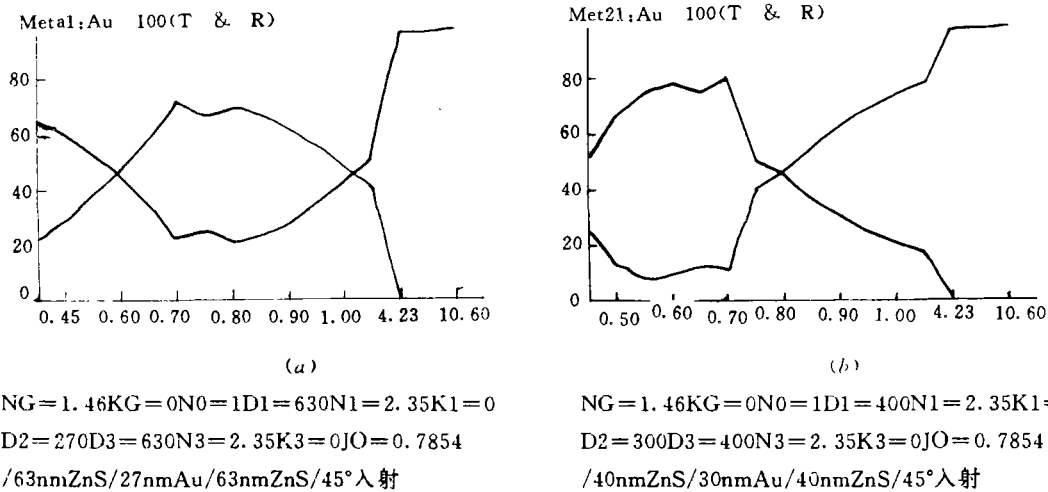


图 2

### 3 分色镜的镀制工艺及镀后处理

分色镜的光学性能,抗激光能力以机械强度及耐老化本性的好坏都与镀制工艺及处理工艺密切相关,我们所采用的镀制工艺基本上是在常规的电子束淀积工艺基础上结合每种膜料的性质采用不同的基底温度和不同的蒸发速率。在完成镀制以后接下来在真空状态下 180℃ 恒温烘烤 60 分钟,然后冷却取出后又在空气中(300~350℃ 烘烤 6~8 小时。在经过上述一系列的热处理后,还须利用低能量密度的 CO<sub>2</sub> 激光对分色镜试片进行了五次累计 5 小时的激光辐照处理,以提高膜层的抗激光能力。

### 4 分色镜光学性能及其它物理化学性能的测试

分色镜的可见及近红外透过在 UV-365 分光光度计上测温,10.6μm 反射率是在长春光机所自制的 10.6μm 高反射仪上测得该高反射仪是利用八次反射的绝对测量的原理,直接用 CO<sub>2</sub> 激光器作光源,反射测量精度为 0.5%。

测量结果表明,在保证 10.6μm 有大于 97% 反射率的前提下可见及近红外尚有较好的透过,图 3 是透过中心波长在 850.0μm 处的分色镜在可见及近红外的透过曲线,它在 10.6μm 处反射率为 97.3%。

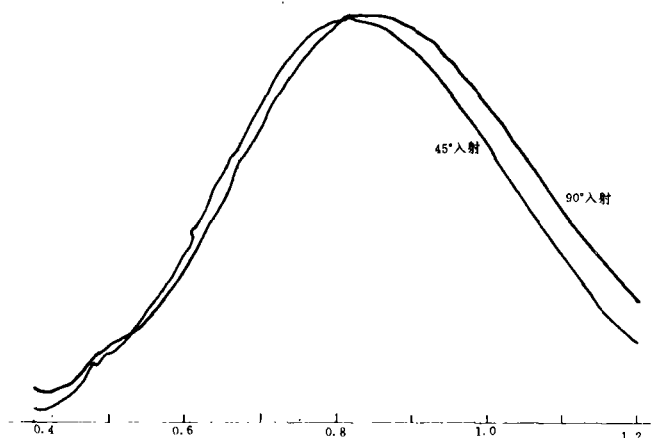


图 3

为了进一步对分色镜的稳定性进行测试,我们作了加速老化实验,即把分色镜试片放入 $40^{\circ}\text{C}$ ,相对温度为70%的恒温箱内,24小时膜层无明显变化。

分色镜试片在空气中放置3个月,外观及光谱特性无明显变化。

用SMG-1型膜层强度实验机对上述分色膜与常规工艺镀制的分色膜进行强度比较,经正压力200g 转速500rpm进行测试。常规膜在20转后,表面即出事划痕,50转以后就有部分膜层脱落露出玻璃基底了。而本文所述分色膜在500转后,肉眼看不出明显变化。

## 5 分色镜的 $\text{CO}_2$ 激光损伤实验及讨论

我们利用本定量的方法,用功率为100W的连续 $\text{CO}_2$ 聚焦的方法对分色膜进行损伤实验,结果表明本文所述之分色镜可以抗住高于 $2000\sim 5000\text{W}/\text{cm}^2$ 的 $\text{CO}_2$ 激光,较常规工艺所制得的分色镜提高1000W左右。

$\text{CO}_2$ 激光对于分色镜的损伤主要表现为两个方面,一是薄膜的损伤,它表现为烧蚀或脱落。二是由于基底导热性能不好如K<sub>9</sub>或窗玻璃则表现为薄膜尚未毁坏,而基底却炸裂。

$\text{CO}_2$ 激光对薄膜的损伤一般从以下几方面考虑,薄膜损伤首先与激光输出特性有关。对脉冲的 $\text{CO}_2$ 激光:(1)对于小于(100~200)ns的短脉冲,损伤主要是由于电子雪崩引起对于大于200ns的长脉冲,损伤则主要是薄膜的吸收和热效应。(2)脉宽增加阈值提高。(3)粗糙度越大,阈值越低。(4)由于薄膜存在缺陷(如夹杂物、针孔等),因此损伤阈值与激光光斑大小有关。

由此可见,无论是脉冲或是连续激光,薄膜的吸收都成为它被破坏主要因素之一。真空加热蒸发的薄膜由于成膜条件关系,一般为柱状结构,柱状体之间为许多大小不等的空隙,这种结构与块状的紧密结构绝然不同,使得薄膜的性质(如光学,机械以及抗激光的性质)均不如同种块状材料。许多资料表明,薄膜的吸收除少数较低以外一般比同种块状材料高三个数量级以上。薄膜虽薄,但由于吸收大,热导率低,在高功率激光作用下所吸收的功率及至温升是惊人的。

我们所采取的工艺及处理办法目的就在于增进薄膜的聚集密度。降低吸收,提高激光阈值。实验证明我们所采用上述工艺手段的确有效的提高了分色镜的光谱特性,改善了机械强度和化学稳定性,增强了抗激光能力。

## **The Preliminary Study on High Power CO<sub>2</sub> Laser Split-Color Element**

Gao Jinsong

*(Chengchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 13002)*

### **Abstract**

The Paper describes the primary research about the visible light-transmitted and 10.6μm-reflectd split-color element by PVD method. The technique of the metal-media optical coating is used, what is more, the techniques of the advanced coating and depositing after coating are applied, the split-color element was made and produced a satisfactory result, in the respects of the optical character, the mechanical intensity, the energy density at threshold and stability.