

# TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出平顶模按厄米-高斯模的展开

谭荣清 万重怡 吴 谨

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘 要** TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的能量密度分布一般为平顶型分布. 为了给研究和分析 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束提供一种新的处理方法, 采用 FGB 理论, 对实验测量的一台 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出的实际平顶型光斑的能量密度分布按厄米-高斯函数进行了展开. 根据展开结果, 对 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的空间分布特性进行了分析与讨论. 初步证实了 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的能量密度分布可以按厄米-高斯函数展开.

**关键词** TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 平顶模; 厄米-高斯模; 平顶高斯光束

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 激光器是最为常见的一种气体激光器, 其应用非常广泛<sup>[1~7]</sup>. TEA (Transversely Excited Atmospheric, 横向激励大气压) CO<sub>2</sub> 激光器由于具有峰值功率高、输出波长可以在 9~11 μm 范围内调谐、可高重复频率运转等优点, 目前广泛应用于激光标记、激光表面冲击硬化、激光清洗、激光雷达、激光化学、激光推进研究等领域<sup>[1~5]</sup>. 与通常的低气压 CO<sub>2</sub> 激光器不同, TEA CO<sub>2</sub> 激光器的输出光束在光束截面内除光斑边缘附近外, 能量密度基本呈均匀分布. TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出的这种典型光斑模式, 一般被称为“平顶模”(Flat-Top mode)<sup>[8]</sup>. 目前, 一般仅粗略地认为平顶模是由多模叠加构成, 而对于其具体构成及解析表达人们还较少研究. 本文将借鉴近年提出的 FGB 光束理论, 研究一台 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的实际输出光斑模式.

## 1 平顶高斯光束理论

1994 年, Gori 提出了平顶高斯光束 (Flattened Gauss Beams-FGB) 的概念<sup>[9,10]</sup>, 给出了一种可以得到“平顶型”光束的较为简便的数学描述. 按照 Gori 的定义, 在光腰处, FGB (平顶高斯光束) 的场分布可以表示为

$$f_N(r, w) = \exp \left[ -(N+1) \frac{r^2}{w^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[ (N+1) \frac{r^2}{w^2} \right]^n \quad (1)$$

式中,  $N$  为 FGB 的阶数,  $w$  为常量, 相当于 FGB 的半径.

平顶高斯分布的主要优点是它可以用厄米-高

斯函数展开, 对  $N$  阶平顶高斯函数有

$$f_N(r, w) = \sum_{m,n} \lambda_{m,n} |\Phi_{m,n}(x, y)|^2 \quad (2)$$

式中,  $\Phi_{m,n}(x, y)$  为厄米-高斯函数, 权重系数按式 (3) 计算

$$\lambda_{m,n} = C \sum_{k=0}^N C_{k,m} C_{N-k,n} \quad (3)$$

式中,  $C$  为常量, 且

$$C_{k,m} = \int_0^{\infty} L_k(x/2) L_m(x) \exp(-x) dx \quad (4)$$

式中,  $L_k$  为  $k$  阶勒让德多项式.

## 2 TEA CO<sub>2</sub> 激光器及其输出

本文中的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器及其在出口附近的光斑形廓如图 1.

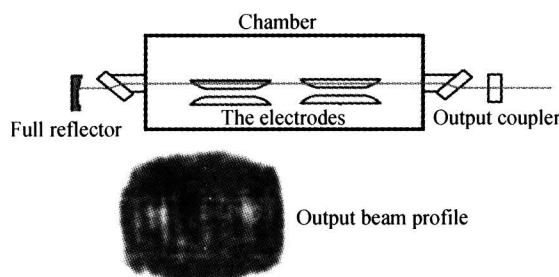


图 1 TEA CO<sub>2</sub> 激光器及输出光斑轮廓  
Fig. 1 The TEA CO<sub>2</sub> laser and the output beam profile

激光器为平-凹腔结构<sup>[11,12]</sup>, 激光谐振腔由  $R=10$  m 的凹面全反射镜和相距 2.4 m 的平行平面输出镜组成. 增益介质的体积为  $2 \times 60$  cm  $\times$   $2.5$  cm  $\times$   $2.5$  cm, 完全相同的 2 段放电电极的间距均为 2.5 cm. 在整个放电空间内, 增益介质是均匀的. 由于激光器为全外腔结构, 在激光器腔体的两端使用了 NaCl 晶体作为 Brewster 窗口, 因此谐振腔不再具有圆对称性<sup>[13]</sup>.

从图 1 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光斑形廓可以看出, 输出光斑为典型的“平顶型”情况. 输出光斑的形状大小基本与放电截面相同, 激光器输出光的

能量密度分布在与激光器放电截面相应的整个范围内,基本为均匀分布。

根据经典谐振腔理论,本文中的谐振腔及其对应的基模高斯光束参量如表 1. 表 1 中  $z$  代表沿光束中心以输出镜为零点的位置坐标。

表 1 谐振腔及基模高斯光束参量

符号	意义	数值
$z/m$	光斑位置	0 26.3
$w(z)/mm$	光斑半径	3.8 23.7
$Z_R/m$	瑞利距离	4.28

采用扫描法测量了在距激光器输出窗口距离  $z=26.3$  m 处的激光器输出光束的能量密度分布,扫描法测量装置如图 2<sup>[14]</sup>。

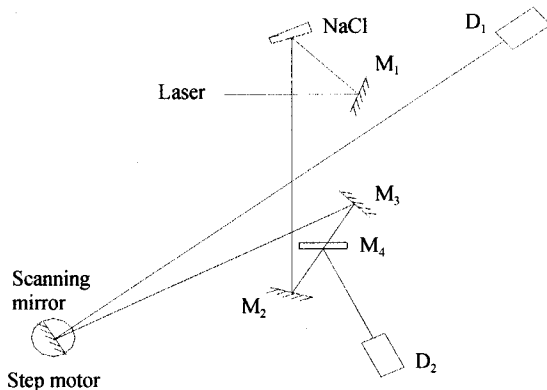


图 2 “扫描法”测量装置

Fig. 2 The setup of “Scanning method”

图中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  为平面全反射镜,  $M_4$  为分光镜,  $D_1$  为测量探测器,  $D_2$  为能量监测探测器。测量时,由步进电机带动安装在电动旋转台上的扫描镜与激光脉冲同步转动,由热释电探测器  $D_1$  实现对功率密度的采样。采用上述方法测量的一维激光器输出光束能量密度分布如图 3. 图中横坐标的每单位对应实际距离 1.15 mm. 在另外的实验中,也曾用探测器线列阵测量激光器出口附近的光束分布,其形状与图 3 中的分布类似(参见文献[8]中的图 3)。

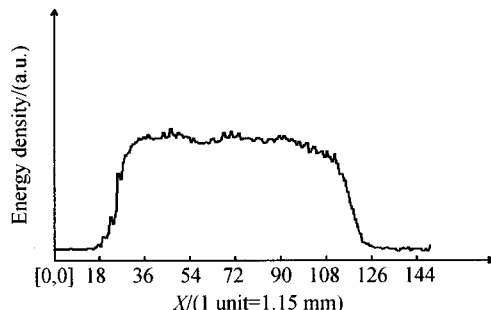


图 3 实测的  $z=26.3$  m 处输出光束能量密度分布

Fig. 3 The measured beam profile at  $z=26.3$  m

### 3 输出光斑按厄米-高斯函数的展开

用厄米-高斯函数来表示输出光束在距离光腰  $z$  处截面内的能量密度分布,应该有

$$E(x, y, z) = \sum_{m, n=0}^N \lambda_{m, n} |u_{m, n}(x, y, z)|^2 \quad (5)$$

式中,  $u_{m, n}(x, y, z)$  为厄米-高斯函数

$$u_{m, n}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2^m m!}} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w(z)} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) H_m\left(\sqrt{2} \frac{x}{w(z)}\right) H_n\left(\sqrt{2} \frac{y}{w(z)}\right) \cdot \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right) - (1 + m + n)\arctan\left(\frac{z}{Z_R}\right)\right]\right\} \quad (6)$$

式(6)中

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{Z_R^2}} \quad (7)$$

$\lambda_{m, n}$  为权重系数. 借鉴 FGB 理论,  $\lambda_{m, n}$  应按式(3)计算,  $N$  为最高阶厄米-高斯模的阶数. 对于 TEA CO<sub>2</sub> 激光器,  $N$  应满足<sup>[13]</sup>

$$N < (a/w_0)^2 \quad (8)$$

式中  $w_0$  为基模高斯光束半径. 根据上一节的计算,  $w_0 = 3.8$  mm,  $a$  为光阑半径, 对于实验中的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 平行电极相当于谐振腔的光阑孔径, 上式中的光阑半径  $a = 25/2 = 12.5$  mm, 根据上述分析, 按照式(6)计算,  $N$  应取为 10.

为了简化问题,本文中仅考虑一维情况,对应于图 3 的情况,  $z=26.3$  m,  $y=0$ .

采用 0 到 10 阶厄米-高斯函数叠加得到的激光光斑能量密度分布的计算结果如图 4.

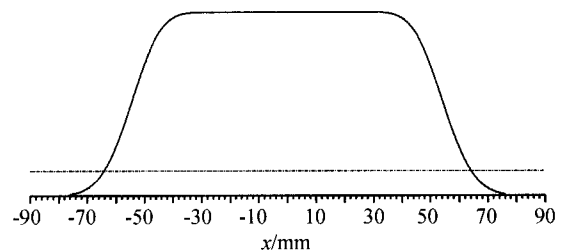


图 4 计算的  $z=26.3$  m 处输出光束能量密度分布

Fig. 4 The calculated beam profile at  $z=26.3$  m

比较图 4 与图 3 可以看出,图 4 中计算的激光光斑能量密度分布与图 3 中的实际测量结果基本吻合。

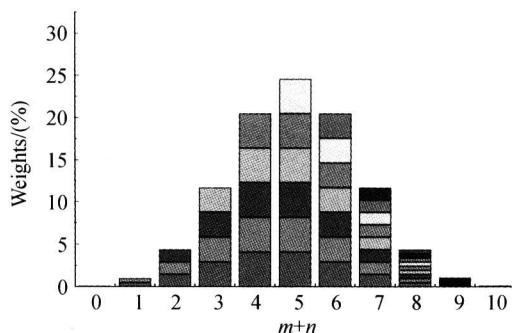
### 4 讨论

图 3 中计算所采用的各阶厄米-高斯函数的权重系数  $\lambda_{m, n}$  由式(3)得出,具体权重系数  $\lambda_{m, n}$  的列列于表 2.

表 2 厄米-高斯模的权重因子

$m \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.098	0.488	1.465	2.93	4.102	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009
1	0.488	1.465	2.93	4.102	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0
2	1.465	2.93	4.102	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0
3	2.93	4.102	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0	0
4	4.102	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0	0	0
5	4.102	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0	0	0	0
6	2.93	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0	0	0	0	0
7	1.465	0.488	0.098	0.009	0	0	0	0	0	0	0
8	0.488	0.098	0.009	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.098	0.009	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

在表 2 中,  $m+n$  相同的模具有相等的权重因子, 对于  $m+n > N (=10)$  的模取权重因子为 0, 权重因子与  $m+n$  的关系见图 5. 从表 2 和图 5 中可以看出, 在参与叠加的各厄米-高斯模中,  $m+n$  相同的模具有相同的权重因子, 权重因子最大的为  $m+n=4$  和  $m+n=5$  的厄米-高斯模, 每个模的权重因子为 4.1%. 从图 5 中还可以看出,  $m+n=5$  的各模式权重因子之和最大, 为 24.6%. 在多模激光器中, 激光器的模式竞争取决于基模和低阶模、更高阶模的衍射损耗和各阶模的增益特性. 一般来说, 基模和接近基模的低阶模的衍射损耗最小, 因此, 在许多激光器中, 例如在普通封离型扩散冷却  $\text{CO}_2$  激光器中, 一般来说输出光束中基模和低阶模具有较多的权重, 激光器输出主要是基模和少数低阶模的叠加. 但对于类似本文中的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器, 情况有所不同, 这时, 激光器的增益介质的增益很高, 激光器中的各阶模在振荡放大过程中使增益介质达到饱和, 由于高阶模的模体积较大, 能够得到更大的增益. 由于各阶模式的净增益是由衍射损耗和该阶模在介质中得到的增益共同决定的, 基模的衍射损耗较小但在饱和介质中获得的增益较高阶模小, 高阶模的情况则正好相反, 按分析解释, 在这两种因素的共同作用下,  $m+n=4$  和 5 的模式的净增益最高, 因此获得了最高的权重. 通过上面的讨论, 可以对

图 5 不同  $m+n$  模的权重系数Fig. 5 Weight coefficients versus  $m+n$ 

TEA  $\text{CO}_2$  激光器输出的多模光束, 有一个更为量化的了解.

## 5 结论

本研究初步证实了 FGB 理论适用于 TEA  $\text{CO}_2$  激光器输出的平顶型光束, TEA  $\text{CO}_2$  激光器输出光束的能量密度分布可以按厄米-高斯函数展开. 这对进一步研究 TEA  $\text{CO}_2$  激光器输出的平顶型光束的特性提供了一种可能的途径.

## 参考文献

- Schweizer G, Werner L. Industrial 2 kW TEA  $\text{CO}_2$  laser for paint stripping of aircraft. In: Bohn W L, Huegel H, eds. *Proc of SPIE*, 1995, **2502**:57~63
- Karapuzikov A I, Malov A N, Sherstov I V. Tunable TEA  $\text{CO}_2$  laser for long-range DIAL lidar. *Infrared Phys & Tech*, 2000, **41**(2): 77~85
- Baranov V Y. High repetition rate pulsed gas lasers and their applications in chemistry and isotope separation. *IEEE J Quantum Electron*, 1983, **19**(10): 1577~1587
- 牛燕雄, 张鹏, 姚建讼, 等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 793~796  
Niu Y X, Zhang P, Yao J Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793~796
- 郑义军, 谭荣清, 王东蕾, 等. 激光脉冲重复频率对冲量耦合系数的影响. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(7): 979~782  
Zheng Y J, Tan R Q, Wang D L, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7): 979~782
- 王春晖, 成向阳, 王骥, 等.  $\text{CO}_2$  激光成像雷达距离分辨率测距准确度的分析与实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1212~1215  
Wang C H, Cheng X Y, Wang Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1212~1215
- 李景义, 饶云江, 牛永昌, 等. 高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲写入的相移长周期光纤光栅. *光子学报*, 2005, **34**(1): 38~40  
Li J Y, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 38~40

- 8 谭荣清, 万重怡, 谢文杰. TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出的平顶型模式研究. 中国激光, 2001, **A28**(7): 579~582  
Tan R Q, Wan C Y, Xie W J. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(7): 579~582
- 9 Gori F. Flattened gaussian beams. *Opt Comm*, 1994, **107**(5,6): 335~341
- 10 Gori F, Santarsiero M, Borghi R, *et al.* Intensity-based modal analysis of partially coherent beams with hermite-gaussian modes. *Opt Lett*, 1998, **23**(13): 989~991
- 11 Wan C Y, Liu S M, Zhou J W, *et al.* High repetition rate TEA CO<sub>2</sub> laser with average power 1.5 kW. In: Bohn W L, Huegel H, eds. *Proc of SPIE*, 1995, **2502**: 87~94
- 12 吕岩, 于延宁, 万重怡, 等. 印刷电路板预电离 3.6 kW TEA CO<sub>2</sub> 激光器. 光子学报, 2005, **34**(7): 968~970  
Lü Y, Yu Y N, Wan C Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 968~970
- 13 Siegman A E. *Lasers Second Edition*, Mill Valley, California: University Science Books, 1986. 558~922
- 14 吴谨, 彭先兆, 谭荣清, 等. 高平均功率脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束质量评价. 中国激光, 1999, **A26**(7): 589~593  
Wu J, Peng X Z, Tan R Q, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **A26**(7): 589~593

## Expanding the Flat-top Mode of TEA CO<sub>2</sub> Laser in Hermit-Gauss Modes

Tan Rongqing, Wan Chongyi, Wu Jin

*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

Received date: 2005-07-26

**Abstract** Generally, the energy density distribution of a TEA CO<sub>2</sub> laser was flat-topped. In order to find a new method for studying and analyzing the output beams of TEA CO<sub>2</sub> lasers, according to the FGB theory, the energy density distribution of the measured flat-top beam output by a TEA CO<sub>2</sub> laser was expanded in Hermit-Gauss functions. And the space distribution characteristics of the output beam were analyzed and investigated. It was proven that the energy density distribution of a TEA CO<sub>2</sub> laser could be expanded in Hermit-Gauss functions.

**Keywords** TEA CO<sub>2</sub> laser; Flat-top modes; Hermit-Gauss modes; Flattened Gauss beams



**Tan Rongqing** was born in Liaoning Province in 1966. He received his B. S. in Physics from Peking University in 1988, and received the M. S. and Ph. D. degrees in Engineering from Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (IECAS) in 1991 and 2001, respectively. He is now a professor in IECAS and his main interests are research and development of high repetition rate TEA CO<sub>2</sub> lasers and their applications.