

高功率中空气体激光器的近场特性研究

徐勇根,王时建,吉驭嫔,向阳,尹蕾,梁龙军,龚超
(西华大学物理与化学学院,四川成都610039)

摘要:对高功率中空二氧化碳(或一氧化碳)激光器的输出特性进行了分析,详尽研究了中空激光束的传输特性及其光强分布,给出了近场光束的解析表达式。结果表明,输出光束在中心有一片光强为零的暗区,因此,中空光束可以用于平板照相、材料处理、光钳、光学扳手以及激光打孔等。

关键词:中空二氧化碳(或一氧化碳)激光器;近场特性;激光加工

中图分类号:TN248.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.010

Research on near field property of high-power hollow gas laser

XU Yong-gen, WANG Shi-jian, JI Yu-pin, XIANG Yang, YIN Lei, LIANG Long-jun, GONG Chao
(School of Physics and Chemistry, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The output properties of high-power hollow CO₂ (or CO) laser are analyzed in this paper. The propagation characteristics and light intensity distribution of the hollow laser beam are studied in detail. The analytical expression of the beam in the near field is given out. The results indicate that the output beam has a dark area in the center. The hollow laser beam can be applied to the plate photography, material processing, optical tweezers, optical spanner, laser drilling and so on.

Key words: hollow CO₂ (or CO) laser; near field property; laser processing

1 引言

高功率二氧化碳(或一氧化碳)激光器是激光加工的主要器件之一,为了满足加工需要,对激光的性能诸如功率、效率、光束质量提出了更高的要求。板条型二氧化碳激光器^[1],辐射阵列型二氧化碳激光器^[2],轴对称折叠组合型二氧化碳激光器^[3]等,这些激光器由于增益体积大,能输出高功率激光。扩散冷却环形高功率二氧化碳激光器由于放电面积大能获得高功率激光^[4-8]。这种激光器谐振腔结构简单,能够获得高功率、高光束质量的激光束,并且提取效率较高。基于这些思想,本文研究的高功率气体激光器采用圆筒放电,谐振腔全反射镜为复曲面镜,增益区域为中空圆筒,大大增加了激活区域体积,因此,能输出高功率激光。早在1988年,Youichi Takada等人对环形腔的本征模进行了推导^[9],给出了环形稳定腔的本征模式。最近,相关文献报道了

此类环形激光器的腔参数、激光束在腔内的特性、束腰尺寸和位置^[10],其研究结果对激光器的设计 and 应用提供了参考。在激光加工领域,输出光束的近场特性及其传输变换^[11-12]值得我们关注。本文基于Collins公式并利用贝塞尔函数的特性和递推公式,得到了中空环形光束的近场解析表达式,本文主要针对这一问题进行讨论。

2 高功率中空气体激光器

图1是一个圆筒放电高功率中空气体激光器, M_1 是全反射复曲面镜, M_2 是全反射球面镜; M_3 是凹面全反射镜,其曲率半径分别为 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ; O_2, O_3 是相应腔镜的曲率中心,且位于 z 轴上; M_4 是平面

作者简介:徐勇根(1983-),男,博士,讲师,主要从事激光器器件和技术,高功率气体激光和光电子技术方面的研究。E-mail: xuyonggen06@126.com

收稿日期:2012-03-28;修订日期:2012-04-21

输出镜,位于球面镜 M_2 的中央空心处; M_5 是轴上全反射镜,半径为 r_0 。放电区采用中空圆筒放电。因此,该激光器能输出中空环形光束,其光路如图 1 所示。以平面输出镜 M_4 为参考面,基模高斯光束的场分布^[9]可表示为:

$$\varepsilon_{00}(r, z) = \varepsilon_0 \frac{2}{(2\pi)^{1/4}} \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^{1/2} \cdot \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2}{w(z)^2} \right] \cdot \exp \left\{ i \left[-kz - \frac{k(r-r_0)^2}{2R(z)} + \frac{1}{2}\phi \right] \right\} \quad (1)$$

其中, ε_0 是任意常数; k 是波数; ϕ 是附加相位; $w(z), R(z)$ 分别是光斑半径和等相位面曲率半径^[13]。 λ 是激光波长,对于二氧化碳激光, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$; 对于一氧化碳激光, $\lambda = 5.3 \mu\text{m}$ 。根据 ABCD 定律,通过计算可知,激光束腰在输出镜处,即 $w(0) = w_0, R(0) \rightarrow \infty$ 。为了计算方便,设输出镜平面坐标为 $z=0$,并忽略公式(1)中不重要的常数,

$$\varepsilon_1(r_1, z) = \frac{ik}{2z} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot \exp \left[-ik \left(\frac{r_1^2 + 2z^2}{2z} \right) \right] \cdot \exp \left[-\frac{ikzw_0^2 r_0^2}{zw_0^2(2z + ikw_0^2)} \right] \cdot \exp \left(-\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \times \left\{ \frac{\beta}{4\alpha} J_0(\beta r_0) \left[I_{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) - I_{\frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \right] + 2r_0 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_m(\beta r_0) I_{\frac{1}{2}m} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) + r_0 J_0(\beta r_0) I_0 \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) + \frac{\beta}{2\alpha} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_m(\beta r_0) \left[I_{\frac{1}{2}m - \frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) - I_{\frac{1}{2}m + \frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

其中, $I(\cdot)$ 表示第一类变形贝塞尔函数; α, β 分别满足: $2zw_0^2\alpha = 2z + ikw_0^2, z\beta = kr_1$ 。因此,光强为 $I_1(r_1, z) = [\varepsilon_1(r_1, z)] \times [\varepsilon_1(r_1, z)]^*$ 。公式(6)是基于 Collins 公式推导出的解析表达式,是用来描述中空环形光束在自由空间传输的基本公式,根据该公式可以计算出输出光束在不同位置的光强分布,其计算结果为激光加工提供依据。

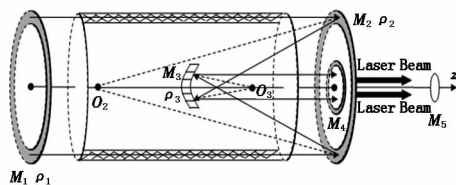


图1 圆筒放电高功率中空气体激光器

3 数值例子和结果分析

从公式(6)可以看出,输出光强与参数 λ, w_0, r_0, z 有关。图2、图3分别是一氧化碳激光和二氧化碳激光在输出镜附近的二维光强分布图。从这两幅图可以看出,对于相同的参数,一氧化碳激光由于光斑较小,曲线在中央区域趋于平坦,因此,圆环较窄;二氧化碳激光由于光斑较大,曲线在中央区域更陡峭,因此,圆环较宽。这两幅图分别和图4、图5的近场光斑图对应。图6~图9分别给出了不同参数

因此,公式(1)简化为:

$$\varepsilon(r, 0) = \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2}{w_0^2} \right] \quad (2)$$

为了计算方便,设近场传输矩阵元分别为: $A = D = 1, B = z, C = 0$ 。根据 Collins^[14]公式,中空环形光束经过 ABCD 光学系统后其场分布为:

$$\varepsilon_1(r_1, z) = \frac{i \exp(-ikz)}{\lambda B} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \varepsilon(r, 0) \cdot \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [Ar^2 - 2rr_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) + Dr_1^2] \right\} r dr d\theta \quad (3)$$

利用贝塞尔函数的性质和递推公式:

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[ix \cos(\phi - \phi')] d\phi \quad (4)$$

$$J_0(x+y) = J_0(x)J_0(y) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_m(x)J_m(y) \quad (5)$$

观察屏上中空环形激光束场分布为:

$$\varepsilon_1(r_1, z) = \frac{ik}{2z} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot \exp \left[-ik \left(\frac{r_1^2 + 2z^2}{2z} \right) \right] \cdot \exp \left[-\frac{ikzw_0^2 r_0^2}{zw_0^2(2z + ikw_0^2)} \right] \cdot \exp \left(-\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \times \left\{ \frac{\beta}{4\alpha} J_0(\beta r_0) \left[I_{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) - I_{\frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \right] + 2r_0 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_m(\beta r_0) I_{\frac{1}{2}m} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) + r_0 J_0(\beta r_0) I_0 \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) + \frac{\beta}{2\alpha} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_m(\beta r_0) \left[I_{\frac{1}{2}m - \frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) - I_{\frac{1}{2}m + \frac{1}{2}} \left(\frac{\beta^2}{8\alpha} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

对一氧化碳激光和二氧化碳激光三维光强分布的影响。从这些图可知,随着传输距离 z 的增加,光束的空间重叠区域减小,并且,由于此时光束趋于发散,因此,光斑将变大,光强逐渐减小。并且由于二氧化碳激光光斑比一氧化碳激光光斑大,因此,光强最大值比一氧化碳激光的最大值小。在激光加工技术中,一氧化碳激光由于光斑小,用作切割时,可以使切缝很细,加工精度高;用作打孔时,还可以节约材料等等。但是,由于输出一氧化碳激光对冷却温度要求很高,在室温下,一般难以获得高功率激光。

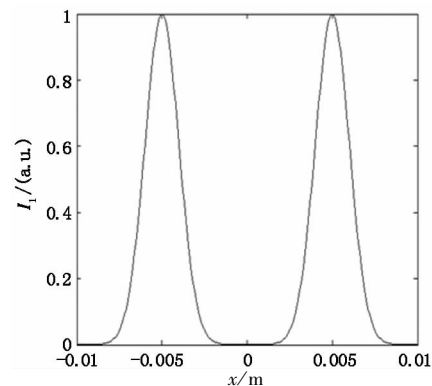


图2 一氧化碳激光器二维近场光强分布图 $w_0 = 2 \text{ mm}, r_0 = 5 \text{ mm}, z = 0.01 \text{ m}$

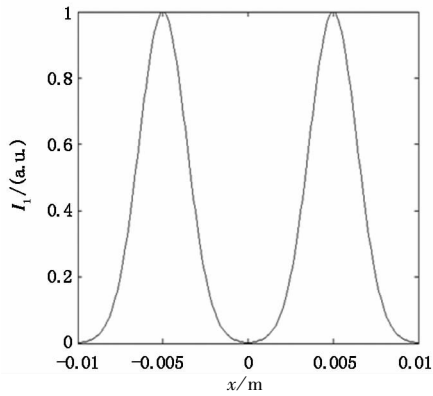


图3 二氧化碳激光器二维近场光强分布图
 $w_0 = 2.8 \text{ mm}, r_0 = 5 \text{ mm}, z = 0.01 \text{ m}$

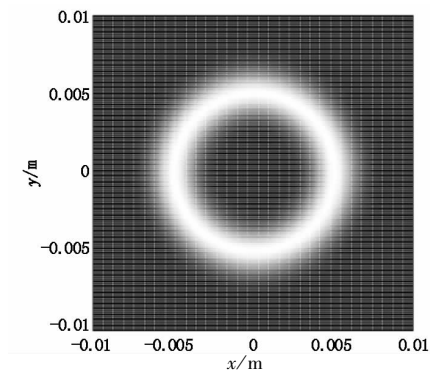


图4 一氧化碳激光器近场光斑图
 $w_0 = 2 \text{ mm}, r_0 = 5 \text{ mm}, z = 0.01 \text{ m}$

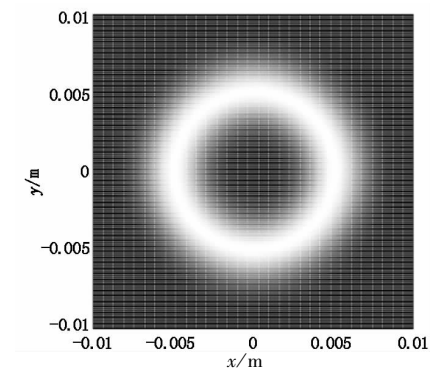


图5 二氧化碳激光器近场光斑图
 $w_0 = 2.8 \text{ mm}, r_0 = 5 \text{ mm}, z = 0.01 \text{ m}$

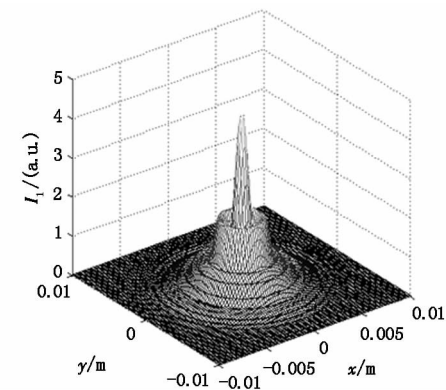


图6 一氧化碳激光器近场立体光强分布图
 $w_0 = 6 \text{ mm}, r_0 = 1 \text{ mm}, z = 1 \text{ m}$

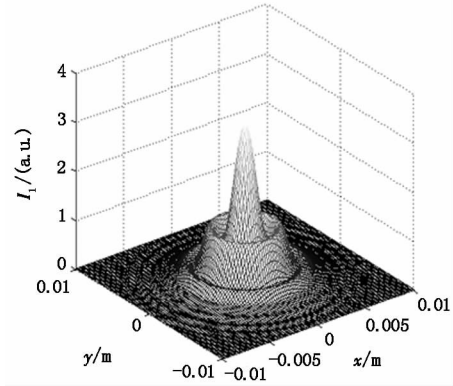


图7 一氧化碳激光器近场立体光强分布图
 $w_0 = 6 \text{ mm}, r_0 = 1 \text{ mm}, z = 2 \text{ m}$

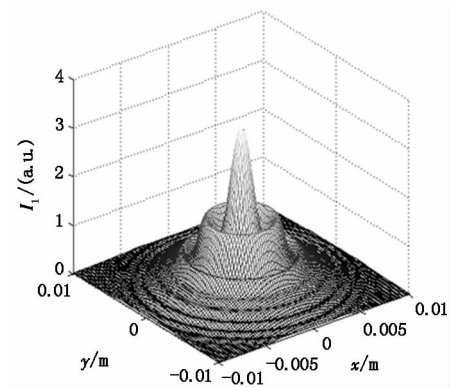


图8 二氧化碳激光器近场立体光强分布图
 $w_0 = 8.4 \text{ mm}, r_0 = 1 \text{ mm}, z = 1 \text{ m}$

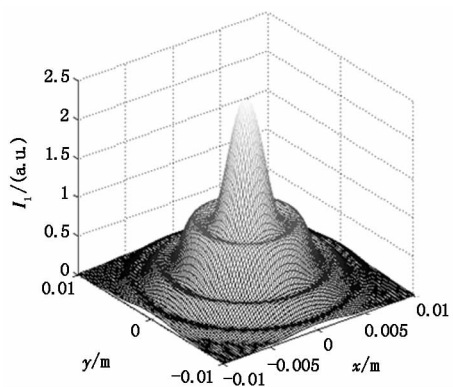


图9 二氧化碳激光器近场立体光强分布图
 $w_0 = 8.4 \text{ mm}, r_0 = 1 \text{ mm}, z = 2 \text{ m}$

4 结论

本文基于圆筒放电,研究了高功率中空环形二氧化碳激光器和一氧化碳激光器的近场特性,根据Collins公式推导出了输出光束的解析表达式。本文还给出了影响光强分布的主要参数 λ, w_0, r_0, z 。通过计算可知,一氧化碳激光由于波长短,光斑小,因此有较强的光强分布;相比之下,二氧化碳激光由于光斑较大,因此,光强相对较弱。随着传输距离的增加,光束逐渐发散,从而降低了最大光强,因此,研究激光的近场分布有实际意义。

参考文献:

- [1] H J J Seguin. Power scaling of diffusion-cooled lasers [J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30 (5): 331 - 336.
- [2] E F Yelden, H J J Seguin, C E Capjack, et al. Phase locking in a multichannel radial array CO₂ laser [J]. Appl. Phys. Lett., 1993, 62(12): 1311 - 1313.
- [3] Yude Li, Jinglun Liu, Mei Chen, et al. Axisymmetric-fold combination laser resonator [J]. Optical Engineering, 2005, 44(6): 1 - 7.
- [4] D Ehrlichmann, U Habich, H D Plum, et al. Azimuthally unstable resonators for high-power CO₂ lasers with annular gain media [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1994, 30(6): 1441 - 1447.
- [5] D Ehrlichmann, U Habich, H D Plum. Ring resonator for lasers with annular gain media [J]. Applied Optics, 1994, 33(30): 6919 - 6924.
- [6] T R Ferguson, M E Smithers. Toric unstable resonators [J]. Applied Optics, 1984, 23(13): 2122 - 2126.
- [7] V A Seguin, H J J Seguin, C E Capjack, et al. Multiple pass unstable resonator for an annular gain CO₂ laser [J]. Applied Optics, 1986, 25(21): 3825 - 3829.
- [8] L W Casperson, P M Scheinert. Multipass resonators for annular gain lasers [J]. Opt. Quantum Electron, 1981, 13 (3): 193 - 199.
- [9] Youichi Takada, Hideaki Saito, Tomoo Fujioka. Eigenmode of an annular stable resonator [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1988, QE - 24: 11 - 12.
- [10] Chen Mei, Li Yude, Liu Jinglun, et al. Phase-locking resonator with annular gain media [J]. Optics Communications, 2008, 281(13): 3501 - 3504.
- [11] Michel Morin, Pierre-A Bélanger. Diffractive analysis of annular resonators [J]. Appl. Opt., 1992, 31(12): 1942 - 1947.
- [12] Masamori Endo, Shigeru Yamaguchi, Taro Uchiyama, et al. Numerical simulation of the w-axicon type optical resonator for coaxial slab CO₂ lasers [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34(1): 68 - 77.
- [13] Baida Lü. Laser optics [M]. 3rd ed. Beijing: High Education Press, 2002. (in Chinese)
吕百达. 激光光学 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] Xu Yonggen, Li Yude, Qiu Yi, et al. The research of phase-locking and output behavior of axisymmetric folded-combined CO₂ laser [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7): 642 - 646. (in Chinese)
徐勇根, 李育德, 邱毅, 等. 轴对称折叠组合 CO₂ 激光器的相位锁定及其输出特性的研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 642 - 646.