

高平均功率脉冲 TEA CO₂ 激光器 输出光束质量评价

吴 谨 彭先兆 谭荣清 谢文杰 万重怡

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

提要 在远至 33 m 处测量了高平均功率高重复频率 TEA CO₂ 激光器输出光束光强的远场二维分布,用 M^2 因子理论对光束质量进行了评价,获得了该激光束腰斑半径、远场发散角、 M^2 因子等参数。

关键词 TEA CO₂ 激光器, 光束质量, M^2 因子

1 引 言

近十几年来,高平均功率高重复频率 TEA CO₂ 激光器的研究得到了很大的发展^[1,2],在工业、科研及其他领域的应用也日益广泛,激光器输出的光束质量问题,也引起了人们的重视。这类激光器,一般平均输出功率为几千瓦,脉冲峰值功率兆瓦以上,如果没有特别设计,输出光束常为多模结构。对设计人员来说,对激光器的光束质量作出评价,可以了解激光器的输出光束是否符合设计要求;对使用人员来说,有了光束质量的有关参数,可以预知激光作用的效果。

激光器的输出光束质量,涉及到光束的腰宽、远场发散角、模式构成、强度的二维分布及 M^2 因子。这些参数并不互相独立,其中, M^2 因子在最近几年被国际标准化组织(ISO)作为标准提出来^[3],它从更为本质的方面反映了激光束的传播规律;但是,仅仅一个 M^2 因子还不能描述光束质量的全部,至少从应用的角度来看,它就不很直观。事实上,对一些激光器来说,仅用 M^2 因子来描述其输出光束质量是不可靠的^[4]。因此,对于下面将要评价的脉冲激光器,我们将给出它的包括 M^2 因子在内的各种参数。

关于高功率稳定腔 CO₂ 激光器的光束质量测量问题,已有了很多工作报告^[5-7],虽然有关实验是在连续波激光器上进行的,但这些工作对于评价高平均功率脉冲 TEA CO₂ 激光器的光束质量也很有参考价值。本文将介绍我们在千瓦级平均功率 TEA CO₂ 激光器上的直接测量结果,并利用 M^2 因子理论,对光束质量进行探讨。

2 关于 M^2 因子

对于任意一个激光器的输出光束,如果知道 z 处的光强分布 $I(x, y, z)$, 则依二阶矩定义,在该处的光束半宽定义为(以 x 方向为例)

$$w_x(z) = 2 \cdot \sqrt{\frac{\iint (x - x_0)^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}} \quad (1)$$

式中, \bar{x} 由下式给出

$$\bar{x} = \frac{\iint x \cdot I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \quad (2)$$

依上述光束半宽的定义, 可以证明^[8], 在 $z = z_0$ 处, $w_x(z)$ 有极小值, 这即是光束的光腰, 记为

$$w_0 = w_x(z) \Big|_{z=z_0} \quad (3)$$

而且, $w_x(z)$ 的传播规律为

$$w_x(z) = w_{0x} \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, z_R 为一常数, 称为 Rayleigh 范围。可见, 依此定义的光束宽度的传播规律同我们熟知的稳定腔结构中的基模 Hermite-Gaussian 光束的传播规律形式上完全一致。从此式可定义出 x 方向的远场发散角(半角) 为

$$\theta_x = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dw_x(z)}{dz} = \frac{w_{0x}}{z_R} \quad (5)$$

从 M^2 因子的定义出发, 可以推出该光束 x 方向的 M^2 因子为

$$M_x^2 = \frac{\pi \cdot w_{0x} \cdot \theta_x}{\lambda} = \frac{\pi \cdot w_{0x}^2}{\lambda \cdot z_R} \quad (6)$$

对于圆形稳定腔结构, 理论上谐振腔的本征模应为 Laguerre-Gaussian 模, 但是实际上任何对腔结构的圆柱对称性的微小破坏, 如腔内有布鲁斯特窗片, 都会使其内的 Laguerre-Gaussian 模难以振荡, 所以, 输出光束一般仍为 Hermite-Gaussian 模结构^[9]。因此, 用 Hermite-Gaussian 模来进行讨论更具有实际意义。假设输出混合模光束所包含的最高横模为 TEM_{MN}, 则不失一般性地, 该光束的 M^2 因子可以表示为^[10](以 x 方向为例)

$$M_x^2 = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (2m+1) |c_{mn}|^2 + \sum_{m=0}^{M-2} \sum_{n=0}^N 2k_{mn, (m+2)n} \sqrt{(m+1)(m+2)} |c_{mn} c_{(m+2)n}| \quad (7)$$

式中, c_{mn} 为 TEM_{mn} 模的复振幅系数, $k_{mn, (m+2)n}$ 为 TEM_{mn} 模和 TEM_{(m+2)n} 模之间的相干系数, 而且有

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N |c_{mn}|^2 = 1 \quad (8)$$

$$0 \leq k_{mn, (m+2)n} \leq 1 \quad (9)$$

所以, 有了 M^2 因子, 就可以基本上了解激光束的模式构成。另外, 如果谐振腔中的限模元件的半径为 a , 则能够通过此光阑而没有特别大的衍射损耗的横模的阶次将由下式决定^[11]

$$n \leq N_{\max} \approx (a/w)^2 \quad (10)$$

式中, w 为光阑位置处相应的高斯基模半径。

从上面的(4)式可以看出, 对于任意一个激光束, 只要测量三个不同位置的光强分布数据并依据(1)算出相应的光斑半径, 就可以计算出光腰的位置、宽度和 Rayleigh 范围, 进而得到有关光束质量的各种数据, 如模式构成、远场发散角、 M^2 因子等。实际上, 准确测量是很困难的, 因此, ISO 的建议是在 Rayleigh 范围前后各测五组数据作拟合。但是, 对于腔结构参数已知的稳定腔, 光腰的位置和基模光斑大小可以直接计算出来, 只要有任意位置的光强分布 $I(x, y, z)$, 就可以由(4)式计算出有关的参数。

特别对于平凹稳定腔结构来说,光腰位置在输出平面镜处,从上面的推导可以看出,只要在任意一个位置得到其光强分布 $I(x, y, z)$, 从理论上, 就可以得到这种激光器输出光束的各种参数。

3 实验装置

为了评价高平均功率高重复频率脉冲 TEA CO₂ 激光器的光束质量, 我们采用直接测量激光束远场分布的方法。由于远场光斑尺寸大, 现有的一些较成熟的测试设备不能被采用。我们采用转镜扫描的方法。

光路如图 1 所示, M_1, M_2, M_3 为平面反射镜, M_4 为分束镜, 扫描平面全反镜的扫描角度和位置由步进电机精确控制。 D_1 为采样探测器, D_2 用于检测总光强的变化, 同时还兼作同步信号, 使计算机采集 D_1 的信号, 并控制步进电机的运转。He-Ne 激光器用作准直指示。整个测量系统由计算机控制。

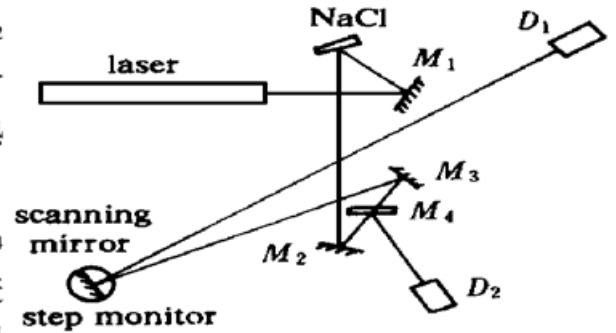


图 1 转镜扫描测量系统装置图

Fig. 1 Experimental setup for measuring the beam profile with a scanning mirror system

4 评价结果

激光器为平凹稳定腔结构, 凹面镜曲率半径 $R = 10 \text{ m}$, 腔长 $L = 2.4 \text{ m}$, 放电区横截面为 $25 \times 25 \text{ mm}^2$, 电极两端距腔镜约为 0.5 m , 脉冲重复频率为 300 Hz , 脉冲峰值功率大于 20 MW , 放电沿 x 轴方向。由谐振腔几何参数可以计算出该激光器的 Rayleigh 范围为 $z_R = 4.27 \text{ m}$, 高斯基模半径为 $w_0 = 3.80 \text{ mm}$ 。

对该激光器, 我们作了两种情形下的实验。

4.1 腔内没有额外的限模元件

分别测量了三个不同位置的光强分布, 由这些数据得到的光束质量参数见表 1。表中距离 z 由平面镜输出端算起, 测量误差为 $\Delta z \leq 0.05 \text{ m}$, 由光强测量误差引起的光斑宽度的误差小于 10% , 因此, 发散角、腰宽和 M^2 因子的误差经计算均为 10% 。图 2 为这三个距离上的光强分布图。可见这种光束为“平顶”形, 属多模结构。

表 1 三个不同位置测量的光束质量数据

Table 1 Beam quality data measured at 3 different distances

Pos	z /m	$w_x(z)$ /mm	w_{0x} /mm	θ_x /mrad	M_x^2	$w_y(z)$ /mm	w_{0y} /mm	θ_y /mrad	M_y^2
1	11.82	27.8	9.4	2.2	6.2	25.0	8.5	2.0	5.0
2	26.32	58.0	9.3	2.2	6.0	51.0	8.2	1.9	4.6
3	33.04	74.3	9.5	2.2	6.3	70.0	9.0	2.1	5.6
Aver			9.4	2.2	6.2		8.3	2.0	5.1

在这种情况下, 起限模作用的主要是放电电极的截面。表 1 中, M_x^2 大于 M_y^2 是因为放电电极在 x 方向。根据 Hermite-Gaussian 光束的传播规律, 利用(10)式, 可计算得此时横模阶次的最大可能值为 $m, n \leq 9$ 。

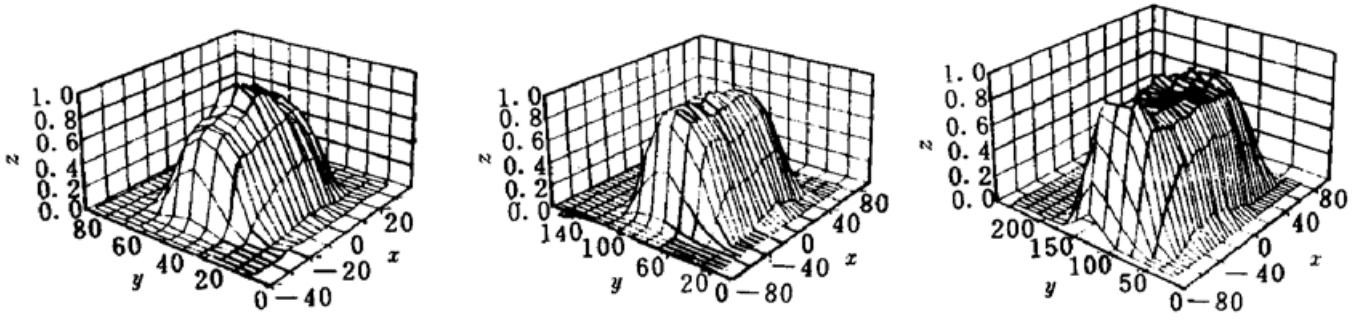


图 2 光强的二维分布

Fig. 2 Two-dimensional intensity distributions at various distances

(a) $z = 11.82 \text{ m}$; (b) $z = 26.32 \text{ m}$; (c) $z = 33.04 \text{ m}$

一般来说, 这种混合模光束是各种模的非相干叠加, 即(7) 式中没有模间相干项。于是有

$$M_x^2 = \sum_{m=0}^9 \sum_{n=0}^9 (2m + 1) |c_{mn}|^2 = 6.2 \tag{11}$$

$$M_y^2 = \sum_{m=0}^9 \sum_{n=0}^9 (2n + 1) |c_{mn}|^2 = 5.0 \tag{12}$$

当然, 从上面两个方程是求不出各模所占的比例的。高阶模模体积大, 贡献亦大。上面的方程中, 高阶模系数也相对大些。这种混合模的构成显然很复杂, 可能有 100 个模同时存在。

4.2 腔内加光阑以获得低阶模输出

腔内设置光阑以限制高阶模振荡获得低阶模甚至单模输出是一种简单而常用的方法, 虽然这样做会引起输出功率的下降。图 3 是在腔内同时放置直径 14 mm(距输出镜约 10 cm) 和 15 mm(距全反镜约 10 cm) 的两个光阑后三个不同位置测得的光强分布图。

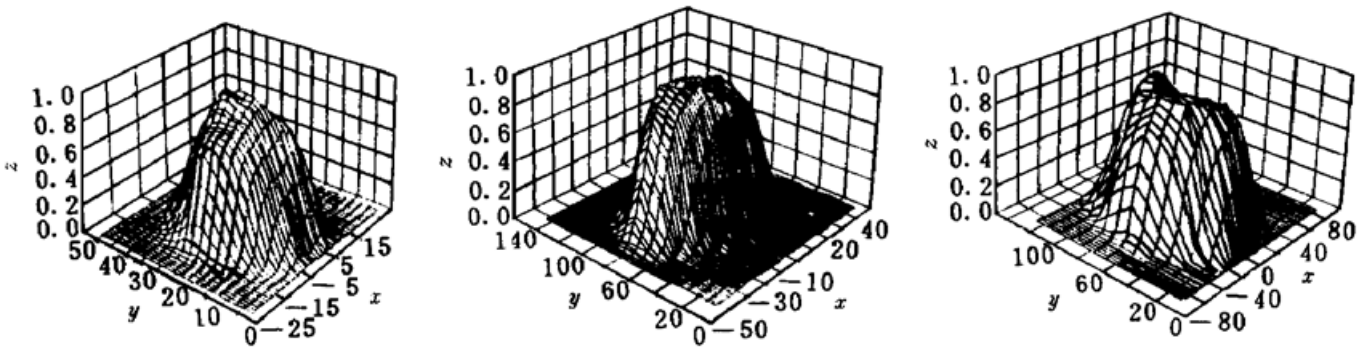


图 3 腔内加光阑时的光强二维分布

Fig. 3 Two-dimensional intensity distributions with intracavity apertures

(a) $z = 11.82 \text{ m}$; (b) $z = 26.32 \text{ m}$; (c) $z = 33.04 \text{ m}$

表 2 加光阑时不同位置测量的光束质量数据

Table 2 Beam quality data at different distances with intracavity apertures

Pos	z /m	$w_x(z)$ /mm	w_{0x} /mm	θ_x /mrad	M_x^2	$w_y(z)$ /mm	w_{0y} /mm	θ_y /mrad	M_y^2
1	11.82	14.2	4.8	1.1	1.6	17.0	5.8	1.4	2.4
2	26.32	31.4	5.0	1.2	1.8	38.0	6.1	1.4	2.5
3	33.04	40.0	5.1	1.2	1.8	49.0	6.3	1.5	2.8
Aver			5.0	1.2	1.8		6.1	1.4	2.6

表 2 为利用三个不同位置的数据分别计算出的光束质量参数。可以看到, 加入光阑后, 大部分高阶模被抑制了。由于光阑的存在, 可能的横模阶次为 $m, n \leq 3$, 即至多有 16 个横模存在, 光束质量得到明显的改善。

致谢 本实验室佟胜友同志参加了测试工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 C. Y. Wan, S. M. Liu, J. W. Zhou *et al.*. High repetition rate industrial TEA CO₂ laser with output power of 1.5 KW. *SPIE*, 1995, **2502**: 87~ 94
- 2 K. Midorikawa, H. Tashiro. High power TEA CO₂ lasers. *The Review of Laser Engineering*, 1993, **21** (4): 26~ 38 (in Japanese)
- 3 ISO/TC 172/SC9/WG1/N56, Optics and optical instruments: Test methods for laser beam parameters: Beam widths, divergence angle, and beam propagation factor. 1993-05-03
- 4 George N. Lawrence. Proposed international standard for laser-beam quality falls short. *Laser Focus World*, 1994, (7): 109~ 110, 112, 114
- 5 A. E. Siegman, S. W. Townsend. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4): 1212~ 1217
- 6 C. Lim, W. M. Steen. Measurement of the temporal and spatial power distribution of a high-power CO₂ laser beam. *Optics and Laser Technology*, 1982, **14**(3): 149~ 153
- 7 Li Junchang. Simple measurement of power density distribution of high power laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(2): 93~ 97 (in Chinese)
- 8 A. E. Siegman. Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(5): 1146~ 1148
- 9 A. E. Siegman. *Lasers*. University Science Books, California: Mill Valley, 1984. 648
- 10 Yao Jianquan. Nonlinear optical frequency conversion and laser frequency tuning technology. Beijing: Science Press, 1995. 648 (in Chinese)
- 11 A. E. Siegman. *Lasers*. University Science Books, California: Mill Valley, 1984. 694

Evaluation of the Beam Quality of a High Average Power Pulse TEA CO₂ Laser

Wu Jin Peng Xianzhao Tan Rongqing Xie Wenjie Wan Chongyi
(*Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract The far field beam profiles up to 33m of a high average power high repetition rate TEA CO₂ laser were measured and the beam quality parameters such as M^2 factor, waist width and divergence angles were also evaluated.

Key words TEA CO₂ laser, beam quality, M^2 factor