

化学氧碘激光远场发散角时间分辨测量^{*}

唐 淳 夏 森 丁有义 江孝国 杨成龙

(中物院流体物理研究所, 成都523信箱59分箱 610003)

摘 要 介绍一种高功率激光远场发散角时间分辨测量的实验装置, 对千瓦级连续氧碘激光的远场发散角进行了测量, 给出了实验结果, 并对这些结果进行了初步分析和讨论。

关键词 化学氧碘激光 远场发散角 时间分辨测量

ABSTRACT An experiment setup of far field divergence angle time-resolved measurement for the high power lasers are described in this paper. The far field divergence angle of kW level CW oxygen iodine laser are measured. Finally the experiment results and analyses are presented.

KEY WORDS chemical oxygen iodine laser, far field divergence angle, time-resolved measurement

0 引 言

远场发散角是高功率激光器的重要性能参数。它是验证、改进激光系统设计, 进行光束变换及实际应用的必要依据。目前有的光束质量检测装置, 测量的都是激光输出过程中某一时刻的光束束径, 远场发散角, 或仅能测量一个积分光斑。此种方法确定的参数无法反映激光的时间特性。在研制千瓦级连续波化学氧碘激光器(COIL)过程中, 实验发现存在明显的光斑漂移现象, 这对激光定向传输极为不利。因此, 精确测量氧碘激光远场发散角时间分布, 定量研究激光光斑漂移有重要的意义。由于COIL激光的能量较高, 且是不可见的, 进行光束参数测量较为困难。本文采用转镜扫描和光电二极管制作的64元线阵探测器, 探测光斑能量分布的方法, 对千瓦级连续波化学氧碘激光器的远场发散角进行时间分辨测量。

1 实验装置及测量原理

对于低功率激光器, 国际标准化组织(ISO)已提出一套光束质量标准草案^[1]。草案规定, 以强度二阶矩表示束宽, 以 M^2 表示光束质量。标准草案的基本好处是光束束宽定义符合光束传输方程, 知道光束质量后, 就可以根据传输方程计算任何一处的光束束宽。另一好处是 M^2 为常数, 传输变换过程不会改变。但对于硬边非稳腔高能激光, 目前尚无统一的光束质量标准。由于非稳腔光束有陡边存在, 二阶矩不收敛, 无法定义光束束宽^[2]。当然对光束作适当处理, 例如滤掉能量含量很低的高空间频率分量, 用二阶矩定义束宽是可以执行的。有的文章提出用加权高斯函数滤波, 以得到光束辐照度分布的矩函数^[3]。但需要对滤波方法或截去的能量百分比作统一规定。在国内外未作这种规定以前, 我们以平面波夫琅和费衍射图样第一暗环(即84%能量含量)定义远场光斑直径。

* 国家863激光技术领域资助课题。
1996年5月2日收到原稿, 1996年11月12日收到修改稿。
唐淳, 男, 1967年1月出生, 助理研究员, 硕士。

为了测量激光束远场发散角随时间的变化,我们研制了如图1照片所示红外激光远场发散角检测仪。仪器结构原理如图2所示。它由高精度缩束光学系统、转镜、线阵光电探测器、图象采集存储和计算机控制处理系统组成。缩束光学系统由前后两组透镜组成,前组为正透镜,焦距400mm,后组为负透镜,焦距120mm,光学间隔可调,以改变组合焦距,扩大发散角测量范围。转镜面积为30mm×30mm,反射率90%,由马达驱动,转速在2~10r/s以内可调。线阵光电探测器由64路通讯光纤及与之相耦合的锗PN管组成。光纤外径125mm,芯径50mm,占空比1:2.5,64路光纤组成8mm长的线阵,1mm可分辨8个点。图象采集系统由跟随器,模拟开关,并路器,可调倍率放大器,A/D变换器和图象存储器组成,CPU控制这些部件的工作时序,进行图象采集和存储工作。存储器的容量为15幅图象,每幅图象为64×128×8bit。由计算机控制仪器工作和处理图象数据。

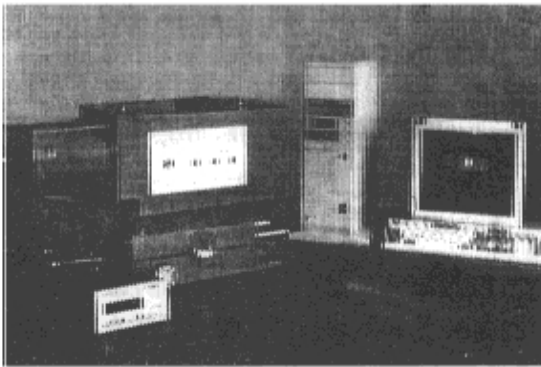


Fig 1 Infrared laser far field divergence angle time-resolved measuring apparatus
图1 红外激光远场发散角时间分辨检测仪

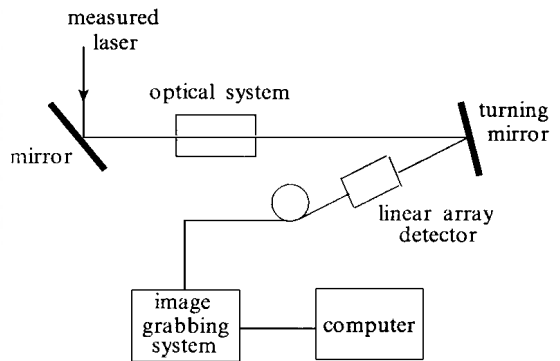


Fig 2 Experiment Setup.
图2 实验装置

被测激光束通过取样片后射入缩束镜,经转镜反射,使光斑扫过光纤线阵。通过控制转速和线阵到转镜的距离,确定光斑在光纤线阵上的扫描速度。被测激光束通过缩束系统,束径控制在2~5mm以内,扫过线阵探测器的时间小于1ms。转镜每转一圈,光纤线阵上就扫过一个光斑,存储器记录一个光斑图象。在转镜转速为7.4r/s时,转一圈的时间为135ms,也就是说每隔135ms测试仪对被测激光束取一次样,取样时间为1ms。仪器是以扫描方式测量光斑强度分布,而不是记录每幅瞬间静止图象,如果在1ms内激光束的功率和强度分布发生变化,仪器就失去测试意义。因此,在1ms时间内,激光束的功率大小和强度分布可视为不变,这是仪器设计的基础。取样间隔时间就是仪器的时间分辨率。在相隔135ms以上的光束参数变化可以被测出来。仪器总的测试时间是2s。这由存储15幅图象的存储器决定。增加存储器容量可以延长测试时间,当然降低转速延长取样间隔,也可以增加仪器工作时间,但降低了时间分辨率。另外,仪器备有6个光纤触发通道。如图3所示,6个光纤相隔1mm,均匀排列在8mm光纤线阵的旁边,确保可靠触发。当被测激光束扫到触发光纤,触发光纤探测到信号,就触发图象采集器上的CPU,开始1幅图象的A/D变换和图象存储。

探测器位于光学系统焦平面上,扫描探测光斑能量分布 $I(x, y)$ 。光斑重心由能量分布一阶矩确定。

$$\bar{x} = \frac{\iint I(x, y) dx dy}{\iint (x, y) dx dy}, \quad \bar{y} = \frac{\iint I(x, y) dx dy}{\iint (x, y) dx dy} \quad (1)$$

以重心为中心, 包含84% 能量时的直径为束径 $d_{F,0.84}$, 则远场发散角为

$$\theta_{F,0.84} = d_{F,0.84}/f \quad (2)$$

f 是光学系统的焦距。测得的远场发散角与激光束出腔束径的标准平面波衍射极限发散角之比定义为衍射极限倍数

$$\beta = D \theta_{F,0.84}/2.44\lambda \quad (3)$$

式中 D 是激光束出腔束径, λ 为激光波长。以第一幅光斑重心为参考点, 光斑重心跳动量可表示为:

$$\Delta\theta_x = \frac{\bar{x}_{ci} - \bar{x}_{c1}}{f}, \quad \Delta\theta_y = \frac{\bar{y}_{ci} - \bar{y}_{c1}}{f} \quad (4)$$

式中 $i = 2, 3, \dots, 15$ 。

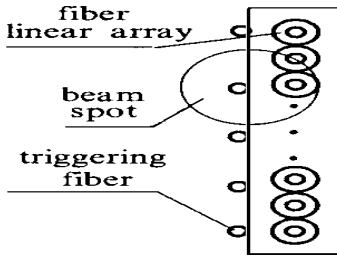


Fig 3 Laser spot scanning

fiber linear array

图3 激光光斑扫过光纤线阵示意图

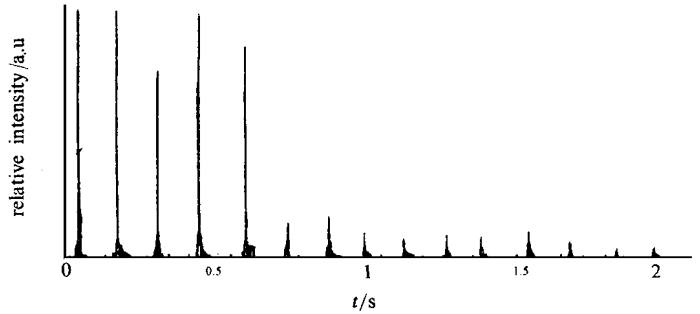


Fig 4 Intensity section distribution of 15 beam spots

图4 15个光斑能量分布剖面图

2 实验测量及结果分析

我们用该仪器对非稳腔千瓦级连续氧碘激光器光束质量进行了测量, 图4是激光单发试验过程中所测得的15个光斑能量分布剖面图, 表1给出了测试结果。计算中 D , λ 分别为光束口径和激光波长。

通过上面的测试结果分析, 可得如下结论:

1. 焦平面上光斑重心随时间不断变化, 也即光束指向角不断变化。指向角变化达几毫弧度, 15幅均差也接近 1 m rad 。这是非常严重的。对于激光束远距离传输, 这种时间不稳定性造成积分光斑扩散, 就相当激光束发散角增大, 造成靶面上功率密度降低。

2. 光束质量随时间变坏。其一, 激光单发试验中, 15个光斑中前几个光斑光束质量好, 后来发散角就增大了, 且增大一倍以上。其二, 远场光斑峰值功率随时间变化, 前五个光斑峰值功率高, 第六个光斑开始减小。有的是前六个光斑高, 第七个光斑减小。多发实验结果中, 出现这种光斑峰值功率下降现象的时刻比较一致, 大约在 $0.8 \sim 1 \text{ s}$ 之间。但近场检测功率时, 在 2 s 内并没有减小现象, 2 s 后才有逐渐减小的趋势。那么如何解释这种远场光斑峰值功率减小现象呢? 功率随时间下降存在多种原因: 一方面是因为激光器工作参数的不稳定性, 如碘流量的变化, 水蒸汽对激发态碘的猝灭, 以及腔压升高, $\text{O}_2(\Delta)$ 浓度下降。另一方面, 这是光束质量变坏的

反映。图5表示Nd:YAG非稳腔激光器光束质量随输出功率增大而变坏情况^[4]，在输出功率大于400W后，光束质量变坏速度加快，输出功率大，激光介质和激光腔热畸变严重，因此光束质量差。氧碘激光器在单发工作中，随工作时间延长，热积累增大。与固体激光器不同的是，氧碘化学激光器的激光介质是流动的，热积累主要引起腔镜，特别是密封窗口和输出镜的变

表1 实验结果

Table 1 Experiment results*

$d_{F,0.84}$	$\theta_{F,0.84}$	β	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\hat{\Delta}\theta_x$	$\hat{\Delta}\theta_y$	σ_x	σ_y
0.589	0.442	5.51	0.000	0.000				
0.576	0.432	5.39	-1.030	0.094				
0.358	0.268	3.34	-1.410	-0.281				
0.559	0.419	5.22	-1.410	-0.188				
0.611	0.459	5.72	0.000	-0.375				
1.118	0.838	10.45	-1.219	-0.938				
1.299	0.974	12.15	-1.500	-2.250	1.67	0.97	1.08	0.68
1.125	0.844	10.52	-3.000	-1.406				
1.100	0.825	10.29	-3.563	-1.688				
0.776	0.582	7.26	-3.282	-1.500				
1.019	0.764	9.53	-1.969	-1.313				
1.393	1.045	13.03	-0.938	-1.125				
1.046	0.785	9.79	-1.782	-1.219				
1.085	0.814	10.15	-1.219	-1.219				
1.418	1.063	13.26	-2.719	-1.125				

* In Table 1, unit of angle is mrad and the unit of spot diameter is mm. $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \sigma_x, \sigma_y$ represent the mean value and variance of centroid drift of 15 spot in x, y direction, respectively.

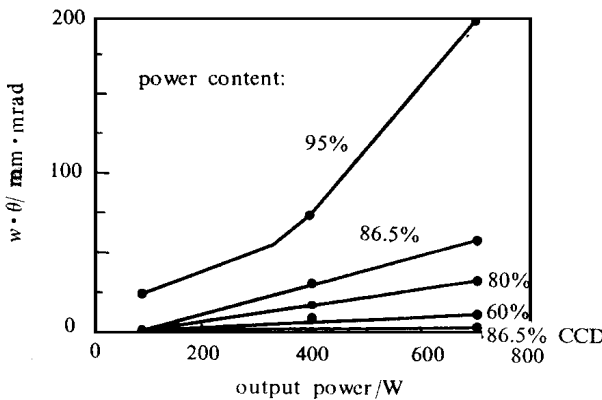


Fig 5 Knife edge measurement of the beam parameter product of a slab laser with unstable resonator

图5 刀口法测量非稳腔板条激光光束质量

形，导致激光谐振腔严重失调，激光束相位畸变，发散角增大。实验结果中，发散角并不是随时间单调增大，这主要是由于激光功率起伏及测试误差造成的。因为发散角增大，致使一部分能量分布在一个很大面积上，中心亮斑上能量比例减小。而大部分光电探测器，特别是光电探测器后面的放大器、A/D变换，都有一定阈值，低于阈值的那部分能量被认为是零。这样探测到的光斑总能量就减小了。以阈值上探测到的能量的84%定义束径，而不是实际总能量的84%，因此测到的远场发散角往往偏小。实际上发散角随时间变大比我们测量到的要严重很多。光束质量随时间变坏的

这种看法是否正确，其原因是什么，还需进一步实验研究和分析才能解决。

如果我们用斯特列尔比(Strehl ratio)表示光束质量，这一点就显得更清楚。如果2s内激光束总功率不变，那么，光斑峰值功率的下降正是光束质量变差的反映。

3 结语

实验测量结果表明, 高功率氧碘激光单发激光试验过程中光束远场发散角是变化的。为了分析影响发散角随时间变化的因素, 提高和改进激光光束质量, 进行光束远场发散角时间分辨测量是完全必要的。

高功率非稳腔激光远场光斑侧瓣能量分布在很大的区域上。刀口法测量结果^[4]及数值计算说明, 实验测量中要包含总能量的90%, 需上千倍动态范围的探测系统。我们这台仪器的A/D变换器是8bit的, 考虑到本底和噪声, 动态范围只有50倍左右, 因此是很不够的。为了提高测试精度, 应采用大动态范围的测试系统。

致 谢 对中科院大连化物所高功率氧碘激光研制人员的大力协作, 谨致谢意!

参考文献

- 1 ISO/SC 172/SX 9/WG 1 N 14 Test method for width, divergence and radiation characteristic factor of laser beam
- 2 程晓峰 圆环光束的光束质量评价标准分析. 激光杂志, 1995, 16(5): 209~ 212
- 3 SchellM, Heriger G *SPIE*, 1995, 2357: 30~ 40
- 4 Wittrock U, Dong S, Eppich B, et al *SPIE*, 1995, 2357: 172~ 183

FAR FIELD DIVERGENCE ANGLE TIME-RESOLVED MEASUREMENT FOR OXYGEN IODINE LASER

Tang Chun, Xia Sen, Ding Youyi, Jang Xiaoguo, and Yang Chenglong
Institute of Fluid Physics, CAEP P. O. Box 523-59, Chengdu 610003

The far field divergence angle is an important parameter of the high power laser. The spot drift of laser beam varying with time was found in the course of developing kW level continuous wave chemical oxygen iodine laser. In order to exactly measure the spot drift, and to improve the laser quality, an apparatus for high energy infrared laser far field divergence angle time-resolved measurement was developed, which was consisted of an optical system, a turning mirror, a photoelectric linear array detector, image acquisition, storage system, and a computer. This instrument can record 15 beam spot within two second. The far field divergence angle of kW level CW oxygen iodine laser are measured with it. Finally the experiment results (Fig 4, Table 1) and analyses are presented.