

激光圆偏振镜相移参数的测量

周凤晴 李晓平 陈清明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: CO₂ 激光圆偏振镜是 CO₂ 激光器在工业加工中的重要光学元件, 本文描述一种测量这种光学元件相位特性的方法, 并对其测量误差进行了分析。

关键词: 圆偏振镜 相位延迟 CO₂ 激光 反射镜

Phase retardation measurement of CO₂ laser circular polarizer

Zhou Fengqing, Li Xiaoping, Chen Qingming

(National Lab. of Laser Technology, HUST)

Abstract: Circular polarizer for CO₂ laser is an important optical component for laser industrial processing. In this paper, a measuring method the phase retardation of this component was described. The measurement errors were also analyzed.

Key words: circular polarizer phase retardation CO₂ laser reflector

一、引言

CO₂ 激光器在工业中的应用已相当多, 研究表明, 圆偏振的激光束是激光加工、特别是

激光切割加工的最佳光束。因此人们研制了激光圆偏振镜, 将线偏振的激光束变换成圆偏振的激光束以提高加工质量^[1,2,3]。

激光圆偏振镜的两个主要参数是它的反射率和相位延迟差 (phase retardation, 简称相移差)。理想的激光圆偏振镜应该有 $R = \frac{1}{2}(R_s + R_p) = 1$, $\Delta\Psi = \Psi_p - \Psi_s = \pm$

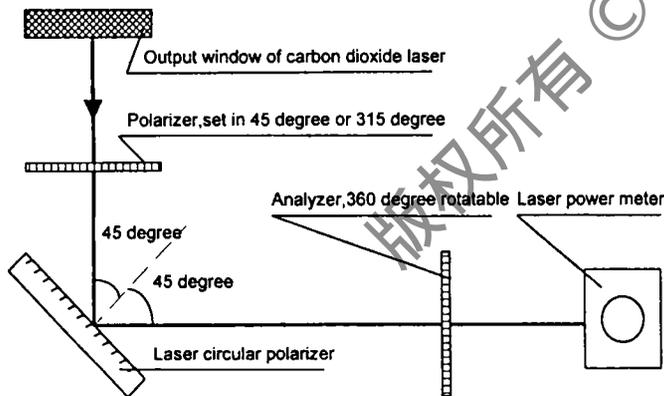


Fig. 1 Phase retardation measurement setup

90°, 其中 R_s , R_p , Ψ_s , Ψ_p 分别是 S 波、P 波的反射率和相位延迟。但实际的薄膜器件与理想

状态总有一些距离,因此测量评价工作很重要。因反射率可以作分光光度计常规测量,这里主要讨论 $\Delta\Psi$ 的测量。对于可见光范围的相移差测量,可以用椭圆偏振测量仪很方便地进行,但是在 $10.6\mu\text{m}$ 波段,一般实验室都没有这种设备。因此我们建立了一套测量光路,如图1,以进行 $\Delta\Psi$ 的间接测量。

二、公式推导、误差分析和测量结果

为了后面叙述方便,先将一些约定在这里给出。在图2中,一束斜入射光的电场矢量分解成 S 分量(垂直纸面向外)和 P 分量(平行于纸面)。反射后的电场矢量方向如图2^[4]。图2

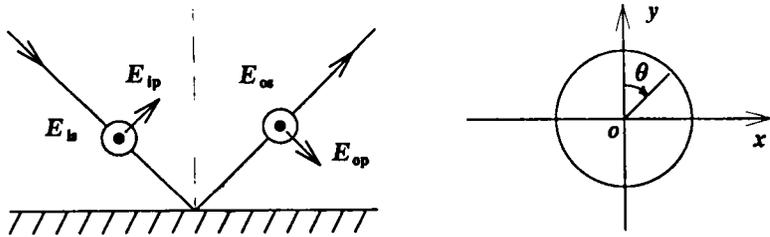


Fig. 2 The definition of the electric field direction and polarizer/analyzer reading

中右边坐标系为起偏器、检偏器的起偏及检偏角度读数方向,为顺时针方向(观察者面对光线出射方向)。图中坐标系为面对光线出射方向观察, x 轴平行入射平面, y 轴垂直入射平面。按上述约定,当起偏器设定为 315° 时,入射光电场矢量和入射光强分别是:

$$\vec{E}_i = E_0 \cdot \cos(\omega t) \hat{e}_{315^\circ} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos(\omega t) (-\hat{e}_x + \hat{e}_y)$$

$$I_0 = (\epsilon_0 \vec{E}_i^2 c) = \epsilon_0 c (\vec{E}_i^2) = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2$$

因考虑所有量的空间依赖关系相同,故略去空间坐标。 \hat{e}_i 为单位矢量。设 S 波、P 波反射系数分别为 $\hat{r}_s = r_s e^{i\Psi_s}$, $\hat{r}_p = r_p e^{i\Psi_p}$ 。则经过圆偏振镜反射后,出射光电场分量是:

$$\vec{E}_{0p} = r_p \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos(\omega t + \Psi_p) \hat{e}_x$$

$$\vec{E}_{0s} = r_s \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos(\omega t + \Psi_s) \hat{e}_y$$

当检偏器设定在 θ 角度时,到达功率计的激光束电场矢量是:

$$\vec{E}_\theta = E_\theta \hat{e}_\theta \quad \text{令} \quad \sqrt{2} E_0 / 2 = \bar{E}_0$$

则有:

$$E_\theta = r_p \bar{E}_0 \cos(\omega t + \Psi_p) \sin\theta + r_s \bar{E}_0 \cos(\omega t + \Psi_s) \cos\theta$$

$$E_0^2 = (\bar{E}_0)^2 \cdot [r_p^2 \cos^2(\omega t + \Psi_p) \sin^2\theta + r_s^2 \cos^2(\omega t + \Psi_s) \cos^2\theta + 2r_p r_s \cos(\omega t + \Psi_p) \cos(\omega t + \Psi_s) \sin\theta \cos\theta]$$

因测量对光频来说是平均效应,所以对式求时间平均:

$$\langle E_0^2 \rangle = \frac{1}{4} E_0^2 [r_p^2 \sin^2\theta + r_s^2 \cos^2\theta + r_s r_p \sin(2\theta) \cos(\Delta\Psi)]$$

因光强 $I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle$, 所以从上式可以推导出:

$$I_{\theta} = \frac{1}{2} I_0 [r_p^2 \sin^2 \theta + r_s^2 \cos^2 \theta + r_p r_s \sin(2\theta) \cos(\Delta\Psi)] \quad (1)$$

由上式可知光强的两个极值点为:

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{2r_p r_s \cos \Delta\Psi}{r_s^2 - r_p^2} \right) \right]$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \left[\pi + \arctan \left(\frac{2r_p r_s \cos \Delta\Psi}{r_s^2 - r_p^2} \right) \right] = \frac{1}{2} [\pi + 2\theta_1]$$

因此只要测量出了 I_{\max} , I_{\min} 以及 $r_p^2 = R_p$, $r_s^2 = R_s$ 就可以求出 $\cos(\Delta\Psi)$ 及 $\Delta\Psi$ 。但是解这个方程比较麻烦, 不过作一些近似处理后, 将能说明一些问题。假定 $R_p \approx R_s \approx 1$ 则上面的公式(1)简化成:

$$I_{\theta} = \frac{1}{2} I_0 [1 + \sin(2\theta) \cos(\Delta\Psi)]$$

假定 $\cos(\Delta\Psi) \geq 0$, (若 $\cos(\Delta\Psi) \leq 0$, 则 I_{\max} 与 I_{\min} 的角度互换) 则:

$$I_{\max}/I_{\min} = [1 + \cos(\Delta\Psi)]/[1 - \cos(\Delta\Psi)]$$

解得: $\Delta\Psi = \arccos[(I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})]$ (2)

所以只要测量出 I_{\max} , I_{\min} 就可以求出 $\Delta\Psi$ 。

现在研究一下取近似 $R_p \approx R_s \approx 1$ 对结果的影响。假定 $\Delta\Psi = \pi/2$, $R_p \neq R_s$, 从公式(1)可知(假定 $r_s^2 \geq r_p^2$):

$$I_{\max} = r_s^2 = R_s; \quad I_{\min} = r_p^2 = R_p$$

从公式(2)求 $(\Delta\Psi)'$, 则

$$(\Delta\Psi)' = \arccos[(r_s^2 - r_p^2)/(r_s^2 + r_p^2)] = \arccos[(R_s - R_p)/(R_s + R_p)]$$

举例说明如下, 若圆偏振镜的反射率为 $R = (R_s + R_p)/2 = 98\%$ 则 R_s, R_p 差别最大的一组值为 $R_s = 100\%$, $R_p = 96\%$, 这时

$$(\Delta\Psi) = \arccos\left(\frac{1 - 0.96}{1 + 0.96}\right) = 88.83^\circ$$

其绝对误差为 -1.17° , 相对误差为 1.3% 。下面对其它误差进行分析。

1. 起偏器设置误差

我们使用的起偏器的消光比为 1670 比 1, 所以可以忽略起偏不完全造成的误差。但是鼓轮读数最小分度为 1° , 所以可以认为起偏角设置误差应小于 0.5° 。这种角度误差和 $R_s \neq R_p$ 引起的误差是等效的。可以用下面的公式来考虑。

$$\text{角度 } 315.0 + 0.5^\circ \text{ 相当于 } R_s/R_p = 1.0355$$

$$\text{角度 } 315.0 - 0.5^\circ \text{ 相当于 } R_s/R_p = 0.9657$$

上面两种情形, 造成 $\Delta\Psi$ 的误差约为 $\pm 1.0^\circ$ 。

2. 入射角误差

若入射角不等 45° , 则将使膜层厚度偏离其设计厚度(优化厚度), 因膜层光学厚度为 $n_j d_j \cos \theta_j$, $n_j \sin \theta_j = n_0 \sin \theta_0$ 。但是它对 $\Delta\Psi$ 的误差影响由具体膜系的厚度容许误差决定。若 $n_h = 2.4$, $n_l = 1.3$, $\theta_0 = 46^\circ$, 则对低折射率材料相当于厚度减小 0.75% , 对高折射率材料相当于厚度减小 0.19% 。

3. I_{\max}, I_{\min} 的测量误差

由(2)式可以推导出: $|\delta(\Delta\Psi)| \leq \frac{\sqrt{I_{max} \cdot I_{min}}}{I_{max} + I_{min}} \left(\left| \frac{\delta I_{max}}{I_{max}} \right| + \left| \frac{\delta I_{min}}{I_{min}} \right| \right)$

测量中的典型数据为 $I_{max} \approx I_{min} \approx 5.0W$, $\left| \frac{\delta I_{max}}{I_{max}} \right| \approx \left| \frac{\delta I_{min}}{I_{min}} \right| \approx 0.02$ 。计算出 $|\delta(\Delta\Psi)| \leq 0.02rad \approx 1.15^\circ$ 。综上所述,在极端情况下,测量误差的上限为 $lim |\delta(\Delta\Psi)| \leq 3.3^\circ$,一般测量误差在 2° 左右。从上述分析中还可以发现,误差的影响除第3项外一般是使 $|\Delta\Psi|$ 的测量结果偏离 90° ,使测量结果变差。故实际的圆偏振镜的性能可能优于测量结果。下表是一组实测结果。

Table The measured results of the phase retardation of a laser circular polarizer

| | analyzer reading (degree) | average power (W) | phase retardation $\Delta\Psi$ (degree) |
|----------------------|------------------------------|----------------------|--|
| minimum power | 140 | 4.40 | 84.7 |
| maximum power | 48 | 5.30 | |
| minimum power | 130 | 4.50 | 85.9 |
| maximum power | 42 | 5.20 | |
| minimum power | 128 | 4.30 | 83.5 |
| maximum power | 40 | 5.40 | |
| minimum power | 138 | 3.90 | 84.1 |
| maximum power | 47 | 4.80 | |
| minimum power | 141 | 4.38 | 83.5 |
| maximum power | 48 | 5.50 | |
| minimum power | 130 | 4.52 | 85.4 |
| maximum power | 43 | 5.30 | |
| average $\Delta\Psi$ | | | 84.5 ± 1.0 |

上述结果说明我们设计的测量方法具有一定的精度且简单实用,对评价 CO_2 激光圆偏振镜的相移特性具有很好的效果。

参 考 文 献

- 1 Sasnett M W. American Patent, Pat. No. 4336439(1982)
- 2 Southwell W H. Appl Opt, 1980; 19: 2688
- 3 Apfel J H. Appl Opt, 1981; 20: 1024
- 4 唐晋发,郑 权.应用薄膜光学.上海:上海科学技术出版社,1984

作者简介:周风晴,男,1962年10月出生。1984年中国科技大学毕业,1987年在武汉物理所获硕士学位。现在华中理工大学从事激光与薄膜技术工作。

收稿日期:1994-09-24

请向邮局订阅 1996 年度《激光技术》

国内刊号:CN51-1125/TN,邮发代号:62-74