

5 kW 横流 CO₂ 激光器输出偏振特性研究*

雒江涛 程兆谷 杨宝春 陈刚 王润文 许世忠
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 对采用Π型折叠光腔的工业用5 kW横流CO₂激光器的输出偏振特性作了实验研究和理论分析, 结果表明: 其输出为垂直于光腔平面(Π型光腔内光线构成的平面)的100%的线偏振光。
关键词 复数折射率, Π型光腔及其光腔平面。

1 引 言

工业用CO₂激光器输出的偏振特性在激光加工中起着非常重要的作用。例如, 在激光切割中, 除了要求基模输出外, 沿着线偏振光的偏振方向作直线切割, 切口最窄, 切割速度最快, 而且切口附近热硬化的范围最小^[1]; 而切割复杂几何形状时, 则以圆偏振最佳。在激光焊接、打孔等加工过程中, 由于锥形孔的出现, 使得激光束以较大入射角入射, 这样, 入射光的偏振状态将直接影响到加工的效率^[2, 3]。

无论是CO₂激光器的输出光的偏振特性, 还是激光和工件的耦合, 都涉及到偏振光在金属表面的反射问题。本文以经典电子论为基础, 主要依据菲涅尔公式, 给出了不同偏振光在金属表面反射率的解析表达式, 以及在激光工业加工中最重要的高功率CO₂激光器常用的反射镜材料金、铜、铝在10.6 μm波长下对不同偏振光的反射率的计算结果; 并以此为依据, 对工业用5 kW激光器输出的偏振特性进行了分析和研究, 结果表明: 采用Π型折叠光腔的5 kW横流CO₂激光器的输出为垂直于光腔平面的100%线偏振光。

2 两种正交偏振态在金属表面的反射率

同非金属材料相比, 金属表面的反射表现出不同的特点(尤其是在红外波段), 主要表现在金属表面高反射和强吸收的结合^[4]。经典电子论的处理方法是将金属的介电常数用复介电常数 ϵ' 代替:

$$\epsilon' = \epsilon + i\sigma/\omega \quad (1)$$

式中 ϵ 为金属的普通介电常数, σ 和 ω 分别为金属的电导率和入射光波的角频率。相应地, 折射率也用复数折射率 $n' = n + i\kappa$ 。这里, n 、 κ 为实数, 分别与光的折射和衰减有关。由折射率和介电常数的关系 $n' = c(\mu\epsilon')^{1/2}$ 可得

* 福特-中国研究与发展基金资助项目 No. 09415518。

收稿日期: 1994年11月15日; 收到修改稿日期: 1994年12月22日

$$n = c\{\mu[(\epsilon^2 + \sigma^2/\omega^2)^{1/2} + \epsilon]/2\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\kappa = c\{\mu[(\epsilon^2 + \sigma^2/\omega^2)^{1/2} - \epsilon]/2\}^{1/2} \quad (3)$$

式中 μ 为金属的磁导率, 一般近似为真空磁导率 μ_0 , c 为真空中的光速。对一般金属良导体, 当波长 $\lambda > 1.2 \mu\text{m}$ 时, $\epsilon \ll \sigma/\omega$, (2)式可简化为^[4]:

$$n \sim \kappa = c(\mu\sigma/2\omega)^{1/2} \approx c(\mu_0\sigma/2\omega)^{1/2} \quad (4)$$

设角频率为 ω 的电磁波从空气中入射到金属表面, θ_i 、 θ_t 为入射角和折射角, 由折射定律 $n' \sin \theta_t = \sin \theta_i$ 可知 $\sin \theta_t$ 和 $\cos \theta_t$ 均为复数。设 $\sin \theta_t = a + ib$, $\cos \theta_t = f + id$ 。

其中 a 、 b 、 f 、 d 为实数, i 为虚数单位。由上述关系可得

$$\left. \begin{aligned} a &= n \sin \theta_i / (n^2 + \kappa^2), & b &= -\kappa \sin \theta_i / (n^2 + \kappa^2), \\ f &= \{[(M^2 + N^2)^{1/2} + M]/2\}^{1/2}, & d &= \{[(M^2 + N^2)^{1/2} - M]/2\}^{1/2} \\ M(\theta_i) &= 1 + b^2 - a^2, & N(\theta_i) &= -2ab \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设金属对 s 和 p 偏振光的反射率为 R_s 和 R_p , 由菲涅耳公式:

$$\begin{aligned} R_s &= |r_s|^2 = |\sin(\theta_i - \theta_t)/\sin(\theta_i + \theta_t)|^2, \\ R_p &= |r_p|^2 = |\tan(\theta_i - \theta_t)/\tan(\theta_i + \theta_t)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

r_s 、 r_p 为复振幅反射系数。可得到

$$R_s = (A - B)/(A + B), \quad R_p = (C - D)/(C + D) \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A &= \cos^2 \theta_i + (n^2 + \kappa^2)(f^2 + d^2), & B &= 2 \cos \theta_i (nf - \kappa d), \\ C &= (n^2 + \kappa^2) \cos^2 \theta_i + (f^2 + d^2), & D &= 2(nf + \kappa d) \cos \theta_i, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

至此, 只要知道金属的电导率, 就可以计算出在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长下, 不同偏振光在任意入射角下的反射率。图 1(a) 给出了计算所得的 s 、 p 偏振在金表面的反射率 R_s 和 R_p 随入射角的变化曲线。为了更清楚地看出 45° 附近 R_s 和 R_p 的差别, 图 1(b) 给出了 45° 附近的局部放大图。表 1 给出了 CO_2 激光系统常用的反射镜材料金、铜、铝在垂直入射和 45° 入射时 R_s 和 R_p 的计算结果。

值得一提的是, 这种描述仍然是比较粗略的, 更精确的描述需要用到量子理论。但它已基本反映了偏振光在金属表面反射的规律。对于长波长, 尤其是对所用的 $10.6 \mu\text{m}$, 计算所得结果与实验还是比较接近的。

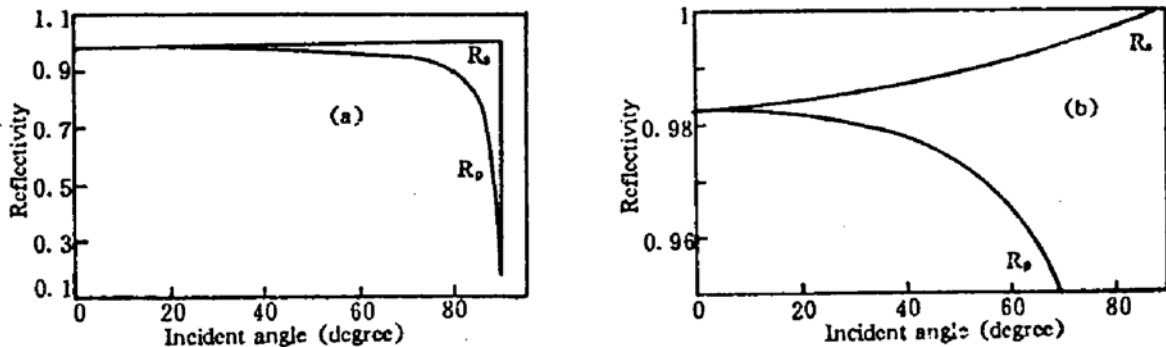


Fig. 1 Calculated angular dependence of reflectivity for different polarization with $10.6 \mu\text{m}$ radiation incident on gold surface ($\sigma = 4.13 \times 10^7/\Omega \cdot \text{m}$, $n \sim \kappa = 114.6$, at 20°C)

(a) general, (b) amplification

Table 1. Reflectivity (calculated) of different material of mirror

wavelengths (μm)	10.6	10.6	10.6
angle of incidence	0°	45°	45°
polarization	r	s	p
material of mirror			
gold	0.983	0.988	0.976
copper	0.985	0.989	0.979
aluminum	0.981	0.987	0.974

3 5 kW 横流 CO₂ 激光器输出的偏振特性

前面的计算表明,金属表面对不同偏振光的反射具有不同的规律。如图 1 所示,随着入射角的增大, R_r 一直缓慢增大,在 90° 时达 100%; R_s 一开始缓慢减小,在接近 90° 入射时, R_s 达到极小值,然后又急剧增大,在 90° 时达 100%。这个差别不仅可以用在激光加工方面(例如,采用 p-偏振光大入射角来增加吸收率),而且可以用来限定激光器输出的偏振状态。例如可以在谐振腔内放置 45° 反射镜,来获得 s-偏振的激光输出^[5]。虽然在 45° 入射时, R_r 仅比 R_s 大 1% 左右,但经过腔内的多次振荡,p-偏振的模式将逐渐被淘汰,最后形成 s-偏振的稳定激光输出。

本文实验所用的激光器为 5 kW 横流 CO₂ 激光器^[6]。它具有双放电通道,两台两级 8000 rpm 的高速风机并联运转,放电区的气体流速为 80 m/s,光腔采用 Π 型折叠光腔,如图 2 所示。总腔长 3.2 m。两个 45° 反射镜和球面反射镜为铜基底镀金膜反射镜,球面反射镜曲率半径为 8 m。输出耦合窗口为国产镀膜 GaAs 或进口 ZnSe 腔片,透过率为 40%。

该激光器的输出功率具有非常高的稳定性,在 5 kW 多模和 3 kW 低阶模长达 10 小时的连续运转中,功率不稳定性仅为 1.0%,而且低阶模和多模输出花样长时间保持不变。

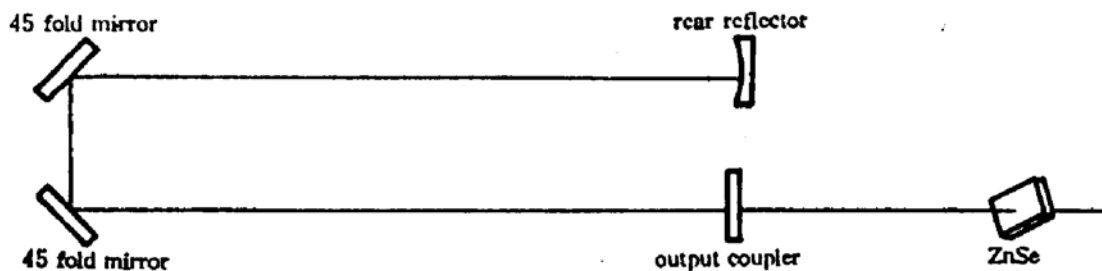


Fig. 2 The Π -shaped folding cavity of the industrial 5 kW transverse-flow CO₂ laser and the polarimetry

为检验其输出的偏振特性,可以使光束以布儒斯特角(67.4°)入射到 ZnSe 晶体上,绕光束旋转 ZnSe 晶体,使入射面垂直于光腔平面,改变激光器的输出功率从 200 W~5000 W,均测不到反射光,晶体透过率基本上为 100%;当保持入射角不变,旋转晶体,使入射面平行于光腔平面时,测到 60%左右的反射光。根据线偏振光在布儒斯特角入射时的反射特性,可以得出结论:采用 Π 型折叠光腔的 CO₂ 激光器输出为垂直于光腔平面的 100% 的线偏振光。

结 论 本文给出了一种计算不同偏振光在金属表面反射率的近似方法;并从偏振光在金属表面的反射入手,对采用 Π 型折叠光腔的 5 kW 横流 CO₂ 激光器输出的偏振特性作了探讨,

实验结果表明,其输出为垂直于光腔平面的线偏振光。这对该激光器在工业加工中发挥更大的作用将产生重要的影响。

参 考 文 献

- [1] M. Geiger, H. W. Bergamann, R. Nuss, Laser cutting of steel sheets. *Proc. SPIE*, 1988, 1022 : 20~33
- [2] Se Yoon Bang, Michael F. Modest, Evaporative scribing with a moving CW laser-effect of multiple reflections and beam polarization. *ICALEO*, 1991, 288~304
- [3] K. Shibata, H. Sakamoto, H. Matsugama, Absorption of polarized beam during laser hardening. *ICALEO*, 1991, 409~413
- [4] Max Born, Emil Wolf, *Principles of Optics*. 2nd edition, Oxford London, Pergamon Press, 1964, 611~624
- [5] Gary L. Herrit, David J. Scatena, Choose the right mirror for industrial CO₂ lasers. *Laser Focus World*. 1991, July, 107
- [6] 程兆谷,王润文,查鸿逵等,长寿命密封运转工业用 5 kW 横流 CO₂ 激光器.中国激光,(激光器件专集), 1990 : 19~23

Output Polarization Properties of a 5 kW Transverse-Flow CO₂ Laser

Luo Jiangtao Cheng Zhaogu Yang Baochun Chen Gang
Wang Runwen Xu Shizhong

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 15 November 1994; revised 22 December 1994)

Abstract The output polarization characteristics of an 5 kW industrial CO₂ laser with a Π shaped folding cavity is studied theoretically and experimentally. The result of 100% linear polarization output perpendicular to the plane of the Π shaped cavity is obtained.

Key words complex index of refraction, Π shaped folding cavity.