

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0308-06

正交散焦光栅 M^2 因子测量系统设计与研究

马浩统 习锋杰 周 朴 王小林 许晓军 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 对基于正交散焦光栅的 M^2 因子测量系统进行了理论研究, 该测量系统可以同时测量光束束腰附近 9 个不同位置处的光强分布, 并由二阶矩方法计算束宽, 经双曲线拟合得到被测光束的 M^2 因子。为了优化系统设计和提高系统测量精度, 根据高斯光束的薄透镜变换关系, 针对基模高斯光束和多模高斯光束, 分析被测光束束腰宽度、束腰位置和模式分布对测量系统测量精度的影响。结果表明, 基模高斯光束或者多模高斯光束所对应基模高斯光束的束腰宽度在设计范围内时, 系统可在较大的测量距离内具有较高的测量精度。该研究为实际系统的设计和测量提供了理论指导。

关键词 激光技术; 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/CJL200936s1.0308

Research on the Measurement of M^2 Factor Based on Crossed Defocus Gratings

Ma Haotong Xi Fengjie Zhou Pu Wang Xiaolin Xu Xiaojun Liu Zejin

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

Abstract M^2 factor measuring system which based on crossed defocus gratings is theoretical analyzed. This instrument can get nine intensity distributions of different positions near the beam waist. The M^2 factor is determined by calculating the beam waist using the second moment method and curve-fitting. According to the theory of Gaussian beam propagation and transformation; using the zeroth-order and multi-modes Gaussian beam, measured errors as functions of beam waist, positions and modes distribution are analyzed. If zeroth-order Gaussian beam waist radius or the zeroth-order Gaussian beam waist radius corresponding to multi-modes beam was properly controlled, the measuring system can work well in a large range. The guidance for the M^2 factor measuring system is provided by this analysis.

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

1 引 言

光束质量是衡量激光光学特性的一项重要指标, 目前激光光束质量评价标准主要有: 聚焦光斑尺寸、远场发散角和 M^2 因子等。 M^2 因子同时考虑了束宽和远场发散角对激光束的影响, 被国际标准化组织(ISO)采纳^[1~3], 但是 M^2 因子在评价类高斯等光束时的光束质量存在一定的困难^[4], 不同的评价标准在不同的应用领域具有不同的优势^[5]。

在激光加工、定向能技术等应用领域中, 光束质量的变化对激光应用效率具有很大的影响, 实时检

测光束质量变化显得尤为重要。传统光束质量检测方法采用移动 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、透镜阵列法等可以实现多个位置的同时测量, 但存在光路过于复杂、操作繁琐等缺陷^[6,7]。

1998 年, Paul M. Blanchard 等^[8,9] 提出了基于散焦光栅的多平面成像技术, 实现对 3 个物平面的同时成像。2004 年, W. L. Robert 等^[10] 将两个正交叠放的相位型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, 并拟合出激光

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的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

束的 M^2 因子,整个测量系统没有机械移动装置,操作简单。2006年,习锋杰等^[9,11]研制出了相位光栅型波前曲率传感器,王晓波等^[12]利用光栅型波前曲率传感器实现了固体激光器热透镜焦距的测量。耿义峰等^[13]将正交散焦光栅应用于 He-Ne 激光器的 M^2 因子测量,验证了其测量的有效性,但并未对该系统的适用范围和测量精度等进行详细的讨论。

本文根据高斯光束薄透镜变换关系,介绍了正交散焦光栅激光 M^2 因子测量系统设计原理,分析了被测光束束腰宽度、束腰位置和模式分布等变化对测量精度的影响,为实际测量系统的优化设计提供了指导。

2 正交散焦光栅 M^2 因子测量原理

2.1 激光 M^2 因子定义

M^2 因子的定义为

$$M^2 = \frac{\text{实际光束束腰宽度与远场发散角之积}}{\text{理想光束束腰宽度与远场发散角之积}} \quad (1)$$

这里理想光束取同波长的基模高斯光束,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^[14]。 M^2 因子表示实际光束偏离基模高斯光束的程度,综合描述了激光束的光束质量。

M^2 因子的测量方法有三点法、两点法和双曲线拟合法等,其中双曲线拟合法最为精确。ISO 标准中要求该方法在待测光束束腰两侧两倍瑞利范围内测量 10 个点的光强分布,且有约一半位于瑞利范围之内^[14]。在位置 z_1, z_2, \dots, z_{10} 处测的束宽为 d_1, d_2, \dots, d_{10} ,束宽测量值按双曲线拟合为传输距离 z 的函数,束宽可根据 $1/n$, 环围功率和二阶矩等定义得到

$$d^2(z) = a + bz + cz^2, \quad (2)$$

M^2 因子由拟合参数 a, b, c 表示为

$$M^2 = \frac{\pi}{8\lambda} \sqrt{4ac - b^2}. \quad (3)$$

2.2 正交散焦光栅测量 M^2 因子

散焦光栅实质上是离轴的非涅耳波带片^[15],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。散焦光栅和短焦透镜密接使用,短焦透镜提供主要的聚焦能力,使得正负一级衍射光具有不同的焦距,分别稍长于和稍短于透镜焦距。

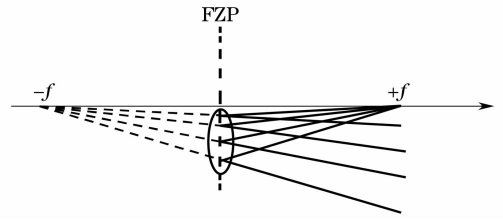


图 1 散焦光栅光学原理示意图

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

若将一对正交叠放的散焦光栅和短焦透镜密接使用,可以在一个像平面上对 9 个物平面同时成像。经过合理设计,当高斯光束入射时,在 9 个光轴上产生互相分离的高斯光束,变换后的高斯光束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。

3 正交散焦光栅透镜组合参数选择及误差分析

3.1 正交光栅透镜参数选择

散焦光栅与短焦透镜密接使用可以等效为具有不同焦距的 9 个薄透镜,对高斯光束的薄透镜变换进行理论分析,可以指导测量系统的设计。

图 2 所示为高斯光束通过薄透镜的几何关系示意图,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^[1]可得

$$s_2 = \frac{(s_1^2 - s_1 f + Z_{01}^2) f}{f^2 - 2s_1 f + s_1^2 + Z_{01}^2}, \quad (4)$$

$$\omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{(1 - s_1/f)^2 + Z_{01}^2/f^2}}, \quad (5)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda(s_1 + s_{20} - s_1 s_{20}/f)^2 + \lambda(1 - s_{20}/f)^2 Z_{01}^2}{\pi Z_{01}}}, \quad (6)$$

这里 ω_{01}, ω_{02} 为物方与像方束腰宽度, ω_2 为像方光斑大小, s_{20} 为像位置; $Z_{01} = \pi \omega_{01}^2 / \lambda$, 为物方瑞利长度。

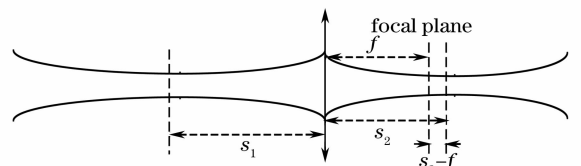


图 2 高斯光束薄透镜变换

Fig. 2 Lens transformation of Gaussian beam

利用(4)式和(5)式进行理论分析,结果表明,固定透镜焦距和物方束腰位置,物方束腰宽度越大,像方束腰位置偏离焦平面的距离越小,同时像方的束腰宽度越小;固定物方束腰宽度和透镜焦距,物方束腰距离透镜越远,像方束腰偏离焦平面的距离越大,像方束腰宽度越小;固定物方束腰和物方束腰位置,透镜焦距越大,像方束腰宽度越大,像方束腰位置偏离焦平面距离越大。设计 M^2 因子测量系统时,希望像方束腰位置处于焦平面附近,需要较大的物方束腰宽度、较小的透镜焦距;考虑到利用 CCD 相机采集成像光斑,欲保证精度,需要较大像方光斑,较小物方束腰宽度、较大透镜焦距,两者相互矛盾,取折中值。

综合考虑,取束腰半宽 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,第二个光栅的焦距为 36360 mm,离轴量为 270 mm,短焦透镜的焦距为 200 mm。在此组参数下,9 个光斑近似均等地分布在束腰两侧两倍瑞利范围内,并且由下面的分析可知,系统对物方束腰宽度和束腰位置等测量参数在设计值附近较大范围内变化不是很敏感,即系统具有较大的动态工作范围。

3.2 误差分析

系统在测量过程中,是将零级束腰位置处平面上所成像的 9 个光斑近似成零级光轴上不同位置处的 9 个光斑,各光斑与自身束腰位置之间的距离近似成像光斑与零级光斑之间的距离,通过双曲线拟合得到所测光束的 M^2 因子;系统是针对束腰半宽 2 mm,位置 1 m 基模高斯光束设计的,在实际测量过程中,被测光束束腰位置和束腰宽度无法精确到和设计值一致;被测光束可能存在多种模式分布,以上因素都会给实际测量带来一定的影响,需要对其进行分析。

3.2.1 基模高斯光束误差分析

选取基模高斯光束,根据高斯光束的薄透镜变换关系,利用(2)式,(3)式,(4)式和(6)式计算分析物方束腰宽度和束腰位置等对 M^2 因子测量的影响。图 3 为取物方束腰半径为 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 6.5 mm 时, M^2 因子理论测量误差随物方束腰位置变化示意图;图 4 为取物方束腰距离正交光栅 -1 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m 时, M^2 因子理论测量误差随物方束腰宽度变化示意图。由以上两图可知系统测量精度与被测光束的束腰宽度和束腰位置有关。当物方束腰距离测量系统小于 2 m 时,物方束腰半宽在 1.5 mm 到 6 mm 之间

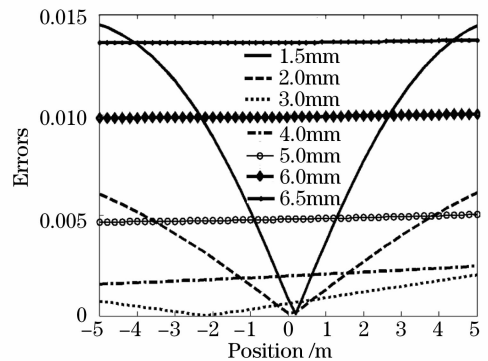


图 3 误差随物方束腰位置的变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of errors as a function of positions

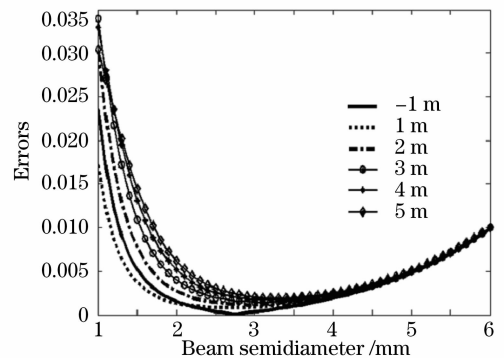


图 4 误差随束腰大小的变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of errors as a function of beam semidiameters

变化,系统的理论测量误差不大于 0.01;当物方束腰半宽在 2 mm 到 6 mm 之间时,物方束腰位置在 ± 5 m 范围内变化,系统的理论测量精度变化不大,误差不大于 0.01。

可知被测光束的束腰位置或者束腰宽度在设计值附近较大范围内变化时,对系统测量精度影响不大,系统具有较大的动态工作范围。当物方束腰宽度过大或者过小时,物方束腰距离透镜位置过远,系统的测量误差会增大,针对此类光束需要采用光束变换系统将其变换到合适的范围内进行测量。

3.2.2 多模光束误差分析

稳定腔激光器工作过程中,往往存在多种模式,这是导致 M^2 因子增大、光束质量变差的主要原因。针对基模高斯光束设计的系统,用于测量存在高阶模式分布的激光时,会存在一定的测量误差,需要对其进行分析。下面采用厄米-高斯函数形式表征高阶高斯光束,分析系统的理论测量误差。

取归一化 x 方向上的厄米-高斯函数形式为

$$u_n[x, \omega(z)] = \left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{\frac{1}{2^n n!}} H_n\left[\frac{x}{\omega(z)}\right] \times \exp\left[-\frac{x^2}{2\omega^2(z)}\right], \quad (7)$$

其中 $H_n\left[\frac{x}{\omega(z)}\right]$ 为 n 阶厄米多项式, 厄米-高斯函数的场分布构成了一组正交函数, 因此场分布可以展开为厄米-高斯分布的各阶模式场的叠加。取光场振幅分布为

$$E(x) = \sum c_n u_n(x, \omega), \quad (8)$$

其中

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) u_n(x, \omega) dx.$$

根据二阶矩定义, 得光束的束腰半径为

$$W_x^2 = \sum c_n^2 (2n+1) \omega_0^2 = M^2 \omega_0^2, \quad (9)$$

式中 W_x 为多模光束 x 方向上的束腰半径, ω_0 为基模高斯光束的束腰半径, $M^2 = \sum c_n^2 (2n+1)$ 为多模光束的 M^2 因子, c_n^2 为各个模式的强度权重因子。 y 方向具有相同的结论。

高阶高斯光束同基模高斯光束一样满足 $ABCD$ 定律, 可以参考基模高斯光束的传输变换关系, 对高阶高斯光束进行分析^[1]。

假设被测光束所包含的模式为 TEM_{00} 和 TEM_{11} , 分析可知, 其他模式分布的光束具有相同的结论。改变两模式之间权重 (TEM_{11} 从 0 间隔 0.1 递增到 1), 根据多模光束束腰宽度定义 (9) 式, 分析计算物方束腰宽度和束腰位置变化对系统测量精度的影响。图 5 为取物方基模高斯光束束腰半宽 2 mm, 束腰位置在 ± 5 m 范围内变化时, 理论测量值与理论实际值之差随束腰位置的变化关系, 可以

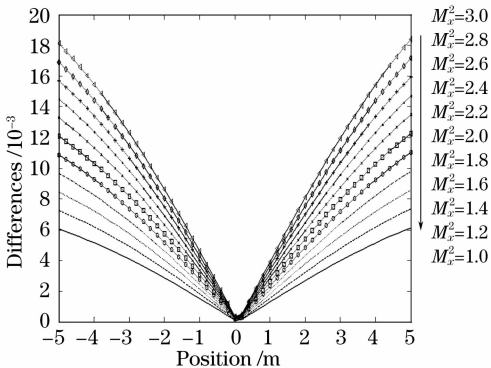


图 5 理论测量值与理论实际值之差随物方束腰位置的变化

Fig. 5 Schematic diagram of the difference between real values and measured values as a function of positions

看出理论测量值与理论实际值之差随着高阶模式权重的增加 (M^2 因子增大) 逐渐变大。图 6 为系统理论测量值与理论实际值之差与理论实际值的比值 (测量误差) 随物方束腰位置变化示意图, 由图可知测量误差与被测光束模式分布没有关系。

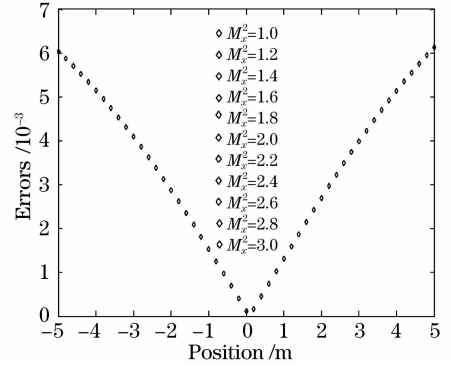


图 6 测量误差随物方束腰位置的变化

Fig. 6 Schematic diagram of measured errors as a function of positions

图 7 为选取物方束腰位置距离测量系统 1 m, 物方基模高斯光束束腰半宽在 1.5 mm 和 6 mm 之间变化时, 理论测量值与理论实际值之差随束腰位置的变化关系图, 可以看出理论测量值与理论实际值之差随着高阶模式权重增加 (M^2 因子增大) 逐渐变大, 但由图 8 可知其测量误差不受模式分布的影响。

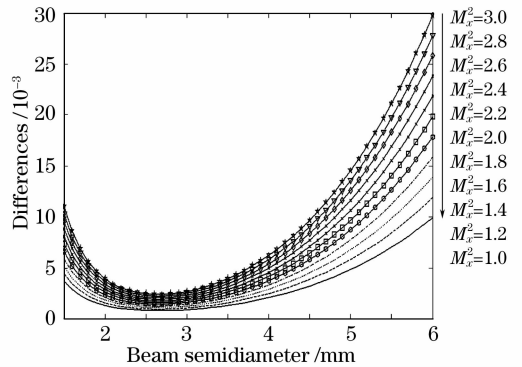


图 7 理论测量值与理论实际值之差随腰斑大小的变化

Fig. 7 Schematic diagram of the difference between real values and measured values as a function of beam semidiameters

图 5~图 8 中的束腰半宽为所对应的基模高斯光束的束腰半宽, 组合高斯光束的束宽可根据 (9) 式求得。

由分析可知, 在测量多模光束 M^2 因子过程中, 以所对应基模高斯光束的束腰宽度为考察对象。束腰位置为 1 m 时, 所对应的基模高斯光束束腰半宽

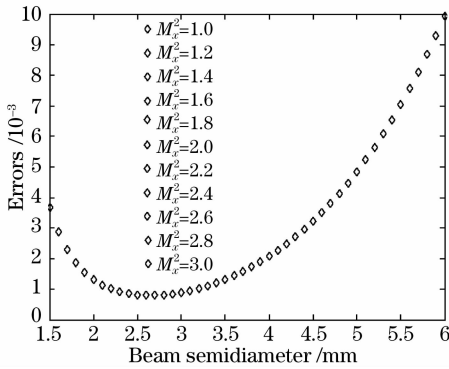


图 8 测量误差随物方束腰位置的变化

Fig. 8 Schematic diagram of measured errors as a function of beam semidiameters

在 1.5 mm 到 6 mm 范围内变化时系统的测量误差不超过 1%；取基模高斯光束束腰半宽为 2 mm，束腰位置在 ±5 m 范围内变化，系统的测量误差不超过 1%。由以上可知仅考虑所对应的基模高斯光束的束腰宽度时，多模光束的测量精度同基模高斯光束的测量精度相同。

以多模高斯光束的束腰半宽为考察对象，进行计算分析。图 9 是取物方束腰半宽为 2 mm 时，系统测量误差随束腰位置的变化曲线；图 10 为取物方束腰位置 1 m，测量误差随束腰宽度的变化示意图。由图可知随着高阶模式强度权重的增加 (M^2 因子增大) 系统的测量误差逐渐增大。由图 5~图 10 可知，欲使系统具有高的测量精度，必须将多模光束所对应的基模光束的束腰半宽控制在设计范围内。

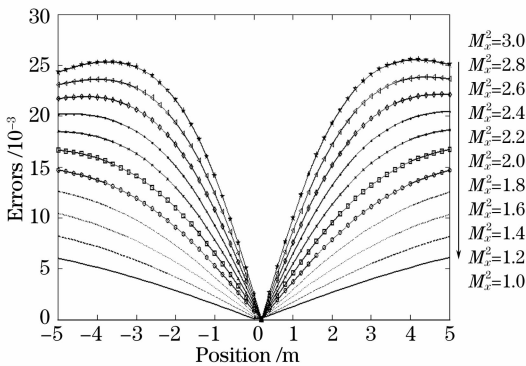


图 9 测量误差随物方束腰位置的变化

Fig. 9 Schematic diagram of measured errors as a function of positions

正交散焦光栅 M^2 因子测量系统不仅可以在较大的动态工作范围内有效地测量基模高斯光束 M^2 因子，还可以同样精确地测量多模光束的 M^2 因子。在用于测量多模光束或者单模光束时，需要根据被测系统的腔型结构估算出或者直接测量出所对应的

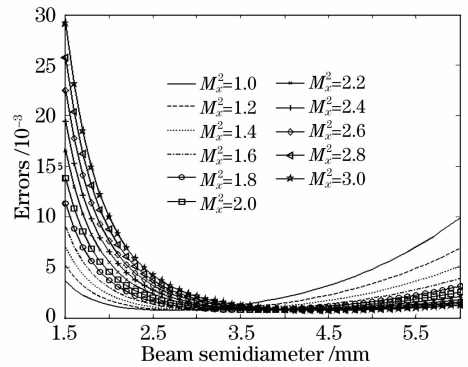


图 10 测量误差随腰斑大小的变化

Fig. 10 Schematic diagram of measured errors as a function of beam semidiameters

基模高斯光束的束腰宽度，然后采用光束变换系统将基模光束束腰变换到设计范围内进行测量，可得到较高的测量精度。

4 结 论

介绍了散焦光栅工作原理和正交散焦光栅 M^2 因子测量系统的设计要求，理论分析了被测光束束腰宽度、束腰位置变化和模式分布等对测量系统测量精度的影响。分析结果表明，基于正交散焦光栅的 M^2 因子测量系统具有对测量环境要求较低、测量精度高的特点。在测量 M^2 因子时，将基模高斯光束或者多模光束对应的基模高斯光束束腰宽度控制在设计值附近，系统可以在较大的测量距离内获得高的测量精度。当被测光束基模高斯光束束腰半宽在 2 mm 到 6 mm 之间时，物方束腰位置在 ±5 m 范围内变化，系统的理论测量误差不大于 0.01。理论分析为系统优化设计和提高测量精度提供了有力的指导。

参 考 文 献

- Lü Baida. Laser Optics-Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics [M]. 3rd ed., 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
- 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
- Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin et al.. Real-time 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
- Yang Huanxiong, Zhao Daomu, Lu Xuanhui et al.. Several

- viewpoints related to the beam quality factor M^2 [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8): 709~715
- 杨焕雄, 赵道木, 陆璇辉等. 关于光束质量因子 M^2 的几点看法[J]. 中国激光, 1997, **A24**(8): 709~715
- 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 Lu X., Wang Y., Wu M. *et al.*. The fabrication of a 25×25 multiple beam splitter[J]. *Opt. Commun.*, 1989, **72**: 157~162
- 7 S. W. Min, B. Javidi, B. Lee. Enhanced three-dimensional integral imaging system 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 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
- 10 Robert W. L., Rodolpho C., Andrew J. W. *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 Wang Xiaobo, Xu Xiaojun, Li Xiao *et al.*. Revising the formula of thermal focal length in a side-pump laser rod by experiments[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5237~5240
- 13 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
- 14 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
- 15 Blanchard P., Fisher D. J., Woods S. C. *et al.*. Phase diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655