

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0379-03

高功率激光焦斑的消色差放大成像测量技术

陈 波, 秦兴武, 程 娟, 刘 华, 赵军普, 卢宗贵, 徐隆波, 孙志红

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 用单透镜放大成像的方法进行了高功率激光焦斑实时测试。高功率远场焦斑经旋转椭球凹面反射镜取样后,通过单透镜放大成像系统将焦斑像消色差地放大成像到 CCD 图像采集系统上,通过数据处理得到可靠的焦斑形状和强度分布。该技术成功地解决了大型激光装置在极高功率下的基频和三倍频激光焦斑的实时测试问题,测试结果用其他测试方法得到了验证。

关键词 仪器,测量与计量;激光参量测量;高功率激光焦斑;消色差放大成像;凹面反射镜

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Achromatic Focal Spot Measurement of the High Power Laser

CHEN Bo, QIN Xing-wu, CHENG Juan, LIU Hua, ZHAO Jun-pu, LU Zong-gui,

XU Long-bo, SUN Zhi-hong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Result of the focal spot measurement on the high power laser with single lens imaging method is reported in this paper. Focal spot of the high power laser is sampled by an ellipsoid concave mirror, and after passing through a single lens, it is imaged on the CCD system. With testing data to be processed, reliable focal spot shape and intensity distribution are obtained. In this way, real time test with the focal spot of the high power laser is realized. The testing result has been validated in other way.

Key words instrumentation, measurement and metrology; laser parameter measurement; high-power focal spot; achromatic imaging; concave mirror

1 引 言

在高功率固体激光器的光束质量评价参量中,激光焦斑的强度分布决定了光束的可聚焦能力,是衡量装置光束质量的最重要的参量。目前经常采用的直接穿孔法虽然能得到焦斑的环围能量比,但不能测量焦斑的具体能量分布;阵列劈板法尽管提高了 CCD 的动态范围,但焦斑重构过程引入的误差不容忽视。在美国国家点火装置(NIF)及其原型 Beamlet 上开展了大量的激光焦斑实时测量工作^[1~4]。目前通常采用 CCD 直接测量法,对于高功率的实时测量,要获得高置信度的焦斑测试结果,需解决严格的焦点位置成像和系统标定、大倍率的光强衰减以及提高 CCD 相机的动态范围和空间分辨率等。针对以上关键问题,开展了三倍频焦斑的消色差放大成像测量技术的研究。

2 系统设计与调试

要使测试系统对靶点成完善像,需首先解决离轴带来的像差和畸变的影响,大倍率的衰减带入的畸变可通过光学系统设计来优化,严格成像的放大系统可以充分利用 CCD 的空间分辨率。因此三倍频焦斑实时测量的关键是系统的设计、加工、装调、标定。

实验系统如图 1 所示,高功率激光首先经过旋转椭球面凹面镜系统进行消色差地放大、成像,并通过表面反射($R=4\%$)对激光进行光强衰减和取样,然后利用单透镜放大成像系统将焦斑再次放大后成像,用科学级 CCD 记录焦斑,进行数据处理后得到焦斑实时测量结果。

测试系统中凹面反射镜是最关键的元件,它将放大成像、衰减、取样等功能集成在一起,这种构型

大大减少了真空体积(约 6 m^3)和大口径元件的加工难度。凹面镜经优化设计后采用离轴的旋转椭球凹面反射镜。由于物点和像点分别位于椭球的两个焦点上,可以有效地消除离轴和其他像差的影响,如图 2 所示。凹反镜与放大成像透镜组成的系统附加

像差在 1DL (衍射限)以内。

测试系统的标定通过在高功率激光焦面处放置小孔和细钢丝构成的“十”字叉丝完成,用白光对“十”字叉丝进行成像调试,CCD 记录结果如图 3 所示。

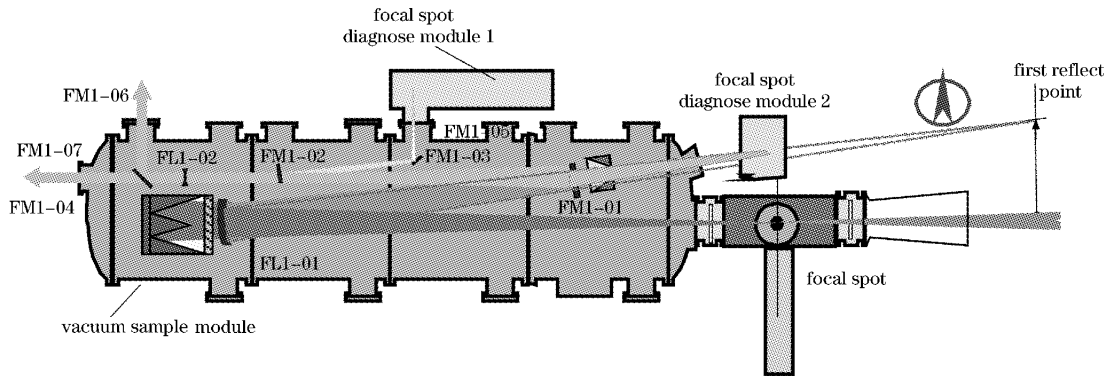


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

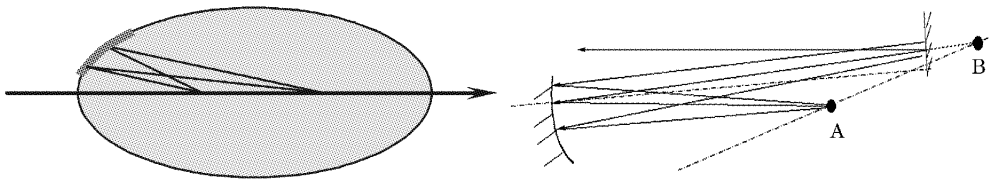


图 2 符合费马原理的旋转椭球面成像关系

Fig. 2 Imaging diagram of ellipsoid concave mirror according to Fermat principle

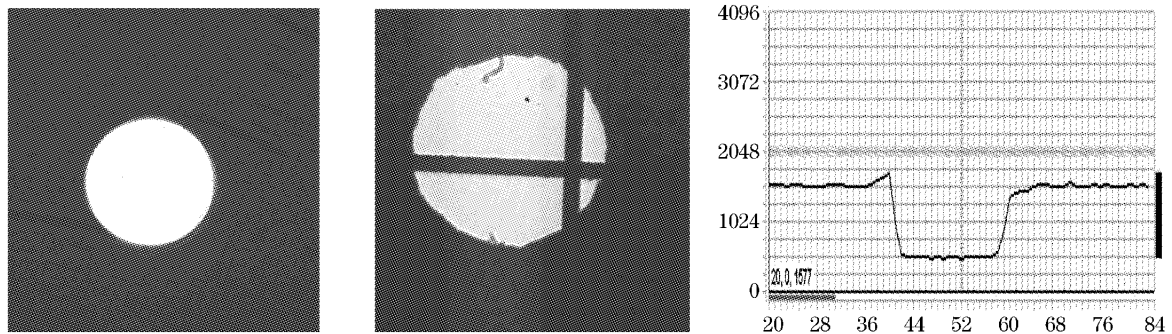


图 3 旋转椭球面凹面镜的标定结果

Fig. 3 Calibration result of the ellipsoid concave mirror

用白光对 $\phi 131 \mu\text{m}$ 细钢丝测量的结果,宽为 20 像素(pixels), $234 \mu\text{m}$, 旋转椭球面凹面镜放大了 1.79 倍,与理论设计结果一致,同时在焦平面放置 $\phi 1 \text{ mm}$ 的小孔对整个测量系统进行成像标定,标定结果如图 3 所示,系统总的放大倍数为 8.7。表明该系统可进行消色差放大成像和取样。

光焦斑进行了实时测量,测量结果如图 4 所示,焦斑总能量 80% 包含在 $83.4 \mu\text{rad}$ 之内,相当于 36.8DL,总能量 95% 包含在 $113 \mu\text{rad}$ 之内,相当于 52.3DL。

3 实验结果

焦斑测试系统在标定完成后,对高功率三倍频激

利用焦斑成像诊断系统中的主瓣、旁瓣测量系统,1 mm 的小球遮挡主瓣,采用纹影法对放大后的焦斑的主瓣和旁瓣同时进行了测量,通过数据处理得到了还原后的焦斑测试结果,有效地提高了测试系统的动态范围。测试结果如图 5 所示,图中从左至右分别是主瓣、旁瓣、主旁瓣焦斑功率分布和还原后的焦斑。

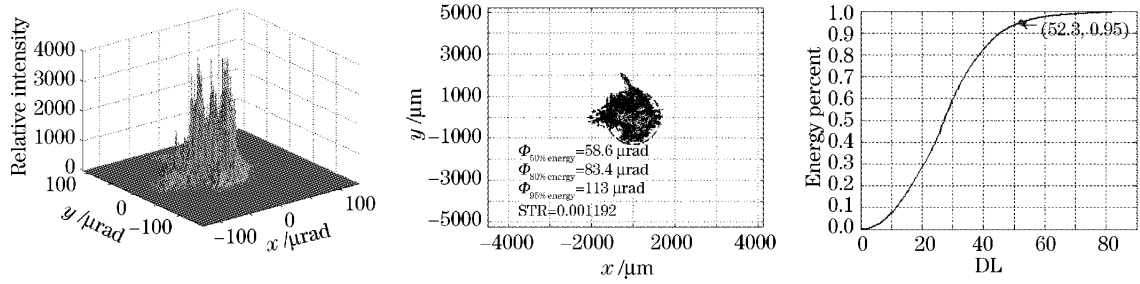


图 4 消色差成像系统测量焦斑的结果

Fig. 4 Measured result of focal spot by the achromatic imaging system

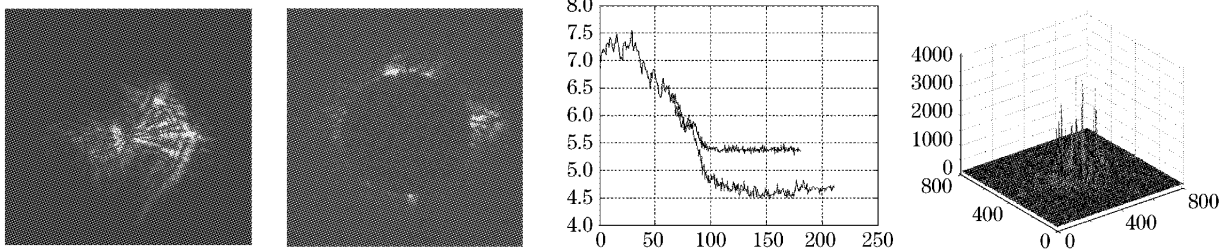


图 5 消色差成像系统测量焦斑旁瓣的结果

Fig. 5 Measured result of focal spot side-lobe by the achromatic imaging system

为了验证测量结果的置信度,在焦平面放置不同孔径的小孔,利用穿孔法测量焦斑的环围能量比,图 6 中星号为穿孔法得到的结果,实线为利用消色差成像系统测量的结果。可以看出,两种方法测量的焦斑能量集中度吻合得很好。

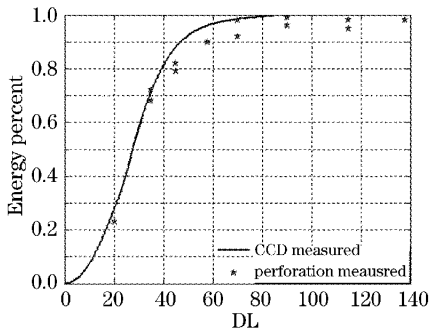


图 6 穿孔率测量结果与成像放大系统测量结果对比

Fig. 6 Results measured by perforation and the achromatic imaging system

4 结 论

消色差的放大成像测量技术是实时测量高功率激光焦斑的有效方法,该技术成功地解决了大型激光装置在极高功率下的基频和三倍频激光焦斑的实时测试问题,并已成功用于神光原型装置的激光焦斑测试中。

采用离轴旋转椭球凹面镜的消色差成像放大技术,最大程度地减小了测量系统带入的像差,降低了焦斑测试系统的成本;与放大成像透镜配合,降低了对 CCD 分辨率的要求。合理设计凹面镜等元件的膜层,实现了焦斑的大倍率光强衰减,也降低了元件加工难度。在焦斑成像测试系统中,采用纹影法,同时进行焦斑主瓣和旁瓣的测量,提高了 CCD 的动态范围(达 10^4),拓展了对焦斑的认识。利用穿孔实验的结果验证了三倍频焦斑实时测试结果的置信度。

致谢 本工作在完成过程中,得到了范滇元院士、张小民研究员、魏晓峰研究员、景峰研究员等的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 W. H. Williams, J. M. Auerbach. Modeling characterization of the national ignition facility focal spot[R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-JC-127907
- 2 P. J. Wegner, M. A. Henesian, J. T. Salmon. Wavefront and divergence of the beamlet prototype laser[R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-JC-129724,1998
- 3 Mary L. Speath, Kenneth R. Manes, Clifford C. Widmafer *et al.* The national ignition facility wavefront requirements and optical architecture [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 25~42
- 4 B. M. Van Woutergham. Recent results of the national ignition facility beamlet demonstration project[R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-JC-120917