

# 大功率 CO<sub>2</sub> 混合模激光束传输参数的 精确测量\*

王智勇 陈 涛 贺 平 左铁钊

(北京工业大学国家产学研激光技术中心 北京 100022)

**提要** 根据大功率 CO<sub>2</sub> 混合模激光束横截面强度分布的变化规律, 任选两个横截面的强度分布, 采用数值迭代方法, 精确计算出混合模传输的光学参数。

**关键词** 大功率 CO<sub>2</sub> 激光, 混合模激光束, 横截面强度分布, 光束质量

## 1 引 言

激光束的模式是评价激光器质量的一个重要指标, 在激光加工中它还严重影响到激光加工的质量<sup>[1]</sup>。因此了解激光束的模式组成是很重要的。

CO<sub>2</sub> 激光束按其模式大致可分为四类: 高斯基模、非相干多模激光束、部分相干混合多模以及相干混合多模<sup>[2]</sup>。对于激光功率小于 3000 W 的 CO<sub>2</sub> 激光器, 目前的技术水平可使其输出模式基本上为基模, 该光束的模式主要由高斯基模组成, 其光束横截面强度分布基本为高斯分布。对于非相干多模激光束, 其模式是由多种模式组合而成, 这种模式可见于早期制造的大功率 CO<sub>2</sub> 激光器和大功率固体激光器中。由于模式之间不相干, 当激光输出稳定时, 其光束横截面强度分布沿传播方向将是稳定不变的。对于这种激光束的模式组成的测量, 文献[3~5]采用逆问题算法, 求解了此类激光束的模式组成。对于部分相干混合多模, 激光束的传输是很复杂的, 主要是采用 Gauss-Schnell 模式来描述<sup>[6~8]</sup>。就作者所知, 目前还没有行之有效的方法来计算部分相干混合多模的模式组成。而对于混合模激光束, 其模式之间是相干的, 因此其横截面强度分布在传输过程中是不同模式的激光束相干叠加而成。对这种激光束的模式求解就比多模非相干激光束模式的求解复杂, 必须要已知其两个横截面强度分布才能完全求解。

本文根据大功率 CO<sub>2</sub> 混合模激光束的任意两个横截面强度分布, 采用最小二乘法和数值迭代, 计算出该类激光束的模式组成。并根据所计算出的模式组成模拟出光束传输过程中的不同截面的横截面强度分布, 计算结果和实验测量相符合。

## 2 原理及程序框图

实验所用激光器为 TLF6000t 型大功率 CO<sub>2</sub> 激光器, 腔镜为圆形镜, 谐振腔的菲涅耳数大

\* 国家自然科学基金(批准号: 59635170)以及北京工业大学博士启动经费资助项目。

收稿日期: 1999-05-28; 收到修改稿日期: 1999-08-10

于 1, 可采用拉盖尔-高斯近似来描述圆形共焦腔的行波场。拉盖尔-高斯场结构为

$$U_{pl}(r, \theta, z) = G_{pl} \exp(-ikz) \exp\left[-ik \frac{r^2(z - z_R)}{2(z^2 + z_R^2)}\right] \times \exp[-i\varphi_l(z)] \exp(-i\omega_p t) \exp(i\theta) \quad (1)$$

式中,  $r, \theta, z$  为柱坐标系,  $p, l$  为横模指数,  $k$  为波数,  $z_R$  为瑞利范围或共焦参数,  $G_{pl}$  为高斯-拉盖尔模式的归一化指数

$$G_{pl} = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+l)!}} \frac{1}{w_s(z)} \left| \frac{\sqrt{2}r}{w_s(z)} \right|^l L_p^l \left| \frac{2r^2}{w_s^2(z)} \right|$$

其中,  $w_s(z)$  为基模的光束半径,  $L_p^l \left| \frac{2r^2}{w_s^2(z)} \right|$  为缔合拉盖尔多项式,  $\varphi_l(z)$  为附加相移

$$\varphi_l(z) = (2p + l + 1) \arctan\left[\frac{z}{z_R}\right] + \varphi_0 \quad (2)$$

其中,  $\varphi_0$  为初始附加相移,  $\omega_{pl}$  为激光束的频率,  $\exp(i\theta)$  表示沿辐向的暗条纹数为  $2l$  条。

一般激光束的光场结构可写为一系列拉盖尔-高斯光束的线性组合<sup>[9]</sup>

$$E = \sum C_{pl} U_{pl} \quad (3)$$

$C_{pl}$  为复线性叠加系数,  $C_{pl} = \rho_{pl} \exp(i\psi_{pl})$ 。

实验中  $\text{CO}_2$  激光束作近距离的大气传输, 其模式之间的耦合可以忽略不计, 即  $\psi_{pl} = 0$ , 则由式(3) 得激光束的横截面光场强度分布为

$$I = |EE^*| = \sum_{p \neq m, l \neq n} \rho_{pl} \rho_{mn} G_{pl} G_{mn} \cos[(\varphi_{pl} - \varphi_{mn}) + (\omega_{pl} - \omega_{mn})t] \quad (4)$$

对于多模激光束, 受差频效应的影响, 模式之间的频率不相同, 激光束的横截面强度分布为各个模式的横截面强度分布的简单相加, 即

$$I = \sum_{pl} (\rho_{pl} G_{pl})^2 \quad (5)$$

可见, 激光束的横截面强度分布沿光束传输方向是不变化的, 对于这种多模激光束的模式组成的求解, 文献[10]已经作了研究。而对于混合模激光束, 模式之间的频率是相同的, 此时, 光束的横截面强度分布为

$$I = \sum_{pl} (\rho_{pl} G_{pl})^2 + \sum_{p \neq m, l \neq n} \rho_{pl} \rho_{mn} G_{pl} G_{mn} \cos(\varphi_{pl} - \varphi_{mn}) \quad (6)$$

由上式可知, 受附加相移的影响, 光束的横截面强度分布沿传输方向是改变的, 求解混合模的模式组成, 仅考虑一个横截面的强度分布来进行计算是不能符合光束在整个传输过程中各点的光束横截面强度分布的。本文采用两个横截面强度分布来进行计算, 获得了满意的结果。

设光束从横截面 1 传输到横截面 2, 两个截面之间的距离为  $z_0$ , 实验测量的这两个横截面的强度分布分别为  $I_{01}(x_1, y_1)$  和  $I_{02}(x_2, y_2)$ , 所计算的这两个横截面的强度分布分别为  $I_1(x_1, y_1)$  和  $I_2(x_2, y_2)$ , 根据最小二乘法原理有

$$\sum_{x_1, y_1} \frac{[I_1(x_1, y_1) - I_{01}(x_1, y_1)]^2}{I_{01}^2(x_1, y_1)} = \delta_1 \quad \sum_{x_2, y_2} \frac{[I_2(x_2, y_2) - I_{02}(x_2, y_2)]^2}{I_{02}^2(x_2, y_2)} = \delta_2$$

拟合的总误差为  $\delta = \sqrt{\delta_1 + \delta_2}$ 。但是受测量误差的影响, 本文取拟合误差为 10%。本文采用大功率激光束光斑质量诊断仪 Laserscope UFF100<sup>[11]</sup> 来测量大功率  $\text{CO}_2$  激光束的横截面强度分布。并采用最小二乘法和数值迭代法进行数学计算。

### 3 结果分析

我们所测量的激光束是从谐振腔出射后,经一光束望远镜扩束系统扩束后的激光束。以束腰为中心点,左右对称地测量了大功率 CO<sub>2</sub> 激光束的五个横截面的强度分布,测量间隔为 3 m。任选两个横截面强度分布  $L = 0$  和  $L = 9$  m 进行计算,所计算的模式含量、光束基模束腰半径、束腰位置、初始附加相移等的结果如表 1 所示。根据所计算出的光束模式及其他参数就可以计算光束的传输参数,所计算出的光束传输参数与实际测量的参数的对比如表 2 所示。从表中参数可以看出,测量结果与计算结果基本吻合。根据所计算的光束参数就可以模拟出光束在各个传输位置的横截面强度分布。在此就  $L = 3, 6$  和  $12$  m 三个位置作了对比,如图 1 所示。从图 1 可以看出,所模拟的各个位置的横截面强度分布与实际测量的结果相吻合。

表 1 计算机模拟所用参数

Table 1 Beam parameters in simulation

Mode contents	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>10</sub>	TEM <sub>02</sub>	TEM <sub>20</sub>	TEM <sub>12</sub>	TEM <sub>21</sub>
		24.191	0.233	0.013	75.432	0.048	0.037
Beam radius of TEM <sub>00</sub> /mm	4.452						
Original phase shift $\varphi_0$ /rad	2.635						

表 2 计算机模拟与实际测量结果的比较

Table 2 Comparison of calculation with measurement of beam propagation parameters

Beam parameters	Beam radius of TEM <sub>00</sub>	Rayleigh range	Beam quality ( $M^2$ )	Beam waist radius
Measurement	4.23 mm	5.3 m	2.622	6.85 mm
Calculation	4.452 mm	5.871 m	2.517	7.063 mm
Error/%	5.3	11	4.0	3.1

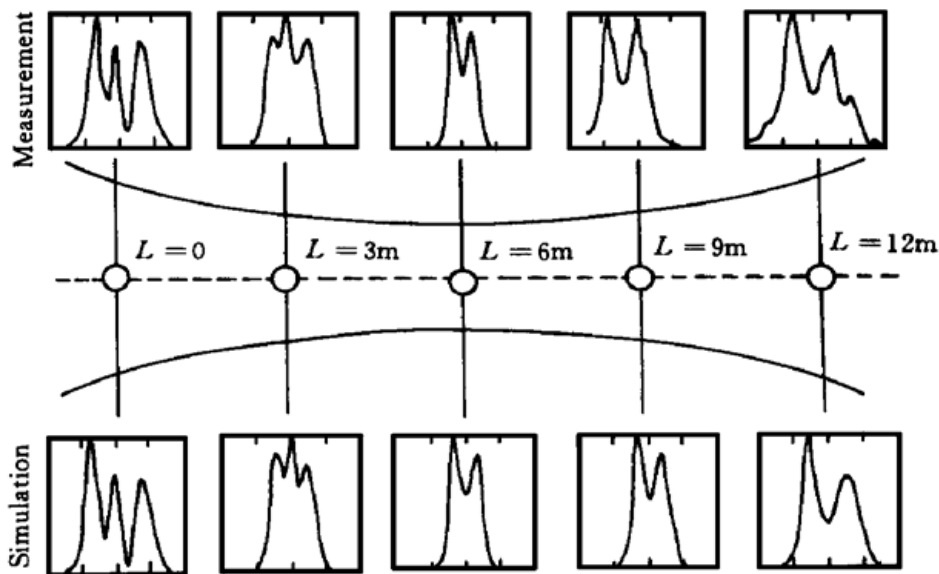


图 1 根据所计算的光束参数模拟的光束在不同传输位置的横截面强度分布与实验所测量的横截面强度分布的对比

Fig. 1 Comparison of simulation and measurement of beam profiles in different beam propagation positions

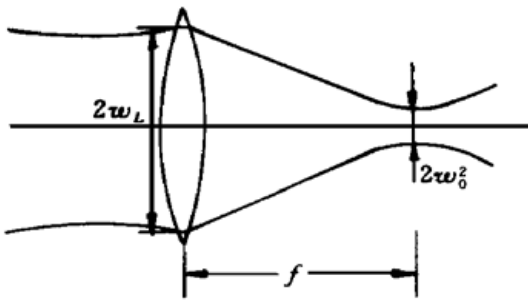


图 2 激光光束质量测量示意图

Fig. 2 Measurement of beam quality

根据光束各种模式所占的比例,可求出混合模激光束的光束质量<sup>[12]</sup>。如图 2 所示,根据激光光束质量定义的 ISO 草案<sup>[13]</sup>,计算公式为

$$M^2 = \frac{\pi w_L w'_0}{\lambda f} \quad (7)$$

式中, $\lambda$  为激光波长, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ;  $f$  为透镜焦距; $w_L$  为透镜入射面光束半径; $w'_0$  为焦点半径。

在实验中, $f = 200 \text{ mm}$ ,  $w_L = 7.05 \text{ mm}$ ,  $w'_0 = 251 \mu\text{m}$ , 根据公式(7),所测量的光束质量为:  $M_m^2 = 2.622$ 。

根据表 1 的模式成分,所计算的光束质量为:  $M_c^2 =$

2.517。表 2 所示为所测量的光束束腰大小,TEM<sub>00</sub>模束腰大小,瑞利长度,光束质量与计算结果的对比。可见误差是很小的。

## 4 结 论

根据混合模激光束的传输特点,本文采用最小二乘法和迭代算法,利用混合模光束传输过程中两个任意横截面的强度分布拟合计算了混合模的光学参数,理论计算和实验测量是吻合的。并根据所计算的光学参数模拟了混合模激光束在传输路径上各个位置的横截面强度分布,模拟结果和实验测量也是吻合的。根据所计算的混合模激光束的模式组成,可以计算出混合模激光束的光束质量因子  $M^2$ , 理论计算和实际测量相吻合。这也提供了一种测量混合模激光束质量的新方法。

致谢 作者非常感谢同柏林工业大学光学研究所 H. Weber 教授的有益讨论。

## 参 考 文 献

- 1 H. Huegel. Strahlwerkzeug Laser. Teubner Studienbuecher Maschinenbau. B. G. Teubner Stuttgart, 1992
- 2 Z. Wang, T. Chen, Y. Ding *et al.*. High-power CO<sub>2</sub> blending mode laser beam propagation and focus on account of phase shifts. *SPIE*, 1998, **3268**: 18~ 27
- 3 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~ 2769
- 4 A. Cutolo, F. Ferreri, T. Isernia *et al.*. Measurements of the waist and the power distribution across the transverse modes of a laser beam. *Opt. Quantum Electron.*, 1992, **24**(9): 963~ 971
- 5 A. Cutolo, A. Esposito, T. Isernia *et al.*. Characterization of the transverse modes in a laser beam: analysis and application to a Q-switched Nd:YAG laser. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(15): 2722~ 2733
- 6 Rolf Gase. The multimode laser radiation as a Gaussian Schell model beam. *Journal of Modern Optics*, 1991, **38**(6): 1107~ 1115
- 7 A. Starikov, E. Wolf. Coherent-mode representation of Gaussian Schell-model sources and of their radiation fields. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(7): 923~ 928
- 8 J. Pu. A simple procedure for tracing Gaussian Schell-model beams through optical systems. *Optik*, 1995, **99**(3): 120~ 122
- 9 H. Weber. Focusing and imaging of laser beams. *Opt. Commun.*, 1987, **62**(2): 124~ 126
- 10 A. Cutolo, T. Isernia, I. Izzo *et al.*. Transverse mode analysis of a laser beam by near- and far-field intensity measurements. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(34): 7974~ 7978
- 11 Laserscope UFF100, product of Prometec GmbH. Achen, Germany
- 12 David R. Whitehouse. The divergence and Strehl ratios of L-G multi-mode beams. *SPIE*, 1992**1834**: 86~ 97

- 13 David L. Wright. Status of ISO/TC 172/SC9/WG1 on standardization of the measurement of beam widths, beam divergence, and propagation factor. *SPIE*, 1992, **1834**: 2~ 17

## Measurement of Optical Parameters for High-power CO<sub>2</sub> Laser Beams According to the Changes of Transverse Intensity Distribution

Wang Zhiyong Chen Tao He Ping Zuo Tiechuan

(National Center of Laser Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract** According to the changing rule of transverse intensity distribution of blending-mode laser beam, and two arbitrary measured transverse intensity distributions, the optical parameters of high power CO<sub>2</sub> blending-mode laser beam are calculated by means of least squares method and iterative process.

**Key words** high-power CO<sub>2</sub> laser, blending-mode laser beam, transverse intensity distribution, beam quality

## LD 抽运 Cr, Nd·YAG 倍频输出 532 nm 绿光\*

我们用本所生长的掺 0.025 at.-% Cr 和 0.5 at.-% Nd 的 Cr, Nd·YAG 晶体作为激光增益介质, 在室温下获得了 532 nm 的绿光输出。实验中所用的 Cr, Nd·YAG 晶体的尺寸为 8 mm × 8 mm × 1.8 mm, Cr<sup>4+</sup> 在 1.064 μm 的吸收系数为 0.144 cm<sup>-1</sup>, Nd<sup>3+</sup> 在 808 nm 处的吸收系数为 2.6 cm<sup>-1</sup>。用脉冲 LD 作抽运源, 抽运光波长为 808 nm, 脉冲宽度为 2 ms, 重复率为 200 Hz, 输出的最大功率为 2 W, 占空比为 5:1。采用端面抽运方式, 抽运光直接入射到晶体上。Cr, Nd·YAG 晶体的两个面作为激光谐振腔, 设计为平-平腔, 晶体的输入面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜, 另一面镀 808 nm 高反膜和 1064 nm 反射率为 99% 的反射膜作为输出耦合镜。同时在激光腔外紧贴一块 KTP 作为倍频晶体。在室温下, 当输入功率为 1.3 W 时, 晶体实际吸收的抽运功率约为 1 W, 得到 0.4 mW, 脉宽为 6 ns, 重复率为 12.5 kHz 的自调 Q 532 nm 绿光输出, 测量所得激光光谱宽度(FWHM)为 0.2 nm, 而且输出的绿光为单横模。

下一步我们将生长浓度更高的 Cr, Nd·YAG 晶体而且采用腔内倍频进行激光实验以获得更高功率的 532 nm 激光输出, 有关工作正在进行中。

中国科学院上海光机所 上海 201800

董俊 李顺光 黄国松 邓佩珍 干福熹

收稿日期: 2000-11-08; 收到修改稿日期: 2000-11-13

\* 国家自然科学基金(6998806)和 863-416 资助项目。