

文章编号: 0253-2239(2010)03-0821-06

# 基于正交散焦光栅的 1064 nm 脉冲激光 $M^2$ 因子测量

马浩统 习锋杰 周 朴 许晓军 陈金宝 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 传统光束质量测量装置不能有效测量脉冲激光的  $M^2$  因子。为实时检测脉冲激光  $M^2$  因子, 将正交散焦光栅和短焦透镜密接配合使用, 同时测量待测光束 9 个不同位置处的光强分布, 用二阶矩方法计算束宽, 并经双曲线拟合得到被测光束的  $M^2$  因子。根据高斯光束的薄透镜变换理论, 分析了被测光束束腰宽度和束腰位置变化对测量精度的影响, 得到了正交散焦光栅  $M^2$  因子测量系统对测量参数要求低、动态工作范围大等结论。实验测量了 1064 nm Nd:YAG 固体脉冲激光器单个脉冲的  $M^2$  因子、脉冲之间的  $M^2$  因子变化和光束  $M^2$  因子随电压的整体变化情况。结果表明此系统实现了对脉冲激光  $M^2$  因子的测量, 并能实时检测激光工作过程中的  $M^2$  因子变化。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光光束质量;  $M^2$  因子测量; 正交散焦光栅

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103003.0821

## Measurement of $M^2$ Factor of 1064 nm Pulsed Laser Based on Crossed Defocus Gratings

Ma Haotong Xi Fengjie Zhou Pu Xu Xiaojun Chen Jinbao Liu Zejin

(College of Opt-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** It is impossible to measure the  $M^2$  factor of pulsed laser effectively by using the traditional equipment. For real-time measurement of the  $M^2$  factor, two crossed defocus gratings and a lens with short focal length are used to obtain nine beam spots of different positions. The value of  $M^2$  factor is determined by calculating the beam waists using the second-moment method and curve-fitting. According to the theory of Gaussian beam propagation and transformation, measured errors as functions of beam waist and positions are analyzed. The analysis shows that the measuring system can work well in a large range. The pulse-to-pulse  $M^2$  factors and the change of  $M^2$  factors along with the pumping voltages of the 1064 nm Nd:YAG pulsed laser are measured. The results indicate that measurements of  $M^2$  factor of pulsed laser are realized and the system can work successfully for measuring changes of  $M^2$  factors during laser working in real time.

**Key words** laser technique; pulsed laser beam quality; measurement of the  $M^2$  factor; crossed defocus gratings

### 1 引 言

在激光加工和定向能技术等应用领域中, 光束质量变化对激光应用具有很大的影响。 $M^2$  因子是衡量激光光束质量的一项重要指标<sup>[1~3]</sup>, 因同时考虑了束宽和远场发散角对激光束的影响, 被广泛应用于光束质量检测中<sup>[4,5]</sup>。当前对连续激光的  $M^2$  因子检测已较为成熟, 但对脉冲激光器的  $M^2$  因子

检测尚未有可靠的方法<sup>[6]</sup>。传统光束  $M^2$  因子检测采用移动 CCD 逐点测量, 操作复杂, 不能用来测量脉冲激光或实时检测光束质量的变化。分光镜法和透镜阵列法等可实现多个位置的同时测量, 但存在光路复杂、操作繁琐等缺陷<sup>[7]</sup>。1998 年 Paul M. Blanchard 等<sup>[8,9]</sup>提出了基于散焦光栅的多平面成像技术。2004 年 Alan H. Greenaway 等<sup>[10]</sup>将两个

收稿日期: 2009-03-26; 收到修改稿日期: 2009-04-23

作者简介: 马浩统(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: mahaotong@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

正交叠放的散焦光栅与短焦透镜密接使用,同时获得光束 9 个不同位置处的光斑,并拟合出了激光束的  $M^2$  因子。习锋杰等<sup>[11~13]</sup>研制了基于相位型散焦光栅的波前曲率传感器,并成功应用于波前测量。耿义峰等<sup>[14]</sup>将正交散焦光栅应用于 He-Ne 激光的  $M^2$  因子测量,验证了测量的有效性,但需要进一步对测量系统的适用范围和测量精度等进行详细的分析,以有助于测量系统的优化设计和测量精度的提高。

本文设计基于正交散焦光栅的  $M^2$  因子测量系统,理论分析了测量误差随物方腰斑半径和物距的变化情况,得出了该测量系统对测量参数要求低、动态工作范围大等结论,并在理论分析的指导下测量了固体脉冲激光器单个脉冲  $M^2$  因子、脉冲之间  $M^2$  因子变化和  $M^2$  因子随抽运电压的变化情况。

## 2 正交散焦光栅 $M^2$ 因子测量系统及测量精度分析

### 2.1 激光光束质量因子定义方式

$M^2$  因子表示实际光束偏离基模高斯光束的程度,综合描述了激光的光束质量。定义式为

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d\theta}{4}, \quad (1)$$

式中基模高斯光束其光束束腰宽度和远场发散角乘积为  $4\lambda/\pi$ ,  $d$  和  $\theta$  为实际光束的束腰宽度和远场发散角。若光束不是圆对称的(椭圆率  $\epsilon \leq 0.87$ ),则需在光束横截面上相互垂直的两个主轴上分别进行测量<sup>[15]</sup>。 $M^2$  因子测量方法有两点法、三点法和双曲线拟合法等,其中双曲线拟合法最为精确<sup>[4]</sup>。束宽可根据束腰半径(旋转对称光束光强最大值的  $1/n$  处两点间距离之半为束腰半径)、环围功率和二阶矩等定义得到<sup>[4]</sup>,其中常用的  $n$  取值有  $e^2$  和  $e$  等。本文采用二阶矩定义方法计算束宽。

### 2.2 正交散焦光栅 $M^2$ 因子测量系统

散焦光栅实质上是离轴的非涅耳波带片(FZP),如图 1 所示,一方面起着普通光栅的棱镜作用,将入射波前在光栅的不同衍射级上分束,具有对称分布的正负级次衍射光轴;另一方面起着非涅耳波带片的透镜作用,在不同的衍射级上面引入不同的透镜效应。将一对正交叠放的散焦光栅和短焦透镜密接使用,能够产生 9 个衍射光轴,可以在一个平面上对 9 个物平面同时进行成像。经过合理设计,每个光轴上可以具有不同的等效焦距,分别稍长于和稍短于零级焦距,如图 2 所示。当高斯光束入射

正交散焦光栅短焦透镜组合时,在 9 个光轴上产生互相分离的高斯光束,变换后高斯光束的束腰位置分别在各自衍射级的焦平面附近。像平面上的 9 个光斑可以近似认为是高斯光束束腰附近的 9 个光斑,可据此拟合出光束的  $M^2$  因子。

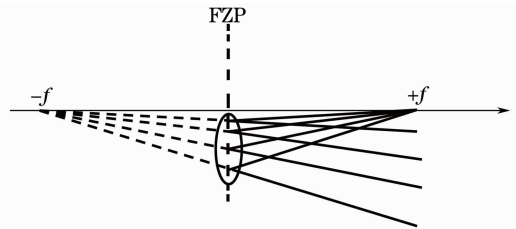


图 1 散焦光栅工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram for working principle of the defocus grating

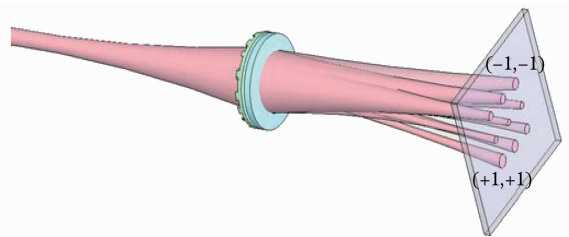


图 2 高斯光束通过正交散焦光栅透镜组合的光束示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the defocus-grating-lens combination for Gaussian beam imaging

$M^2$  因子的测量要求被测光斑均等地分布在束腰两侧 2 倍瑞利范围内<sup>[15]</sup>,这取决于散焦光栅的等效焦距和短焦透镜的焦距; CCD 相机采集的 9 个光斑图像均匀地分布在靶面上,这取决于散焦光栅的离轴量。综合考虑以上因素,取束腰半径 2 mm,束腰位置 1 m,设计选取第一个光栅的焦距为 12120 mm,离轴量为 90 mm,第 2 个光栅的焦距为 36360 mm,离轴量为 270 mm,短焦透镜的焦距为 200 mm。此组参数可以保证各个衍射级的焦平面位于零级焦平面两侧两倍瑞利范围内,并且 9 个光斑均匀分布在探测平面上。

设计的实验测量系统如图 3 所示:由正交散焦光栅、CCD 相机、短焦透镜和计算机数据采集处理单元等组成。CCD 相机为 JAI 公司生产的 CV-A10CL 型逐行扫描黑白数字相机,感光面大小为  $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ ,单个像素大小为  $8.37 \mu\text{m} \times 8.37 \mu\text{m}$ ,像素位深为 10 bit,背景灰度值为 100,噪声不超过 55 dB;采用商业上常用的相机镜头取代短焦透镜,焦距 200 mm。前一个透镜用于光束变换,将光束束腰宽度和束腰位置变换到合适的范围。整个系统无机械移动装置,结构简单。

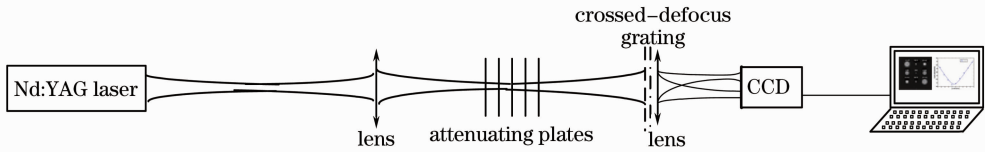


图 3 脉冲激光  $M^2$  因子实验测量装置图

Fig. 3 Experimental setup for measuring  $M^2$  factor of Nd:YAG laser

### 2.3 被测光束束腰宽度与束腰位置影响分析

经过分析可知,在实际测量中的误差主要有以下两方面的原因造成,需要分析其对测量精度的影响。不能严格确定各衍射级束腰位置,即无法精确测量同一高斯光束上被测光斑与束腰之间的距离,采用各衍射级焦距与零级焦距之差代替光斑到

束腰之间的距离;被测光束的束腰宽度和束腰位置也无法精确控制到和设计值一致。

下面对系统的测量精度进行理论分析,散焦光栅与短焦透镜密接使用可以等效为具有不同光轴、焦距的 9 个薄透镜。图 4 为高斯光束通过薄透镜的变换关系示意图。

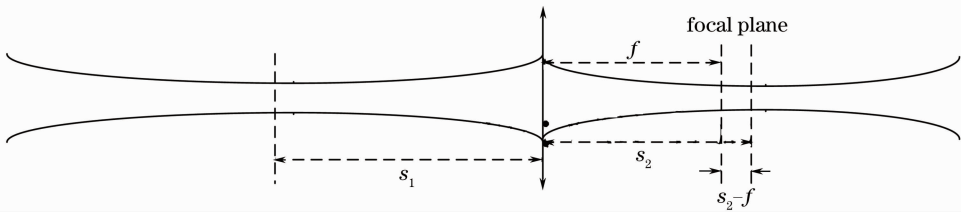


图 4 高斯光束薄透镜变换

Fig. 4 Lens transformation of Gaussian beam

图中  $f$  为薄透镜焦距,  $s_1, s_2$  为物方与像方束腰距薄透镜的距离。根据薄透镜对高斯光束的变换关系可得<sup>[4]</sup>

$$s_2 = \frac{(s_1^2 - s_1 f + Z_{01}^2) f}{f^2 - 2s_1 f + s_1^2 + Z_{01}^2}, \quad (2)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda(s_1 + s_2 - s_1 s_2 / f)^2 + \lambda(1 - s_2 / f)^2 Z_{01}^2}{\pi Z_{01}}}, \quad (3)$$

式中  $s_{20}$  为零级衍射光束腰和透镜的距离,  $\omega_2$  为  $s_{20}$  处像方光斑大小;  $Z_{01} = \pi \omega_{01}^2 / \lambda$  为物方瑞利长度。

以基模高斯光束为例,由(2)式和(3)式,计算出零级光束束腰位置和束腰位置处的各衍射级光斑分布,然后采用各衍射级焦距与零级焦距之差近似各光斑之间的距离,采用双曲线拟合方法,计算其  $M^2$  因子理论测量误差随物方束腰宽度和物方束腰位置变化情况。其中理论测量误差定义为采用焦距差近似光斑之间的实际距离拟合得到的  $M^2$  因子与实际高斯光束  $M^2$  因子之差和实际高斯光束  $M^2$  因子的比值。图 5 为分别取物方束腰半径为 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 和 7 mm 时,  $M^2$  因子理论测量误差随物方束腰位置的变化示意图,由图 5 可知物方束腰半径在 2~6 mm 之间时,被测光束束腰位置距离正交散焦光栅  $\pm 2$  m 范围内  $M^2$  因子理论测量误差不大于 0.01。图 6 为分别选取物方束腰位置距离正交光栅

-0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2 和 2.5 m 时,  $M^2$  因子理论测量误差随光束的束腰半宽的变化示意图,可知束腰位置在  $\pm 2$  m 范围内变化时,束腰半径在 2~6 mm 范围内  $M^2$  因子理论测量误差小于 0.01。

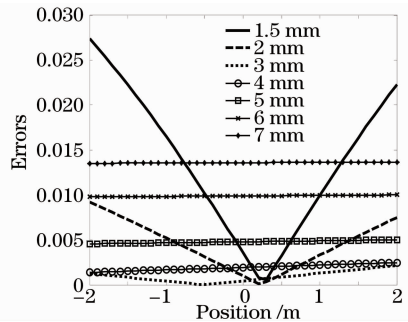


图 5 误差随物方束腰位置的变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of errors as a function of positions of beam waist

激光场分布可以展开为各阶相互正交的模式场叠加,多模光束也可以展开为不同阶次的高斯光束的组合,高阶高斯光束同基模高斯光束一样满足 ABCD 传输定理<sup>[4]</sup>,通过对基模高斯光束进行分析,可以获知单模光束或者多模光束的  $M^2$  因子变化情况。经过分析可知,采用正交散焦光栅测量单模光束和多模光束可以获得相同的测量精度,只需将多模光束所对应的基模光束的束腰宽度和束腰位置控制在合适的范围内即可。

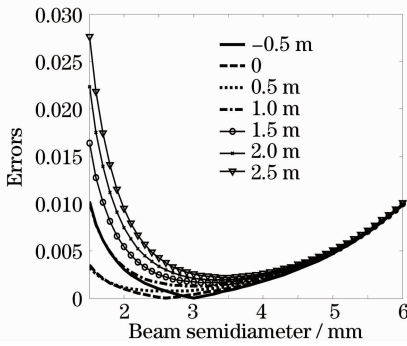


图 6 误差随腰斑大小的变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of errors as a function of beam semidiameters

鉴于以上分析,所设计的正交散焦光栅透镜组合可以在较大工作范围内拥有较高的  $M^2$  因子测量精度。在实际测量过程中,可以根据腔型结构估计出或者直接测量出被测光束的基模光束束腰宽度和束腰位置,然后采用光束变换系统将被测光束的基模高斯光束束腰宽度和束腰位置变换到合适的范围内进行测量。

### 3 脉冲激光 $M^2$ 因子实验测量及结果分析

采用如图 3 所示装置对 1064 nm 固体 Nd:YAG 脉冲激光进行测量,该激光器是一台种子注入式电光调 Q 激光器,4 种重复频率可调 1, 5, 10 和 20 Hz, 单个脉冲的输出能量随抽运电压的升高而增加,脉宽 7~15 ns。采用相机镜头可以避免出现大的色差和像差,并且具有较大的像距调节范围,在测量过程中,通过前一个透镜将被测光束束腰宽度和位置调节到合适的范围内,然后通过调节像距,使 CCD 相机探测面位于零级光斑的束腰位置,实时采集光斑图像,然后利用数据处理系统,拟合被测光束  $M^2$  因子。

调节激光器的抽运电压,从 880 V 升高到 1000 V, 间隔为 20V, 分别进行测量,以 20 Hz 重复频率采集多帧激光脉冲图像。图 7 为电压 960 V 时,CCD 相机采集到的某个脉冲所成像的 9 个光斑图像,由图可知 9 个光斑均匀分布在探测面上。

#### 3.1 单个脉冲 $M^2$ 因子测量

根据 CCD 相机采集到的光斑图像,先去除背景噪声的影响,再由二阶矩方法计算光束的束宽。利用各衍射级焦距与零级的焦距差代替各光斑之间的距离,拟合  $M^2$  因子。由图 7 可知,由于存在热效应,棒内温度分布不均匀,激光波前存在较强的像

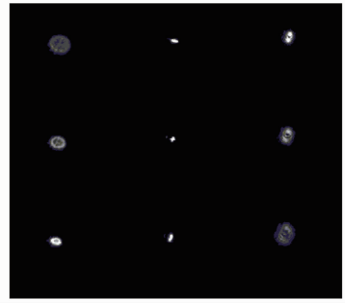
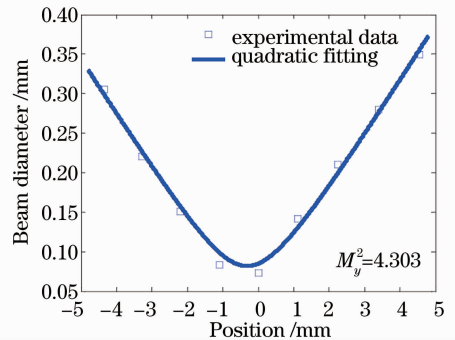
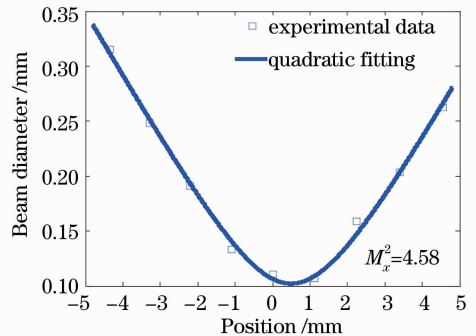


图 7 抽运电压为 960 V 时采集到的图像

Fig. 7 Image of laser working at 960 V from  $M^2$  measurement system

差,导致所得到的光斑图样为椭圆形,并且有些光斑的椭圆率低于 0.8,需要在两个主轴方向分别测量、计算  $M^2$  因子。选取光斑图中横向的主轴方向为  $x$  方向,纵向的主轴方向为  $y$  方向。图 8 为抽运电压为 960 V 时,某个脉冲光斑沿  $y$  方向束宽和位置拟合曲线,拟合出来的  $M_y^2$  因子为 4.303; 图 9 为抽运电压为 940 V 时,某个脉冲光斑沿  $x$  方向束宽和位置拟合曲线,拟合出来的  $M_x^2$  因子为 4.58。

图 8 960 V 抽运电压  $y$  方向光斑直径与位置拟合曲线Fig. 8 Plot of beam diameters and  $y$  positions for working at 960 V图 9 940 V 抽运电压  $x$  方向光斑直径与位置拟合曲线Fig. 9 Plot of beam diameters and  $x$  positions for working at 940 V



### 3.2 脉冲之间 $M^2$ 因子变化和 $M^2$ 因子随抽运电压的变化

图 10 和图 11 为抽运电压 880, 900, 920, 940, 960, 980 和 1000 V, 20 Hz 重复频率时, 测得的 10 个脉冲的  $M_x^2$  和  $M_y^2$  因子变化柱状图。

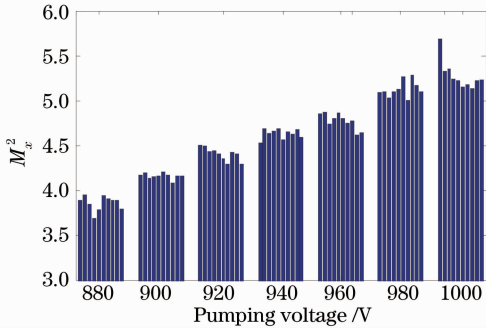


图 10 不同抽运电压 10 个脉冲  $M_x^2$  分布示意图  
Fig. 10 Schematic diagrams of  $M_x^2$  as a function of pumping voltages

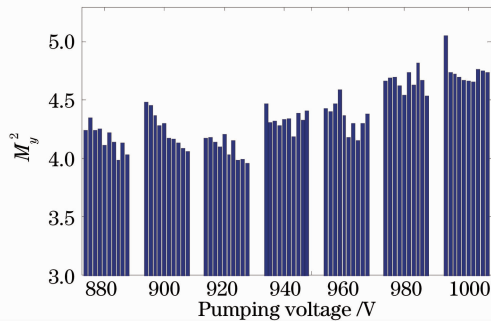


图 11 不同抽运电压 10 个脉冲  $M_y^2$  分布示意图  
Fig. 11 Schematic diagrams of  $M_y^2$  as a function of pumping voltages

图 12 为 10 个脉冲的  $M^2$  因子标准方差随抽运电压变化关系图。不同电压下,  $M_x^2$  因子标准方差分别为 0.075, 0.046, 0.074, 0.064, 0.202, 0.094 和 0.177;  $M_y^2$  因子标准方差分别为 0.104, 0.163, 0.098, 0.072, 0.187, 0.103 和 0.112。由图可知不

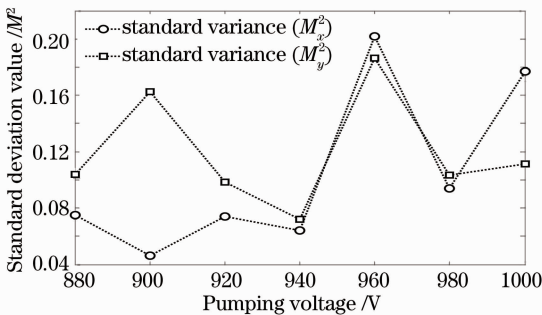


图 12 测得的  $M^2$  因子标准方差随电压变化关系图  
Fig. 12 Schematic diagrams of the standard variance of  $M^2$  factors as a function of pumping voltages

同脉冲之间的  $M^2$  因子变化具有随机性,  $M_x^2$  因子标准方差最大可达 0.202,  $M_y^2$  因子标准方差最大可达 0.187, 传统装置移动 CCD, 通过测量不同脉冲的光强分布来拟合同一束光不同位置处的光强分布, 会带来很大的测量误差。

图 10 和图 11 分别为 10 个脉冲  $M_x^2$  因子和  $M_y^2$  因子随抽运电压变化关系图。当抽运电压升高时, 由于抽运功率增大, 固体增益介质棒中的热沉积增强, 热畸变增加, 引起  $M^2$  因子逐步增大, 测量结果与实际激光器的工作过程相符。基于正交散焦光栅的  $M^2$  因子测量系统可以给研究增益介质的热沉积对脉冲激光的光束质量影响提供了有力的实验支持。

实验表明基于正交散焦光栅的脉冲激光  $M^2$  因子测量系统实现了对单个脉冲的  $M^2$  因子测量, 可以检测不同脉冲之间  $M^2$  因子的变化, 以及实时监测激光器运行过程中  $M^2$  因子的变化情况。

## 4 结 论

介绍了散焦光栅工作原理和基于正交散焦光栅的  $M^2$  因子测量系统的设计原理, 理论分析了被测光束束腰宽度和束腰位置变化对测量精度的影响, 结果表明系统对测量环境要求较低, 动态工作范围较大, 只要将被测光束基模光束束腰宽度和束腰位置控制在设计范围内, 系统就可以在较大测量范围内获得较高的测量精度。物方束腰半径在 2~6 mm 之间时, 被测光束束腰位置距离正交散焦光栅  $\pm 2$  m 范围内  $M^2$  因子理论测量误差不大于 0.01。设计了一套光束  $M^2$  因子测量装置, 测量了固体脉冲激光器的  $M^2$  因子。得到了单个脉冲的  $M^2$  因子、脉冲之间的  $M^2$  因子变化和  $M^2$  因子随电压的整体变化情况。与传统  $M^2$  因子测量系统相比, 基于正交散焦光栅的  $M^2$  因子测量系统特别适用于测量脉冲激光单个脉冲、脉冲之间和激光运行期间的  $M^2$  因子变化。此系统全光学地实现了脉冲激光束的  $M^2$  因子测量, 没有机械移动装置, 结构简单, 可广泛应用于激光加工、定向能技术和自适应光学等领域。

## 参 考 文 献

- 1 J. V. Sheldakova, T. Y. Cherezova, A. G. Aleksandrov *et al.*. The use of  $M^2$  meter to correct for high-power laser aberrations [C]. *SPIE*, 2005, **5708**: 352~359
- 2 Huang Zhonglun, Guo Jin, Fu Youyu. Various methods for evaluating laser beam quality[J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(3): 1~3

黄忠伦, 郭 劲, 付有余. 评价激光光束质量的各种方法[J]. 激

- 光杂志, 2004, **25**(3): 1~3
- 3 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Yang Shaozhuang *et al.*. Experimental study on beam parameter measurement system by using area array CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 993~996  
高雪松, 高春清, 杨绍状等. 面阵 CCD 激光束参量测量系统及其实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(7): 993~996
- 4 Lü baida. Laser Optics-Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics[M]. Third edition, Beijing: High Education Press, 2003. 75~77, 111~112  
吕百达. 激光光学-光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 第3版北京: 高等教育出版社. 2003. 75~77, 111~112
- 5 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Realtime laser beam quality measurement technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 255~258  
于永爱, 张玲玲, 唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 255~258
- 6 Fang Tao, Ye Xin, Wang Zhimin *et al.*. Real-time measurement of beam quality factor  $M^2$  based on diffraction gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 650~654  
房滔, 叶新, 王志敏等. 一种基于衍射光栅光束质量  $M^2$  因子的实时检测技术[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 650~654
- 7 S. W. Min, B. Javidi, B. H. Lee. Enhanced three-dimensional imaging by use of double display devices[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(20): 4186~4195
- 8 Paul M. Blanchard, Alan H. Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- 9 Paul M. Blanchard, David J. Fisher, Simon C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655
- 10 W. L. Robert, C. Rodolpho, J. W. Andrew *et al.*. Compact optical system for pulse-to-pulse laser beam quality measurement and applications in laser machining [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5037~5046
- 11 Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi *et al.*. Wavefront curvature sensor with phase defocus grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 377~378  
习锋杰, 许晓军, 王铁志等. 相位光栅型波前曲率传感器[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 377~378
- 12 Xi Fengjie, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun *et al.*. High-diffractive-efficiency defocus grating for wavefront curvature sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(11): 3444~3448
- 13 Wang Xiaobo, Xu Xiaojun, Li Xiao *et al.*. Revising the formula of thermal focal length in a side-pumped laser rod by experiments [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5237~5240
- 14 Geng Yifeng, Xu Xiaojun, Xi Fengjie. Real-time measurement of beam quality factor  $M^2$  based on defocus gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 98~100  
耿义峰, 许晓军, 习锋杰. 一种基于散焦光栅的光束质量  $M^2$  因子实时测量技术[J]. 中国激光, 2008, **35**(s1): 98~100
- 15 International Organization for Standardization (ISO) Standard EN ISO 11146: 2005. Lasers and Laser-Related Equipment. Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios[S]. ISO, Geneva, Switzerland, 2005