

大功率 TEA CO₂ 非稳腔激光器的远场传输特性

王晓铭¹, 郭 劲², 郭汝海^{2*}, 王挺峰²

(1. 海军驻上海地区航天系统军事代表室, 上海 201109;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大功率激光器的远场传输特性,提出了一种测量 TEA CO₂ 远场光束传输特性的新方法,该法采用相对测量和绝对测量相结合的方式来获得高能激光器的绝对空间光强分布。利用该方法测试了 2 kW 脉冲 TEA CO₂ 非稳腔激光器在 500 m 处的光强分布,并对测试结果进行了分析讨论。实验结果表明,此方法简单、易行,准确度较高,而且测量过程中考虑了大气湍流的影响,光斑强度相对分布上出现了平顶、破碎并出现旁瓣现象,实测大气透过率为 81.5%,最大功率密度为 1.59 W/cm²,光束的横向远场发散角达到 0.64 mrad,基本与理论计算结果相吻合。本研究将为评估激光系统的应用效果及系统的优化设计提供重要的参考。

关键词:非稳腔激光器;光束传输特性;发散角;功率密度分布

中图分类号:TN248.92 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120506.0671

Far-field transmittance characteristics of high-power unstable resonator TEA CO₂ laser

WANG Xiao-ming¹, GUO Jin², GUO Ru-hai^{2*}, WANG Ting-feng²

(1. *Aerospace Commissary of Navy in Shanghai, Shanghai 201109, China;*

2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

** Corresponding author, E-mail: hitgrh@163.com*

Abstract: A new method combining relative measurement and absolute measurement is proposed to measure the transmittance characteristics of far-field beam quality of TEA CO₂ lasers, and the intensity distribution for a 2 kW pulsed TEA CO₂ laser in the distance of 500 m is obtained. The measurement results are discussed and analyzed. The experimental results show that the measurement is convenient and precise, and the influence of atmospheric turbulence is also taken into consideration. Flat top, fragmentation and furthermore side lobe appear in the intensity distribution. Measured by this method, the transmission rate of atmosphere is 81.5%, the

收稿日期:2012-10-08;修订日期:2012-11-23

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115123);激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究课题资助项目(No. SKLLIM1004-01);院地合作长吉图专项基金资助项目(No. 2011CJT0006)

maximum intensity is 1.59 W/cm^2 and the divergence angle of cross direction is up to 0.64 mrad , which agree with the theoretical results. It is a very important reference for evaluating the effectiveness and optimization design of laser systems.

Key words: unstable resonator laser; beam transmittance characteristic; divergence angle; power density distribution

1 引言

大功率 TEA CO_2 激光已经广泛地应用于科研、工业和军事等领域,其远场光束传输特性的精确计量对激光器性能的评价及激光定向发射系统效能的评估至关重要^[1-3]。由于非稳腔激光相比稳腔激光可以利用更大的模体积,产生低阶模的高斯光束,因而被广泛应用于大功率激光器中,如化学氧碘激光器(COIL)、氟化氙(DF)激光器等^[4-5]。

与稳定腔相比,非稳腔输出激光束特性的理论和实验研究尚不够完善^[6]。非稳腔的大功率激光在开放大气中长距离传输时会受到一系列线性效应和非线性效应的影响;另外 TEA CO_2 激光的波长为 $10.6 \mu\text{m}$,具有较强的衍射效应,这也会导致远场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),从而破坏远场的光束质量。因此,评价非稳腔激光器输出的环形光束或者中空矩形光束的远场光束传输特性,是激光研究者面临的重要课题。

在激光工程应用中,为了准确地评价远距离目标处的光束传输特性,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、光强分布等多种评价光束传输特性的参数。以往采用能量计和 CCD 直接测量的方法已经不适用了^[7],因为在实际的强激光远场光强测试中,远场光斑直径较大,功率和能量密度变得较低,如超出能量计或功率计的探测灵敏度便无法完成探测。另外,CCD 成像方法读出电路的噪声、背景暗电平以及光束强度起伏的噪声也会叠加到真实光斑上,引入较大的测量误差^[8]。为此,本文提出一种针对大功率非稳腔激光的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。文中给出了高能激光远场的发散角的理论计算结果并进行了远场实验及实验结果分析。

2 非稳腔输出光束的远场分布

实验采用正分支虚共焦型非稳腔,原理结构如图 1 所示。

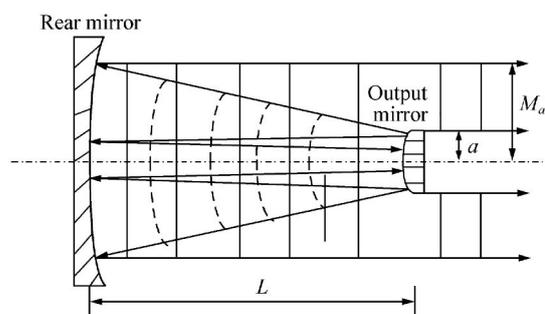


图 1 正分支虚共焦型非稳腔

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于轴上,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

Parameters	Values
Curvature of rear mirror/mm	6 500
Curvature of output mirror/mm	3 250
Length of resonator/mm	1 600
Magnified factor M	2
Equivalent Fresnel number N_{eq}	2.38

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

假设激光发射窗口函数为:

$$P(\alpha, \beta) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{M_a}\right) - \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{a}\right), \quad (1)$$

式中, (α, β) 为发射窗任一点 P 的空间坐标, a 为窗口中心遮拦半径, M_a 为发射窗的半径, $\text{circ}(\frac{\rho}{a})$ 是半径为 a 的圆域函数, $\rho = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 为径向坐标, 此激光器的遮拦比 $\varepsilon = 1/M$ 。非稳腔的三维光强分布如图 2 所示。

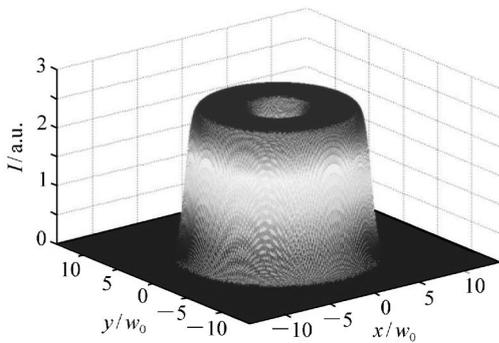


图2 非稳腔激光三维光强分布

Three-dimension intensity distribution of unstable resonator

波恩在《光学原理》一书中讨论了环孔光学系统的分辨率, 得出了环孔光束远场衍射光强分布^[9]:

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

式中: a 为圆环半径(相当于图 1 中的 M_a), θ 为远场发散角, ε 为遮拦比, k 为波数, J_1 为一阶贝塞尔函数, $I_0 = |C|^2 \pi^2 a^4 (1 - \varepsilon^2)^2$ 为衍射光斑峰值强度, 其中 $C = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{E}{\pi a^2 (1 - \varepsilon^2)}}$, E 为光束总能量, R 为衍射孔到屏的距离。

根据式(2)讨论了此虚共焦非稳腔环孔激光光束远场衍射特性, 结果如图 3 所示。这里定义图 3 中光强的第一个极小值(即相对强度为零)对应 θ 的值为内角半径。图中最小的内角半径

$x = 3.15$, θ 为远场发散角半径(半角), 可以计算得到它的理论值:

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

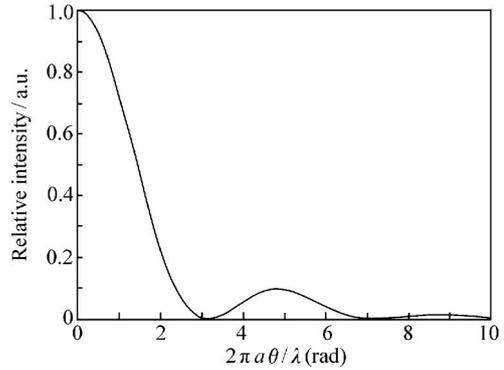


图3 非稳腔远场光强分布

Intensity distribution of unstable resonator in far field

考虑大气的影响, 主要是大气湍流引起的光束传输过程中的波前畸变, 根据 Zernike 像差系统协方差可以得到满足 Kolmogorov 谱统计规律的随机相位屏^[10-11]。根据随机相位屏理论, 通过傅里叶光学原理得到远距离光束传输后的光强分布, 如图 4 所示。对比图 3 可以看到, 湍流使非稳腔远场光强分布中心强度降低, 并出现多个中心峰值的情况, 光强分布变得不对称, 整个光束出现展宽的现象。

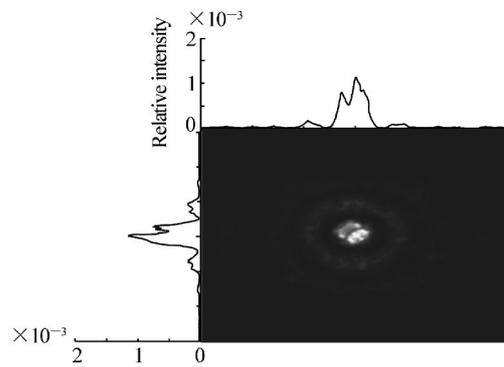


图4 湍流对非稳腔激光器远场光束光强分布的影响

Influence of turbulence on intensity distribution of unstable resonator in far field

3 远场光束传输特性的测量与分析

3.1 实验方案

目前对于激光远场光束光强分布的测量,通常利用 CCD 相机对漫反射板进行拍照,采用图像处理的方法得到激光光场的分布情况。但此种方法只可以测量光场的相对分布,无法得到绝对的光强分布。本文提出的实验方案解决了这个问题,完成了激光远场绝对光强分布特性的测量。

本系统主要用于对激光发射系统远场激光的光场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 5 所示。

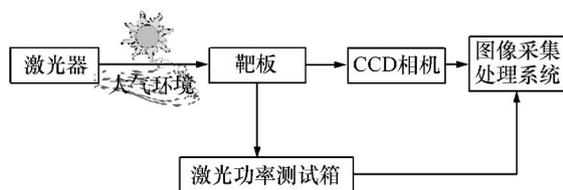


图 5 激光远场测试系统组成示意图

Fig. 5 Schematic diagram 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对 CCD 相机所获图像的灰度值进行标定,确定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。

激光功率测试箱是本实验的关键设备之一,用于外场测量并可以提供相当于实验室的暗箱环境,以屏蔽外界背景光和空气流动对探测结果造成的影响。测试箱装有导轨和光学支架,用于透镜及探测器等设备位置的精确调整(见图 6)。其中的反射镜的反射率、透镜的透过率及旋转衰减片的衰减率都需要事先给出标定。

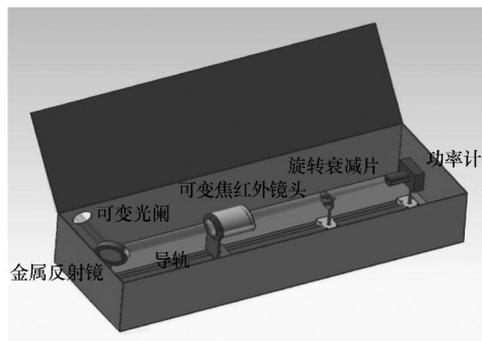


图 6 激光功率测试箱

Fig. 6 Measurement box of laser power

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,其大小和漫反射板大小相同,以 19×19 的排列方式开了 361 个 $\Phi 6.5$ mm 通孔,孔间距为 50 mm,如图 7 所示。

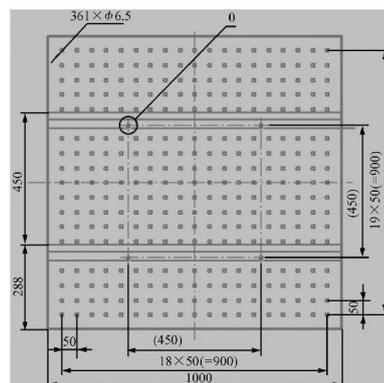


图 7 靶板测试点定标图

Fig. 7 Drawing of locating point in target board

3.2 结果与分析

激光器与漫反射板的距离为 500 m, CCD 与漫反射板的相对位置如图 8 所示。

水平夹角为 20° , 仰角为 5° , $a = c = 2.9$ m, $b = 2.5$ m, CCD 记录的光斑形状与大小如图 9 所示。

利用图像处理软件对图像进行处理,考虑了 CCD 相机相对于靶板的倾斜,记录光斑的宽度和高度为 $330 \text{ pixel} \times 140 \text{ pixel}$ 。由漫反射板的空间对应关系可以确定光斑尺寸为 $32 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$,由此可得激光的远场发散角为 $0.64 \text{ mrad} \times$

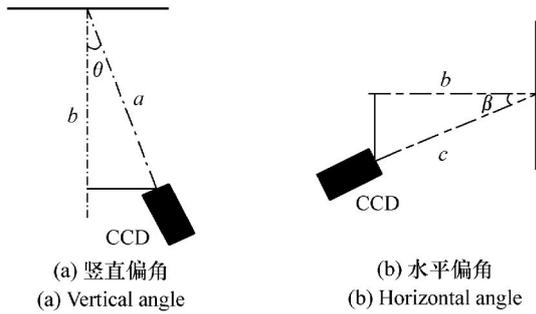


图8 CCD与靶板的相对位置

Fig. 8 Relative location between CCD and target board

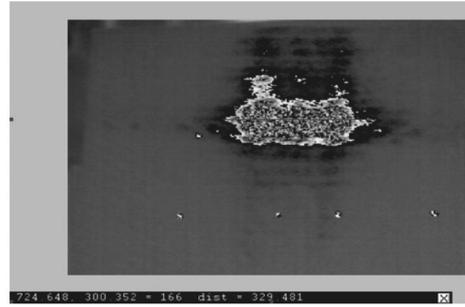


图9 CCD记录的光斑图像

Fig. 9 Laser spot image recorded by CCD

0.36 mrad。通过式(3)计算得到理论的发散角为0.59 mrad,可以看到实验测得的光斑不完全对称,测得的发散角略大于理论计算值,这主要是由于大气湍流对光束起到的展宽作用;而水平方向和垂直方向发散角的不对称主要是由于谐振腔针板放电结构不对称以及发射窗口镜垂直的两根支撑杆的衍射效应造成的。

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1 024 pixel × 768 pixel,漫反射板宽度为1 m,可知CCD视场覆盖1 m × 0.75 m的漫反射板。表2为3点同时测量后,光斑图像与所测实验数据的对应结果。测量的实验数据选择为光斑图像中心最亮处,可以认为此处激光光强最大。

表2 图像与所测数据对应关系

Table 2 Relation between image and measuring data

Coordinate	Power/W	Corresponding coordinate in image	Pixels	Intensity/(W · cm ⁻²)
(6,9)	1.80	(307,345)	65	1.59
(6,10)	1.25	(307,384)	50	1.43
(6,11)	1.72	(307,422)	70	1.41

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。由于衍射作用,光斑的直径也会扩大。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带来一定的影响,因此,本文采用光斑复原的方法,还原了真实的光斑空间光强分布,并与理论计算的光斑形状(如图4所示)进行对比。图10给出了相对测量及绝对测量相结合的光强分布三维图。



图10 远场光强三维分布复原图

Fig. 10 Three-dimension far-field optical intensity

从图10可以看出,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,与理论计算的图4结果相吻合,同时在边缘出现了次极小峰值。实验结果说明:所提出的实验方案能够满足对大功率激光远场光束光强分布测量的要求,

是一种简单易行且符合理论预期的方法。通过对此复原图进行最小二乘拟合可知,到达靶板的总功率为1.63 kW,即500 m处大气透过率为81.5%。

4 结 论

由于激光工程应用要求准确判断大功率非稳腔激光光束传输特性,本文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 TEA CO₂输出光束远场分布的理论模型及光束经过大气湍流的传输特性,通过实验与

理论分析得到了大功率非稳腔激光器更加接近真实的绝对空间光强分布。理论和实验结果表明:影响大功率非稳腔激光器远场光束远场传输特性的主要因素为:(1)非稳腔的结构(影响发散角);(2)大气传输特性,主要是湍流效应(影响激光的透过率和光束对称性分布)。实验结果对此类激光系统的评估及优化设计提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] SIEGMAN A E, TOWNSEND S. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, 29:1212-1217.
- [2] BEIANGER P, CHAMPAGNE Y, PARE C. Beam propagation factor of diffracted laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 1994, 105:233-242.
- [3] WANG Y P, HUANG J Y, QIAO G L. A method for evaluating high energy laser beam quality[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, 12:1029-1033.
- [4] 郭汝海. 化学氧碘激光器(COIL)的研究进展[J]. *光机电信息*, 2010, 27(5):22-28.
GUO R H. Development review of chemical oxygen-iodine lasers(COIL)[J]. *OME Information*, 2010, 27(5):22-28. (in Chinese)
- [5] 郭汝海, 施龙, 王思雯, 等. HF/DF 化学激光器的研究进展[J]. *光机电信息*, 2010, 27(3):30-35.
GUO R H, SHI L, WANG S W, *et al.*. Development review of HF/DF chemical lasers[J]. *OME Information*, 2010, 27(3):30-35. (in Chinese)
- [6] 刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998, 25(3):193-196.
LIU Z J, LU Q SH, ZHAO Y J. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. *Chinese J · Lasers*, 1998, 25(3):193-196. (in Chinese)
- [7] 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.
CAO Y L, GAO CH Q. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5):583-586. (in Chinese)
- [8] MA X Y, RAO CH H, ZHENG H Q. Error analysis of CCD-based point source centroid computation under the background light[J]. *Opt. Express*, 2009, 17:8525-8541.
- [9] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics*[M]. 4th ed. Oxford: Pergmon Press, 1975.
- [10] REPASI E, WEISS R. Analysis of image distortion by atmospheric turbulence and computer simulation of turbulence effects[J]. *SPIE*, 2008, 6941:69410S.
- [11] TIAN Y Z, GUO J, WANG R, *et al.*. Mathematical model analysis of Gaussian beam propagation an arbitrary thickness random phase screen[J]. *Opt. Express*, 2011, 19:18126-18228.

作者简介: 王晓铭(1962—), 男, 浙江杭州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事武器系统总体设计等方面的研究。

郭 劲(1964—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电对抗等方面的研究。

E-mail: guojin1964@126.com

郭汝海(1976—), 男, 辽宁大连人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光器设计及光束控制等方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com

王挺峰(1977—), 男, 山东文登人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光应用技术等方面的研究。

E-mail: wtfeng@sina.com