

文章编号: 0258-7025(2010)12-3086-05

低重复频率激光光束多参数实时监测系统

赵天卓¹ 樊仲维^{1,2*} 余锦¹ 刘洋¹ 张雪¹ 闫莹¹ 麻云凤¹

(¹ 中国科学院光电研究院光电系统工程研究部, 北京 100085)
(² 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要 为了实现对数 10 min 一个脉冲, 单脉冲能量 5 J 激光放大器多项输出参数的实时、高效率检测, 设计了针对高能量、大截面和低重复频率激光系统输出的测量系统。该测量系统采用 Fourier 像传递技术, 针对激光器的输出特性实现了对输出光束截面的清晰实时监测, 并且能够同时检测光束的激光波长、光谱宽度、光斑尺寸、单脉冲能量、重复频率和偏振方向等数据。利用该统计系统能够计算光斑调制度、发散角、指向性、光束质量因子、能量稳定性、平均功率、功率稳定性、脉冲宽度、脉冲稳定性和偏振度等指标。

关键词 测量技术; 多参数实时监测; Fourier 像传递; 激光光束参数

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3086

Multi-Parameters Real-Time Monitoring System for Low-Frequency Laser Beam

Zhao Tianzhuo¹ Fan Zhongwei^{1,2} Yu Jin¹ Liu Yang¹

Zhang Xue¹ Yan Ying¹ Ma Yunfeng¹

(¹ Opto-Electronics System Department, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)
(² Beijing Guoke Laser Technology Co., Ltd, Beijing, 100085, China)

Abstract To measure output parameters of a laser amplifier, with the repetition rate of several tens of minutes one pulse and single pulse energy of 5 J, a special designed measurement system is put forward for high-energy, large cross-section, low frequency laser system. This system uses the principle of Fourier image transfer to realize real-time and clear monitoring to the output characteristics of the laser beam. And this system can not only detect laser wavelength, spectral width, spot size, single pulse energy, repetition rate, and polarization direction of the laser beam simultaneously, but also statistically calculate the beam modulation, divergence angle, directivity, beam quality factor, energy stability, average power, power stability, pulse width, pulse stability, and degree of polarization.

Key words measurement technique; multi-parameter real-time monitoring; Fourier image transfer; laser beam parameters

1 引言

为了满足应用需求, 激光器在装调和测试过程中需要对许多参数进行测试, 因此研究人员针对各种激光参数的定义和测量进行了大量的研究^[1~3]。通常采用能量(功率)计测试输出能量(功率), 采用

示波器结合光电耦合器件或自相干仪测试时间波形, 采用光谱仪测试激光器在频域上的输出情况^[4~7]。目前采用的这些分离测试的方法, 对重复频率低至数 10 min 一个脉冲的激光器进行测量时, 需要几天的时间才能够完成对众多参数逐一测量。

收稿日期: 2010-05-20; 收到修改稿日期: 2010-07-14

基金项目: 国家 863 计划(2009AA034701)和国家自然科学基金(60927010)资助课题。

作者简介: 赵天卓(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光测试方面的研究。E-mail: zhaotianzhuo@aoe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fanzw@gklaser.com

这样的测量不仅费时费力,而且由于测量时间过长,激光器的工作状态在测量过程中会发生一定的变化,使得测量结果不能够很好地反映激光器的状态^[8~10]。因此针对输出重复频率为 20 min 一个脉冲的某激光装置的预放大系统,本文采用新的技术方案,实现了该系统众多输出参数的实时测试。不仅提高了测试效率,保证了测量精度,还能够实时地计算分析一些间接参数,实现了对该激光系统工作状态较为全面的实时监测。

2 激光束待测参数分析

预放大系统采用钜玻璃工作物质针对 1053 nm 波长信号,对其实现 100 mJ~5 J 的能量可变放大输出。放大输出的激光束的截面为 50 mm×50 mm 的矩形,时域脉冲宽度在 3~10 ns 可调节,上升沿小于 100 ps,偏振度大于 500:1。在检测过程中,除了针对上述的波长、光谱、光斑尺寸、单脉冲能量、重复频率和偏振度等参数进行测量外,还需要精确测量 50 mm×50 mm 光束截面上的超高斯平顶分布特性和多个脉冲输出的光束漂移特性。

图 1 标识了对于圆形光斑和矩形光斑的软化因子定义,图中 R 为子光束束圆角因子, D_0 为零强度直径, D_H 为半强度直径, D_F 为全强度直径。其中图 1(a)为光斑截面水平或垂直方向上各点能量值的归一化均方根值(RMS), D_F 对应平顶内部强度均方根值; D_0 对应平顶内部强度均方根值 1% 的数值; D_H 对应平顶内部强度均方根值 50% 的数值。软化因子 S_{EA} 的测试精度要求在 ± 0.005 以内,表示为

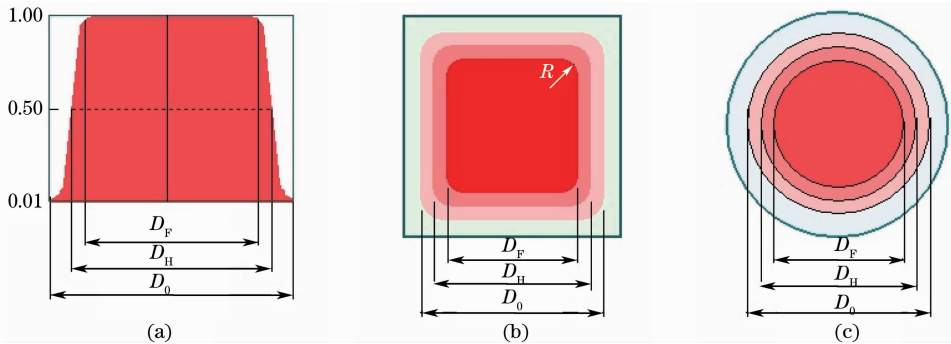


图 1 光束软化因子定义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam softening factor definition

3 近场监测的 Fourier 像传递分析

在分析过程中,为了精确测量激光束截面上的能量分布,需要对光束横截面光斑进行清晰成像。

$$S_{EA} = \frac{D_0 - D_F}{2D_0}, \quad (1)$$

待测激光束的近场强度调制度表示为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\text{gnd}}}{I_{\text{avg}} - I_{\text{gnd}}}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} 为空间分布的峰值强度; I_{avg} 为空间分布的平均强度; I_{gnd} 为背底噪声。测试指标要求不大于 1.4:1,精度在 ± 0.01 以内。因此选用的科学级 CCD 相机的灰度数值至少需要在 0~255 之间动态变化。测量激光束的光束发散角时,对经过衰减后的光束经过焦距 1835 mm 的透镜聚焦后,测量汇聚点处包含 95% 能量的光斑直径,根据标准衍射限的大小计算光束质量的衍射倍数,再根据透镜焦距计算得出光束的远场发散角。对于能量分散度,按照脉冲能量起伏的均方根值来检测,表示为

$$\Delta E_{\text{spr}} = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_T} \left(\frac{E_j - E_{\text{avg}}}{E_{\text{avg}}} \right)^2}, \quad (3)$$

式中 E_{avg} 为系统输出的平均能量或参考能量; E_j 为子束能量; N_T 为有效脉冲数。测试指标要求能量分散度均方根值不大于 3.0%。对于光束角漂移测试光束的第 $j+1$ 次发射与第 j 次发射的输出光束指向偏差的均方根值,表示为

$$\Delta \theta_s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\theta_{j+1} - \theta_j)^2}{N}}, \quad (4)$$

式中 θ_j 为实测光束第 j 次发射的指向性; N 为发射次数。测试要求 4 h 内光束指向偏差的均方根值不大于 $10 \mu\text{rad}$ 。

因此实时监测系统以预放大系统内部的主动补偿液晶光阀为物面,采用 Fourier 像传递的原理,设计了清晰的成像结构。该结构结合预放大系统内部的

空间滤波器等透镜组的位置,计算设计了预放大系统出射光斑成像位置的二次成像位置,并以此建立了清晰的实时监测系统。具体的像传递计算数据如表 1 所示。其中 OBJ 为成像的物面, radius 为透镜表面的曲率半径, thickness 为两个面之间的光轴间距, 1, 2 面为焦距 1822.80 mm 的聚焦透镜, 4~7 面为同时实现像传递和缩束结构的透镜组。该透镜组与前置的大透镜一起对物面位置实现了像传递, 其像面位置位于第二片透镜后 134.91 mm 处。反映成像质量的调制传递函数(MTF)曲线如图 2 所示, 除矩形视场的 4 个顶角外, 其他的部分已经比较接近衍射极限 110 lp/mm, 边缘视场的 MTF 数值在 50 lp/mm 处也达到了 0.3。这样的成像精度相对于激光近场监测已经足够, 因为激光放大系统中的热效应等问题均会对像传递的各个像面位置产生一定

的影响。监测系统的缩束情况计算数据如表 2 所示, 结果表明, 系统的透镜组经过 11.9 倍的缩束, 将 50 mm×50 mm 的光斑缩束成为了边长 4.47 mm, 对角线 6.31 mm 的矩形光斑。

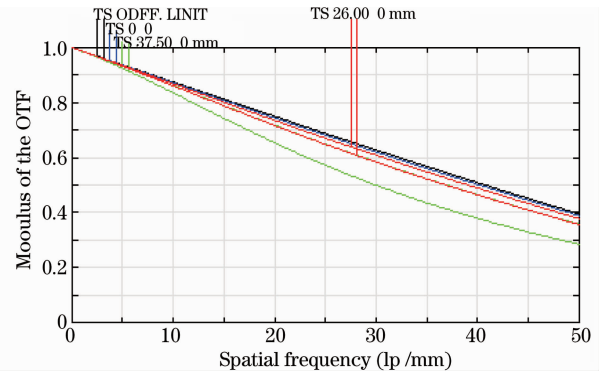


图 2 近场监测系统的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curve of near-field monitoring system

表 1 近场监测系统的像传递计算结果

Table 1 Image transfer calculation result of near-field monitoring system

	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	1822.80		37.5
1	Standard	1850.0	15	BK7	50
2	Standard	-1850.0	1822.80		50
3	Standard	Infinity	148.0		8
4	Standard	175.98	5.0	BK7	15
5	Standard	-1098.72	15.0		15
6	Standard	89.09	5.0	BK7	15
7	Standard	239.48	134.91		15
8	Standard	Infinity			3.04

表 2 近场监测系统的缩束情况计算结果

Table 2 Reduction beam calculation result of near-field monitoring system

	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.0
1	Standard	Infinity	1822.80		37.5
2	Standard	1850.0	15	BK7	50
3	Standard	-1850.0	1822.80		50
4	Standard	Infinity	148.0		0.03
5	Standard	175.98	5.0	BK7	15
6	Standard	-1098.72	15.0		15
7	Standard	89.09	5.0	BK7	15
8	Standard	239.48	50.0		15
9	Standard	Infinity			3.16

4 实时监测系统结构与结果

激光系统实时监测的技术方案如图 3 所示, 主要包括能量测试单元、波长测量单元、时间波形测试

单元、近场测试单元、远场测试单元、偏振测试单元、控制系统和综合测试软件等部分组成。

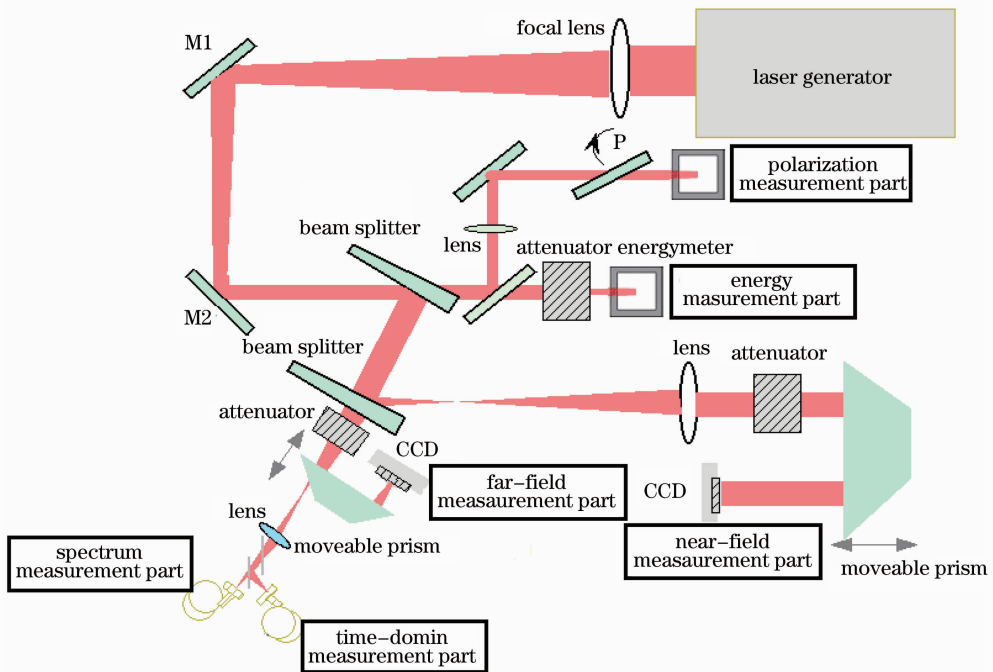


图 3 低重复频率复杂激光系统实时监测的技术方案

Fig. 3 Real-time monitoring technical solutions to low-repetition-rate complex laser system

其中能量测试单元主要进行激光单脉冲能量、能量稳定性的监测和测量,采用 Ophir 公司 PE50BF 型能量计探头,结合 NOVAII 表头,将采集到的数据传送到控制计算机上来实现测试。待测量的工作方式主要有无源触发、静态工作、动态工作几种测量状态。具有能量稳定性的统计测量能力,自动给出脉冲能量的平均值、峰峰值和 RMS 稳定性及信噪比等统计指标,以实现复杂激光器能量的在线测量、拷机老化和出厂检验等环节对激光能量的测试要求;而当要求对平均功率测量时,只需将能量计更换成功率计即可测量平均功率、功率稳定性等功率方面的参数。光谱测试单元进行通过光纤采集光束信号同时实现激光波长、光谱宽度等参数的测量,采用 Avantes 公司 AvaSpec-2048 型光谱仪,采集数据并传送到计算机上。时间波形测试单元进行脉冲宽度、重复频率、脉冲上升时间、脉冲下降时间、脉冲时间稳定性和重复频率等参数的测量,采用 Tektronix 公司 DPO4104 型示波器进行数据采集和处理。近场测试单元通过控制电机带动一对直角棱镜反射器作动,找出最佳近场位置,测出光斑尺寸、软化因子、近场调制度、瑞利距离和像传递位置。远场测试单元通过控制电机带动一对直角棱镜反射器作动,找出束腰位置,测出发散角、指向性和衍射倍数、束腰尺寸。近远场测试单元通过 Lumenera

公司的两个 LU135 型科学 CCD 来进行测试。偏振测试单元通过将入射光适度衰减后,导入穿过一个水平放置的 500:1 的高消光比偏振片(P),如果透射率和偏振片额定透射率接近,则待测激光器输出光束为水平偏振;如果透射率几乎为 0,则为垂直偏振;若为中间状态,可以通过精密控制偏振片绕轴旋转,根据透过光强最大值和最小值来计算出偏振度,采用四象限探测器进行测试。此外根据测量要求发出的测试指令,控制系统操作各类作动单元进行工作,以获得有效数据输出,测试软件用于对各单元模块的数据进行处理和计算。

在按照上述技术方案和计算分析结果搭建好了系统以后,进行了相应的测试,测试系统如图 4 所示。测试光束从照片左侧上方进入,经过右侧上方的 $\phi 150$ mm 反射镜(标注为 1),右侧下方的 $\phi 150$ mm 反射镜(标注为 2)反射后,再转折经过左下方的 $\phi 150$ mm 反射镜(标注为 3)来延长光程,满足像传递的需求。然后测试光束经过焦距 1822 mm 的透镜(标注为 4)和多个楔板分光后,分别进入各个监测部分,其中标注 5 为能量计探头,标注 6 为近场测试 CCD,标注 7 为远场测试 CCD。具体的近场测试结果如图 5 所示,其中左侧为经过计算分析得到的光束截面上的能量分布情况,右侧为具体采集到的成像光斑。通过对科学级 CCD 获取图像的各

个点素灰度值的统计和分析计算处理,结合前述关于软化因子、近场调制度的定义,能够计算得到具体的数值;通过记录捕捉到远场光斑的情况,可以分析计算得到光束发散角、能量分散度、光束角漂移的结果。

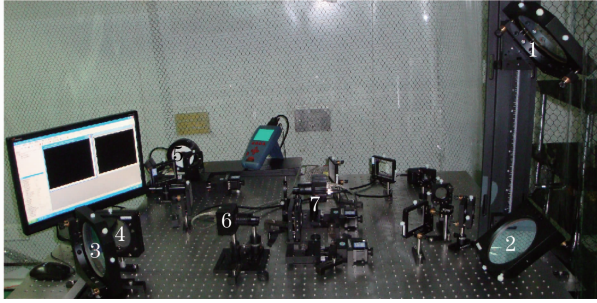


图 4 低重复频率激光的多参数实时监测系统
Fig. 4 Real-time monitoring system to low-frequency laser beam

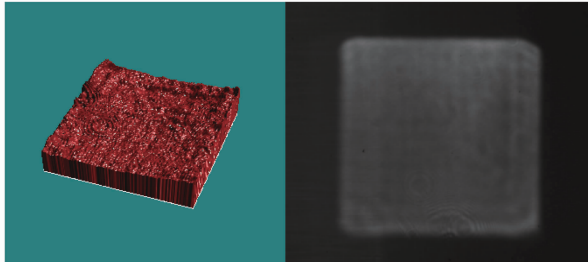


图 5 近场测试获得的光场能量分布情况和成像图
Fig. 5 Energy distribution of the light field and imaging map gained from near-field measurement

5 结 论

采用上述方案搭建的某装置预放大系统实时监测系统,在 Fourier 像传递技术的基础上,实现了对激光光斑能量分布的精确探测,由此能够很好地实时监测预放大系统的输出特性,经过与其他测试单元的结合,实现了对预放大系统全面的实时监控。

这种将多种检测手段相结合,进行综合监控的技术具有很好的实际应用意义^[11]。

参 考 文 献

- 1 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
冯国英,周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 2 Zhang Xiuhua, Hong Hanyu, Zhang Huimin *et al.*. New method for laser parameter detection [C]. *SPIE*, 2009, **7283**: 728332
- 3 J. V. Aheldakova, A. V. Kudryashov, V. Y. Zavalova *et al.*. Beam quality measurements with Shack-Hartmann wavefront sensor and M^2 -sensor; comparison of two methods [C]. *SPIE*, 2007, **6452**: 645207
- 4 Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 47~51
吕百达,康小平. 对激光光束质量一些问题的认识 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 47~51
- 5 Lü Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong *et al.*. Parametric characterization of laser beams and beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 14~17
吕百达,季小玲,罗时荣等. 激光的参数描述和光束质量 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(1): 14~17
- 6 Hu Qingyun. Research on comprehensive measurement of laser parameters [J]. *J. Jinan University*, 1996, **6**(3): 68~74
胡庆云. 激光参数综合测量研究 [J]. *济南大学学报*, 1996, **6**(3): 68~74
- 7 Zhu Hong, Li Xin, Qin Peng *et al.*. The development of integrated laser tester [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(8): 809~812
朱虹,李新,秦鹏等. 一体化激光参数测试仪研制 [J]. *激光与红外*, 2008, **38**(8): 809~812
- 8 Miguel A. Porrás, Medina Rafael. Entropy-based definition of laser beam spot size [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36): 8247~8251
- 9 ISO/TC 172/SC9/WG1. Terminology and test methods for lasers [R]. N14, 1991
- 10 ISO/TC 172/SC9/WG1. ANSI Procedures for US Participation in the International Standards [R]. Activities 2008 edition, 2008
- 11 Qian Liejia, Fan Dianyan, Zhang Zhuhong. Focusing characteristics and beam quality of phase aberrated beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(2): 166~169
钱列加,范滇元,张筑虹等. 位相畸变光束的聚焦特性与光束质量 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(2): 166~169