

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0014-04

# 高功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器非稳腔的远场光束质量

王思雯<sup>1,2</sup> 郭立红<sup>1</sup> 李岩<sup>1</sup> 梁爽<sup>3</sup> 郭汝海<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049; <sup>3</sup> 长春理工大学, 吉林 长春 130033)

**摘要** 提出了一种远场光束质量相对测量和绝对测量相结合的测试方法, 测试高功率 1.4 kW 脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器在 335 m 处的光强分布, 并对测试结果进行了讨论分析。实验结果表明此方法是一种简单易行并且准确度很好的方法, 影响高功率非稳腔激光器远场光束质量最主要的因素为大气传输特性, 光斑强度分布出现平顶、破碎并出现旁瓣的现象, 为提高系统的优化设计及评估激光系统的作战效果提供了重要的参考价值。

**关键词** 非稳腔激光器; 远场光束质量; 发散角; 功率密度

中图分类号 TN248.2+2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0014

## Far-Field Beam Quality of High-Power Unstable Resonators TEA CO<sub>2</sub> Laser

Wang Siwen<sup>1,2</sup> Guo Lihong<sup>1</sup> Li Yan<sup>1</sup> Liang Shuang<sup>3</sup> Guo Ruhai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** A combination method between relative measurement and absolute measurement is presented, which obtain the distribution of optical intensity for a 1.4 kW pulsed TEA CO<sub>2</sub> laser in the distance of 335 m. Then the results of measurements are discussed and analyzed. The experimental results show that this approach is a good and precise and considers the influence of atmosphere which is the main factor. Flat top and fragmentation come forth in the distribution of optical intensity and furthermore appears one side lobe, which has very important reference value for evaluating the tactical effectiveness and optimization design of laser system.

**Key words** unstable resonator laser; far-field optical quality; divergence angle; power density

### 1 引言

高能强激光广泛应用于科研、工业和军事等领域, 其光束质量的精确计量对激光器性能的评价及激光武器系统的作战效能的评估至关重要<sup>[1~9]</sup>。非稳腔激光器由于能够产生高光束质量的激光而受到广泛的重视, 但是如何评价非稳腔输出光束的质量一直是激光研究者面临的一个重要问题。

非稳腔输出的激光束特性的理论和实验研究与

稳定腔相比还是不够完善的。高能激光在开放大气中长距离传输时, 由于受到一系列的线性效应和非线性效应的影响, 导致激光束的随机漂移和激光能量在光束截面上的重新分布(如扩展、畸变、破碎和弯曲等), 从而破坏了远场的光束质量。在激光军事与工程应用中, 为了准确地判断焦平面处的光束质量, 通常需要测得激光束的绝对空间能量分布, 从而得到激光束的总能量、光斑大小、光强分布等多种评

**基金项目:** 中国科学院知识新工程领域前沿资助课题。

**作者简介:** 王思雯(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事光电对抗和激光干扰等方面的研究。

E-mail: wangsiwen2001@163.com

**导师简介:** 郭立红(1964—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光对抗、计算机应用、天文惯导和星体自动化标校等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

价光束质量的参数。以往采用能量计和 CCD 直接测量的方法是不适用的<sup>[10]</sup>,因为在实际的强激光远场光强测试中,由于远场光斑直径较大,功率和能量密度变得较低,会造成超出能量计或功率计的探测灵敏度而无法探测。因此本文提出一种远场光斑相对测量和绝对测量相结合的测试方法,以便获得非稳腔高能激光器更加接近真实的绝对空间光强分布。

## 2 非稳腔输出光束的远场分布

实验所用非稳腔为正分支的虚共焦型,原理结构如图 1 所示。

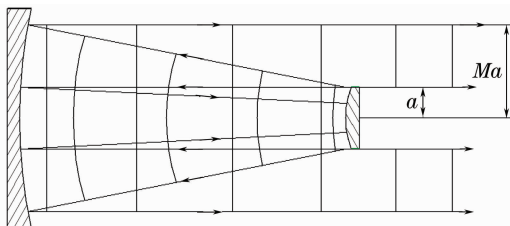


图 1 正分支虚共焦非稳腔

Fig. 1 Virtual focus unstable resonator of positive branch

此非稳腔的两球面反射镜的焦点重合轴上,共轭像点一个位于公共焦点  $F$ ,一个位于无穷远处。非稳腔的主要参数见表 1。

表 1 非稳腔参数

Table 1 Parameters of unstable resonator

Gear mirror /mm	Output mirror /mm	Cavity length /mm	Magnifying rate $M$ & equivalent Fresnel number $N_{eq}$
6500	3250	1600	$M=2$ $N_{eq}=2.38$

非稳腔输出的光束为环状光束即空心光束,这是一种在传播方向上中心光强为零的光束。

玻恩在光学原理一书中,讨论了环孔光学系统的分辨率,得出环孔光束远场衍射光强分布

$$I(\theta) = \frac{1}{(1 - \epsilon^2)^2} \left[ \frac{2J_1(k\theta a)}{k\theta a} - \epsilon^2 \frac{2J_1(k\epsilon\theta a)}{k\epsilon\theta a} \right]^2 I_0, \quad (1)$$

其中  $a$  为圆环外径,  $\theta$  为远场发散角,  $\epsilon$  为遮拦比,  $k$  为波数,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $I_0 = |C|^2 \pi^2 a^4 (1 - \epsilon^2)^2$  为衍射光斑峰值强度,

$$C = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{E}{\pi a^2 (1 - \epsilon^2)}},$$

$E$  为光束总能量,  $R$  为衍射孔到屏的距离。

由(1)式得到此虚共焦非稳腔环孔激光光束远场衍射特性,结果如图 2 所示。

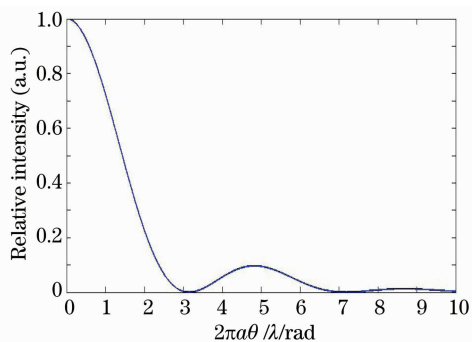


图 2 非稳腔远场光强分布

Fig. 2 Optical intensity distribution of unstable resonator

定义在图 2 的光强分布图上光强的第一个极小值时(即相对强度为零)  $\theta$  的值为内角半径。图中最小的内角半径  $x = 3.15$ ,  $\theta$  为远场发散角半径(半角),它的理论值可以计算得到

$$\theta = \frac{x}{ka} = \frac{3.15 \times 10.6 \times 10^{-3}}{2 \times 3.14 \times 18} = 2.95 \times 10^{-4}. \quad (2)$$

## 3 远场功率密度的测量与分析

### 3.1 实验方案

目前对于激光远场功率密度的测量,通常利用 CCD 相机对漫反射板进行拍照,通过图像处理的方法得到激光光场能量的分布。但此种方法只可以测量能量的相对分布,无法得到绝对的功率分布。本实验方案试图解决这个问题,能够测量激光远场绝对的功率分布。

本系统主要用于对激光发射系统远场激光的功率密度分布进行测试与评估。系统主要由 CCD 相机、主控计算机、激光靶板以及激光功率测试箱、光斑测试拟合软件等部分组成,如图 3 所示。

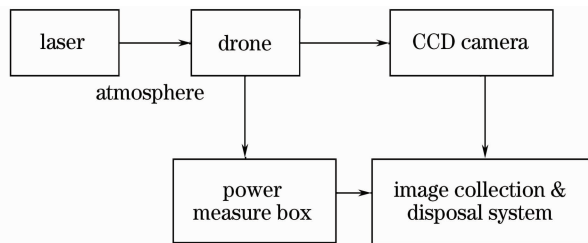


图 3 激光远场测试系统组成示意图

Fig. 3 Scheme of laser far-field measurement system

激光器以一定的频率照射位于一定距离外的靶板,光脉冲经靶板漫反射,再经像机镜头前的滤光片、衰减片及光学镜头成像于 CCD 光敏面,图像采集卡将 CCD 摄像机输出的光斑视频图像采集到计算机储存,然后对图像数据进行处理,得到激光能量

密度的相对分布。激光功率测试箱配合 CCD 相机使用,通过对靶板上一系列特定点功率的测量来对 CCD 相机得到的图像灰度值进行标定,确定出图像灰度与激光能量(密度)之间的对应关系,从而获取整个光斑空间能量密度分布。

激光功率测试箱可以用于外场测量并可以提供相当于实验室的暗箱环境,这样做的目的是屏蔽外界背景光和空气流动对探测结果造成的影响。而且此测试箱装有导轨和光学支架,方便透镜及探测器等设备位置上的精确调整。

实验中需要对漫反射板标定测试位置,方案根据不同距离给出不同测试位置标定在漫反射板上,为此制作了激光功率测试靶板,大小和漫反射板大小相同,在上面打了 361 个固定螺孔,为  $19 \times 19$  的排列方式,设左上角为原点,则右下角坐标为 (20, 20),如图 4 所示。

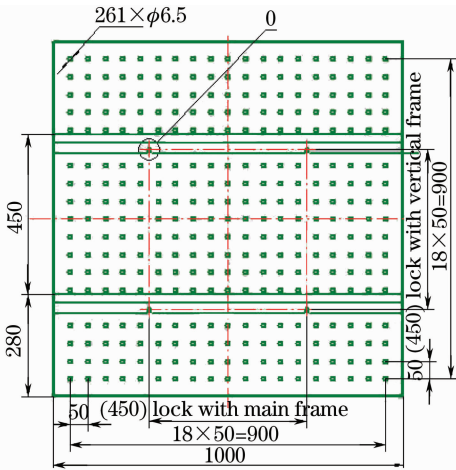


图 4 靶板测试点定标图

Fig. 4 Drawing of locating point in target board

### 3.2 试验结果与分析

激光器和漫反射板的距离为 335 m, CCD 和漫反射板的相对位置如图 5 所示。

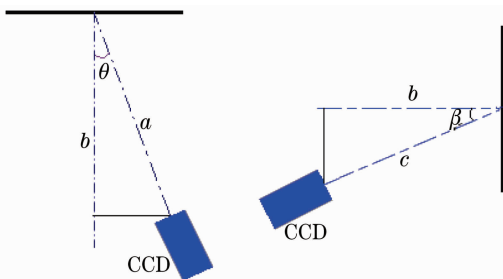


图 5 CCD 和靶板的相对位置

Fig. 5 Relative location between CCD and target board  
水平夹角  $20^\circ$ , 仰角  $5^\circ$ ,  $a = c = 2.9 \text{ m}$ ,  $b = 2.5 \text{ m}$ , CCD 记录的光斑形状与大小如图 6 所示。

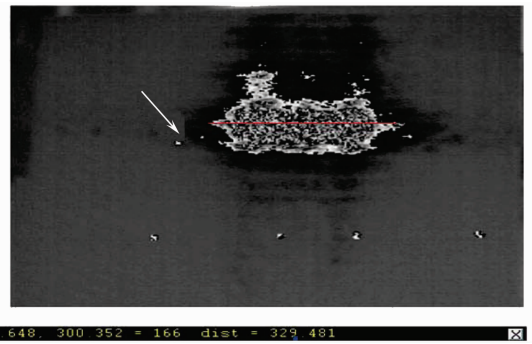


图 6 CCD 记录的光斑图像

Fig. 6 CCD recording image

利用图像处理软件对图像进行处理,图 6 中箭头所指长度记为光斑的长,图的左下角记录了此距离  $d = 329.481$  (即 330 pixel),同样方法,光斑的高度为 140 pixel,至此可知此光斑为 330 pixel  $\times$  140 pixel。由于使用  $1\text{m} \times 1\text{m}$  的漫反射板接收光斑,且 CCD 视场正好包含漫反射板宽度边缘,其接收图像尺寸为 1024 pixel  $\times$  768 pixel,据此对应关系,可以确定光斑尺寸为 32 cm  $\times$  18 cm,由此可得此激光的远场发散角为  $0.96 \text{ mrad} \times 0.54 \text{ mrad}$ 。

由于 CCD 视场正好包含漫反射板宽度边缘,高度未全包含,而成像像素为 1024 pixel  $\times$  768 pixel,漫反射板宽度 1 m,可知 CCD 视场覆盖  $1\text{m} \times 0.75\text{m}$  的漫反射板。已测得激光出口处输出:平均 7.0 J,光斑大小为:35 mm  $\times$  35 mm,能量密度:0.57 J/cm<sup>2</sup>,测试靶板螺孔半径 6 cm。表 2 为测量多点后图像与所测数据的匹配结果。

表 2 图像与所测数据匹配参数

Table 2 Matching parameters of image and measuring data

Coordinate	Power /W	Corresponding coordinate in image	Corresponding /pixel	Power density /(W/m <sup>2</sup> )
(6,9)	1.9	(307,345)	65	168
(6,10)	1.3	(307,384)	50	115
(6,11)	1.8	(307,422)	70	159

由于大气湍流的作用,会使每次的脉冲光束偏离原来的传播方向,从而造成靶面上光斑的随机漂移。由于散射体的衍射作用,光斑的直径也会扩大。如果在强湍流下,光斑还会分裂成多个随机斑点,不再保持原有的形状,这都会对后期的测量造成一定的误差。采用光斑复原的方法,试图还原真实的光斑空间光强分布,并和采用光束质量分析仪记录的光斑形状进行对比。图 7 给出了考虑匹配系数后的光强分布三维图和实际记录的光斑三维分布图。

从图 7 中可以看出此光斑功率集中于中心位

置,由于大气湍流的影响分布不均匀且在边缘存在较强的衍射峰值,即出现了旁瓣现象。由于大气的影 响光斑同时出现了光轴漂移,偏离了中心的靶面位置。通过表中数据和 CCD 记录的光斑相对分布的灰度值进行复原,如图 7(a)和实测图(图 7(b))三

维光强分布相当吻合,说明本文提出的实验方案能够满足对高功率激光远场光斑分布测量的要求,是一种简单易行且精度较高的方法。通过此复原图并进行最小二乘拟合可知到达靶板的总功率为 1.21 kW,即 335 m 处大气透过率为 86.8%。

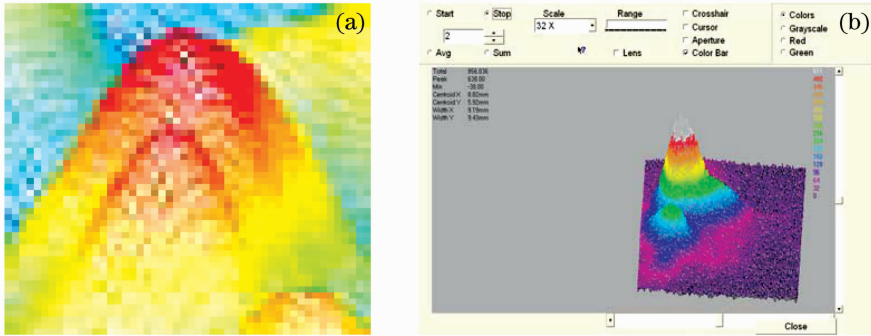


图 7 远场光强三维分布对比图。(a)光强分布复原图;(b)实测光强分布图

Fig. 7 Comparing images of 3D far-field optical intensity. (a) Resuming image of optical intensity; (b) measuring image of optical intensity

## 4 结 论

根据激光军事与工程应用中对焦平面处的光束质量需要准确判断的要求,提出了一种远场光斑相对测量和绝对测量相结合的测试方案。首先给出了非稳腔输出光束远场分布的理论模型及光束的传输特性,通过实验与理论分析得到了高功率非稳腔激光器更加接近真实的绝对空间光强分布。实验结果表明影响高功率非稳腔激光器远场光束质量最主要的因素为大气传输特性。这对于评估此激光系统的远场作战效果及系统的优化设计提供了重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman, S. Townsend. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4): 1212~1217
- 2 P. Belanger, Y. Champagne, C. Pare. Beam propagation factor of diffracted laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **105**(3~4): 233~242
- 3 Wang Yunping, Huang Jianyu, Qiao Guanglin. A method for evaluating high energy laser beam quality[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(10): 1029~1033  
王云萍,黄建余,乔广林. 高能激光光速质量的评价方法[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(10): 1029~1033
- 4 Cheng Cheng, Ma Xingchao, Xu Zhousu *et al.*. Measurement of temporal depending lasing modes of a high power transverse-flow CO<sub>2</sub> laser processor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 549~554  
程 成,马行超,许周速 等. 高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光横模随时间变

- 化的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 549~554
- 5 Wan Daping, Wang Yumin, Gui Zhenxing *et al.*. A novel method for stability analysis and design of laser folded cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1217~1221  
王大平,王裕民,归振兴 等. 一种激光折叠腔稳定性分析及设计的新方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(09): 1217~1221
- 6 Hong Lei, Li Lijun, Ju Chunlei. Design of optical resonator of folded quasi-sealed-off CO<sub>2</sub> laser unit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 792~794  
洪 蕾,李力钧,鞠春雷. 折叠式准封离型 CO<sub>2</sub> 激光器的光学谐振腔设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 792~794
- 7 Wang Xubao, Wu Qiang, Chen Jimin *et al.*. Study of beam quality and focus of frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1169~1172  
王旭葆,武 强,陈继民 等. KTP 晶体环形腔外腔倍频 Nd:YAG 激光光束特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1169~1172
- 8 Ma Haixia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. A novel resonator to improve the laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11): 977~980  
马海霞,楼祺洪,董景星 等. 一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 977~980
- 9 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1625~1628  
李立波,楼祺洪,周 军 等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 10 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 583~586  
曹一磊,高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参数测量系统精度分析[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 583~586
- 11 Born M, Wolf E. Principles of Optics (fifth edition)[M]. Oxford: Pergamon Press, 1975