

文章编号: 1001-3806(2015)01-0100-04

## 大口径高能脉冲激光参量测量装置的精度研究

赵 琦<sup>1</sup>, 孟庆安<sup>1</sup>, 蒋泽伟<sup>1</sup>, 胡绍云<sup>1</sup>, 耿 旭<sup>2</sup>, 高明伟<sup>3</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究高能激光外场特性, 研制了一套用于测量大口径高能量脉冲激光参量的测量装置。该装置包括一套自校准系统, 能够对其主要系数进行现场校准。采用理论分析和实验研究的方法, 对装置的测量原理、性能和结构进行了描述, 并对测量误差进行了理论分析, 证明了该装置能够同时测量高能激光光强分布和能量值, 最后采用校准实验的方法对测量误差进行了验证和分析。该装置对激光脉冲能量和光强分布的测量误差分别为 4.5% 和 5%。结果表明, 该装置有较高的测量精度和可靠性, 能广泛用于大口径高能量脉冲激光外场测试。

**关键词:** 测量与计量; 高能激光; 实验方法; 成像

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.020

### Study on parameter measurement precision of high energy laser beam with large aperture

ZHAO Qi<sup>1</sup>, MENG Qing'an<sup>1</sup>, JIANG Zewei<sup>1</sup>, HU Shaoyun<sup>1</sup>, GENG Xu<sup>2</sup>, GAO Mingwei<sup>3</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to study the field characteristics of high energy laser, a device for measuring parameters of large-caliber high energy pulsed laser was developed. The device includes a set of autocalibration system that can conduct on-site calibration of its main coefficients. The measuring principle, performance and structure of the device were described, and the measurement error was analyzed by theoretical analysis and experimental verification. The equipment can simultaneously measure the laser energy and intensity distribution. Finally, measurement errors were verified and analyzed by the method of calibration experiments. Measurement errors of laser energy and intensity distribution are 4.5% and 5% respectively. The results show that the equipment has excellent precision, reliability and stability, which could be used in field measurement.

**Key words:** measurement and metrology; high energy laser; experimental method; image

### 引 言

脉冲激光被广泛的使用在激光雷达、激光测距、激光成像和激光武器等方面<sup>[1]</sup>。对激光光斑远场特性的测量, 包括光强分布和能量值的测量技术也被广

泛研究<sup>[1-3]</sup>。要同时测量该两种参量, 目前主要方法包括光电阵列测量<sup>[4-5]</sup>和成像测量等。光电阵列测量的主要特点是原理清晰、结构稳定、测量频率高, 但是其空间分辨率低、对入射角有要求、体积大、重量大, 不适用于外场测量; 漫反射成像测量过去被广泛用于光强分布测量, 通过漫反射板上镶嵌能量计后被用于同时测量光强分布和能量<sup>[6]</sup>。测量能量需要通过拟合、插值计算, 当光强分布畸变较大时会产生较大的误差, 而且因为光学成像畸变和散斑<sup>[7]</sup>的影响, 其测量精度也一直鲜有详细的研究报道。

对于高能大口径脉冲激光参量的测量一直是脉冲激光技术研究中的一个难题, 本文中描述了一套

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205016; 60908009)

作者简介: 赵 琦(1985-), 硕士, 工程师, 主要从事激光测量、应用研究, 以及光波前和相干性测量仪器的研究及计量科研工作。

E-mail: zhaoyi2156@163.com

收稿日期: 2014-01-09; 收到修改稿日期: 2014-01-26

基于漫反射成像技术的大口径高能脉冲激光参量测量装置,该自行设计的装置能够方便、高精度地对高能大口径脉冲激光参量进行测量。首先对装置的测量原理、性能、组成和测量精度进行了分析;然后将装置主要参量进行了标定和溯源,并对标定实验和数据给出了解释;最后通过使用已校准的仪器,对研制的装置进行比对研究,与理论值进行了比较<sup>[8]</sup>,并对实验结果给出理论分析。实验证明,该装置有较高的测量精度和测量重复性,能够广泛地用于各种脉冲激光的实验室和外场测量。该装置已被使用于激光大气传输的外场科研试验,能广泛应用于各种大气光学传输变换的研究和武器装备性能评估<sup>[8-10]</sup>。

### 1 测量原理与装置组成

测量装置主要用于测量大口径脉冲激光能量值和光强分布,测量装置包括漫反射板、光电能量计、光学系统、校准光源、成像 CCD 和旋转器,如图 1 所示。测量原理为通过漫反射板将待测激光漫反射,采用光学系统和成像 CCD 对漫反射板上光斑进行成像;再利用漫反射靶面中镶嵌具有漫反射表面的能量计对固定区域的入射光能量进行测量,同时将部分光漫反射后成像,将得到的能量值和能量计表面的成像光斑结果进行拟合,以及 CCD 上单位像素的能量值,以及光斑的能量分布绝对值结果。

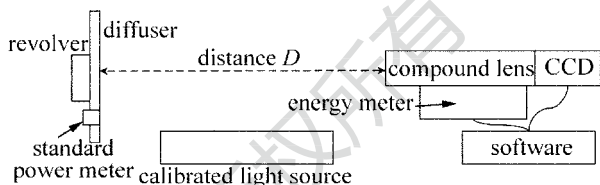


Fig. 1 Schematic diagram of setup

测量前使用校准光源照射漫反射板,将光学系统置于漫反射板后 10m ~ 100m 范围内,调节光学系统调焦组和 CCD 位置,使得光斑成像在 CCD 靶面中心。通过下式获得光强分布校准值:

$$k_1 = I_1(x, y) / I_2(x, y) \quad (1)$$

式中,  $k_1$  的是光强分布校准系数,  $I_1(x, y)$  是校准光在靶面的实际光强分布,使用口径为  $\varnothing 6\text{mm}$  的功率计在漫反射板位置移动获得功率值,功率计移动步长 2mm,实验方案如图 2 所示。  $I_2(x, y)$  是放入漫反射板后, CCD 测量的光强分布,用像素绝对值表示。

测量时将功率计换为能量计, CCD 调制为脉冲触发模式。将测量时 CCD 得到的像素值代入下式

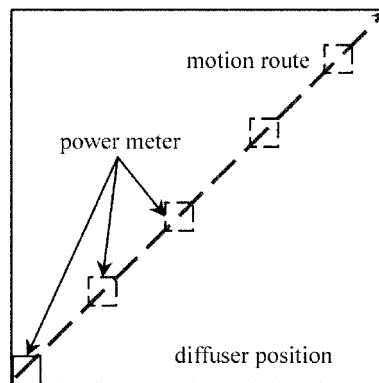


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

得到光强分布真实值:  $I(x, y) = k_1 I_3(x, y)$  (2)

式中,  $I(x, y)$  是漫反射靶面上的理论真值,  $I_3(x, y)$  是 CCD 测量得到的光强分布值。利用得到的能量值和光强分布可以得到能量分布的真实值  $I_4(x, y)$ , 如下式所示:

$$I_4(x, y) = I(x, y) \times E_1 / \sum_x \sum_y I_5(x, y) \quad (3)$$

式中,  $I_5(x, y)$  是能量计漫反射表面成像的灰度值,其位置和大小在系统标定时确定,  $E_1$  是能量计测量得到的能量值。

实验装置测量指标如下:光斑口径测量范围为  $\varnothing 70\text{mm} \sim \varnothing 1000\text{mm}$ ,能量测量范围为 100pJ ~ 100J,测量波长为 0.8  $\mu\text{m}$  ~ 1.1  $\mu\text{m}$ ,最大光强分辨率为 1.2mm,能量测量不确定度为 5% (包含因子  $k = 1$ )。

(1) 漫反射板为 800mm  $\times$  800mm,表面平行度优于 5',表面粗糙度为 0.5  $\mu\text{m}$ ,表面为可加工陶瓷微粒。

(2) 光电能量计的有效测量面积  $\varnothing 9\text{mm}$ ;测量最大重频 1kHz、最大脉宽 10ms;测量范围为 70pJ 到 100mJ (对应 1.06  $\mu\text{m}$ )。

(3) 采用 1/3"靶面 CCD,自制电路,最大测量频率 15Hz,通过像素阈值触发。

(4) 光学系统包括能量计光学系统和成像光学系统两部分,两光学系统共用 1 组物镜,并对杂散光抑制进行了设计<sup>[11]</sup>。

成像光学系统变焦焦距为 70mm ~ 1100mm,入瞳口径为  $\varnothing 90\text{mm}$ ,光圈数为 1:2.6 ~ 1:12,70mm 和 1100mm 焦距时系统的调制传递函数(modulus of transfer function, MTF)如图 3 所示,图中 TS DIFF. LIMIT 表示理论衍射极限,其余表明不同角度下的调制函数。

(5) 校准光源的波长 1.06  $\mu\text{m}$ ,功率 22mW,发散

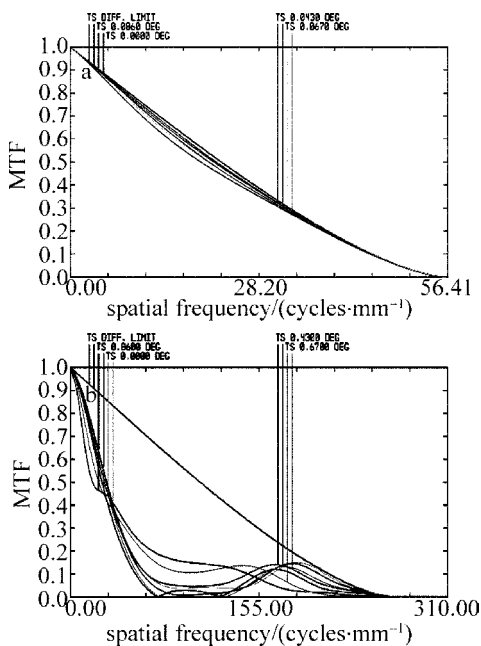


Fig. 3 Results of MTF

a—MTF of 1100mm focal length b—MTF of 70mm focal length

角为 15°。

(6) 标准功率计靶面 10mm × 10mm, 测量误差 1.6%, 表面喷涂与漫反射板相同的可加工陶瓷微粒。

## 2 装置标定

本装置采用校准光源进行现场标定, 对于能量测量的标定误差  $u_e$ , 可以通过不确定度测量公式来获得, 如下式所示:

$$u_e = \sqrt{\left(\frac{\Delta E_2}{E_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k_2}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_3}{E_3}\right)^2} \quad (4)$$

本装置中采用热电功率计, 通过送检得到功率计的测量不确定度  $\Delta E_2/E_2 = 0.8\%$  ( $k = 1$ ),  $k$  为包含因子; 功率计面积  $S_1$  通过固定光阑控制, 光阑金属材料经发黑处理, 半径误差为 0.2%, 则面积测量误差  $\Delta S_1/S_1 = 0.4\%$ ; 光斑面积  $S_2$  的误差  $\Delta S_2/S_2$  和校准光源不均匀性系数  $k_2$  的误差  $\Delta k_2/k_2$  用实验的方法获得, 实验装置示意图如图 1 所示。实验共完成 9 次, 实验重复性误差为 1.1%, 实验结果如图 4a 所示, 有效区域即光斑直径为 645mm, 误差为 ±2mm, 在有效区域内光强起伏标准偏差为 1.1%。为了验证不同分辨率情况下的光强分布均匀性, 功率计口径从 0.6mm ~ 4mm 变化, 结果如图 4b 所示,

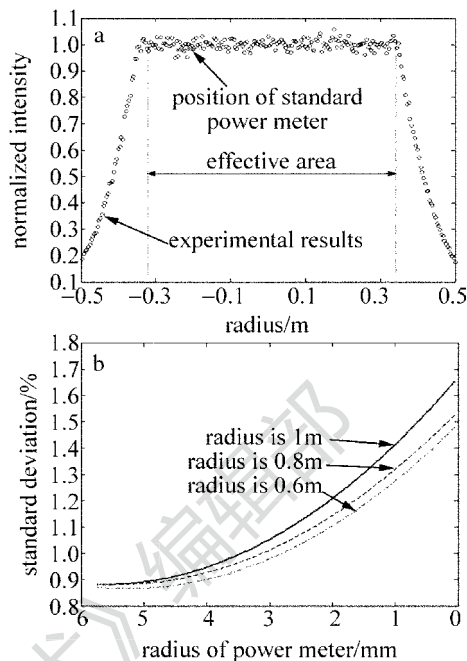


Fig. 4 The result and design of experiment

a—the standard deviation of calibrated laser source b—the standard deviation versus radius of power-meter

实验完成 7 次取平均值, 重复性误差小于 2.3%。在有效口径区域小的情况下, 光强分布更加均匀, 随着有效区域增大, 光强分布出现类高斯分布。在最大分辨率为 1.2mm 情况下, 光强起伏标准偏差最大为 1.4%。能量计测量误差  $\Delta E_3/E_3$  包括线性误差、光学系统透过率误差和背景误差, 通过比对测试能量计测量误差在 2.7%。通过分析和计算, 本装置中能量测量标准偏差值为  $u_e = 4.5\%$ 。

对光强分布的测量误差主要来源于 CCD 的测量误差和校准参量  $k_1$ , CCD 采用图像处理的方法滤除噪声<sup>[12]</sup>。通过前面的计算和 CCD 测量误差的报告, 可以计算得到光强分布的测量误差为 5%。

## 3 实 验

通过使用脉冲激光器对已校准的测量装置的误差进行评估, 激光器采用 1.06μm 固体 Nd:YAG 激光器, 能量 1J、脉宽 2.5ms、重频 1Hz, 能量真实值由监视能量计给出。激光器前放置一个反高斯膜衰减片, 实验装置示意图如图 1 所示, 其中校准光源改为 1.06μm 固体 Nd:YAG 激光器。激光器距离靶面 8m, 部分光束通过分光镜进入监视能量计, 能量测量误差优于 3%。为了抑制散斑效应, 开启旋转器使漫反射板以 40°/s 旋转。漫反射板上光斑真实分布由图 1 的方法测量。



不同测量距离下光强分布的测量结果如图 5a 所示,测量装置测量结果与能量计拟合结果有高度相似性。测量距离为 12m 位置测量的光强分布更加的平滑,但轮廓有部分失真;随着测量距离的增加,测量的轮廓更接近真实值,但是光斑会出现明显的“颗粒”状。通过在激光器前放置光阑,研究了在不同光斑尺寸在各测量距离下的光斑尺寸的测量结果,测量结果进行了多项式拟合后如图 5b 所示,说明对于不同的光斑尺寸,CCD 到漫反射板的测量距离的最优值不同,光斑尺寸测量误差随着距离的增加从 4.4% 下降到 2%。能量测量结果随光斑尺寸和距离的变化情况如图 5c 所示,随着距离的增加能量测量误差增大,测量误差与光斑尺寸有关系,但是能量测量误差均小于 3.5%,考虑到测量重复性和标准光源的能量值误差等因素,与设计指标一致。

## 4 结论

为同时测量大口径脉冲激光能量和光强分布,研制了一套基于漫反射成像的大能量激光参量测量装置。通过校准光源和标准能量计的标定以及对系统的误差分析表明,该装置对激光脉冲能量和光强分布的测量误差分别为 4.5% 和 5%,能够对激光光斑和能量进行外场高精度测量。

通过已标定的激光器对大能量激光参量测量装置进行了实验验证,实验结果表明,对不同光斑尺寸的光束,在不同测量距离下有不同的测量精度,测量最大误差优于 3.5%。该实验装置对光强分布的测量误差随测量距离变化,最大测量误差为 4.4%,通过距离的选择最优测量误差能到达 1.2%。

## 参 考 文 献

- [1] JI X L, TAO X Y, LÜ B D. Far-field characteristics of high-power laser beams [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (3): 251-254 (in Chinese).
- [2] SUN X W, YANG J. High power pulsed laser mode measuring system using planer CCD camera [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, 21 (2): 96-98 (in Chinese).
- [3] ZHU Zh, WANG Y Zh, YI Y C. Novel direct-detection scheme for measuring energy distribution of laser spots in outfield [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32 (11): 49-53 (in Chinese).
- [4] XING H, QU W D, LEI P, *et al.* Design for detector array target of laser far field detect system [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36 (7): 531-533 (in Chinese).
- [5] GUAN Y G, FU Sh Zh, GAO X Y. A novel high energy laser beam detector for measuring energy distribution [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12 (2): 175-177 (in Chinese).
- [6] TIAN H L, WANG Y F, ZHANG W. Design of laser far field power density test system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, 22 (6): 24-26 (in Chinese).
- [7] DAINTY J C. *Laser speckle and related phenomena* [M]. New York, USA: Springer, 1984: 76-79.
- [8] LI X Q, ZHAO Q, JI X L. Confirmation of the quadratic approximation of rytov phase structure function and the approximation of complex gaussian-function expansion of hard-edge apertures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31 (12): 1201002 (in Chinese).
- [9] CHEN H F, CHEN Y, LI Y Y, *et al.* Simulation of atmospheric transmission characteristics of laser at 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (2): 266-269 (in Chinese).
- [10] PENG R W, LI L, LI Y J, *et al.* Intensity distribution of broadband laser with flattened-Gaussian mode passing through an aperture [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (6): 829-832 (in Chinese).
- [11] YAN Y D, CHEN L Y, WU G J. Study of stray light reduction for laser target scattered light observation lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35 (6): 53-58 (in Chinese).
- [12] ZHANG H Zh, YAO M, LEI P, *et al.* Research of image processing method of far-field laser spots [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (4): 460-463 (in Chinese).

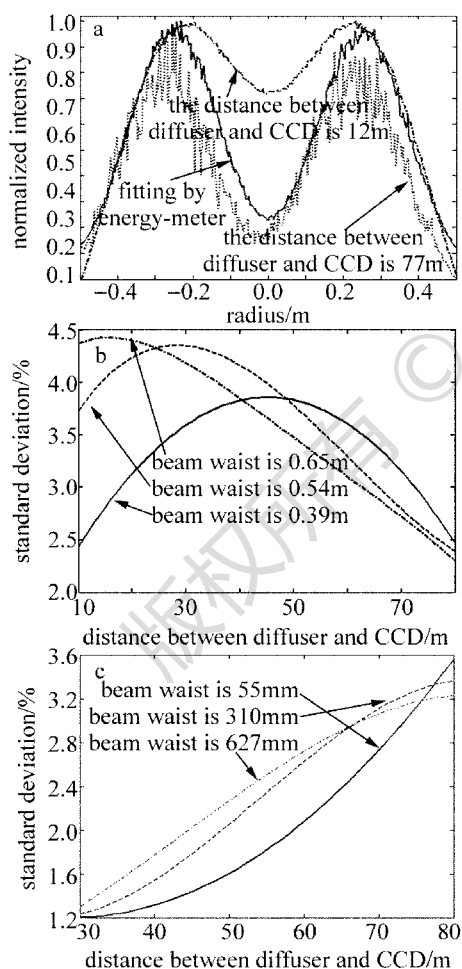


Fig. 5 Results of calibrated experiment

a—the distribution of laser beam versus measuring distance b—the errors of radius of laser beam versus distance between diffuser and CCD  
 c—the errors of energy of laser beam versus distance between diffuser and CCD