

一种基于散焦光栅的光束质量 M^2 因子实时测量技术

耿义峰 许晓军 习锋杰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 设计出相位型正交散焦光栅, 实现了一种新的光束质量 M^2 因子实时测量技术。将散焦光栅和短焦透镜密接使用, 透镜提供主要的聚焦能力, 散焦光栅产生 9 个光轴, 且在每个光轴上对焦距进行微调, 使之具有不同的等效焦距, 这样利用单一的 CCD 就可以在透镜焦平面上同时测量待测光束 9 个不同位置处的光强分布图样。利用二阶矩的方法计算束宽, 经双曲线拟合得到光束的 M^2 因子。对 He-Ne 激光器的输出光束进行了测量, 得到其光束质量因子 $M^2 = 5.775$, 与传统测量方法得到的结果相比, 误差为 5.1%。

关键词 测量; 激光光束质量; M^2 因子测量; 散焦光栅; 多平面成像

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Real-Time Measurement of Beam Quality Factor M^2 Based on Defocus Gratings

Geng Yifeng Xu Xiaojun Xi Fengjie

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

Abstract Crossed phase defocus gratings are designed and a new technique for real-time measurement of beam quality factor M^2 is achieved. We can get the beam spots at 9 various positions to be measured simultaneously by using the defocus gratings closely connecting with a short-focal-length lens. The lens provides the majority of the focusing power and the grating provides 9 separate optical axes and effectively modifies the focal length of each axis. The value of M^2 is determined by calculating the beam diameters using the second moment method and curve-fitting. A He-Ne laser beam is measured by using the gratings designed and a M^2 value of 5.775 is achieved. Compared with a conventional measurement, the error is 5.1%.

Key words measurement; laser beam quality; measurement of the factor M^2 ; defocus grating; multiplane imaging

1 引 言

随着激光在各个领域的广泛应用, 光束质量的评价也显得越来越重要, 并成为近年来国内外研究的热点。 M^2 因子相比于聚焦光斑尺寸、远场发散角、斯特列尔比等评价方法有很多优点, 较科学合理地描述了激光光束质量, 被国际标准化组织 (ISO) 采纳, 并在激光束质量检测中被广泛采用^[1, 2]。 M^2 因子的计算方法有: 定义法、三点法、两点法以及双曲线拟合法, 其中以双曲线拟合法最为精确^[3]。但该方法要求在待测光束束腰两侧两倍瑞利范围内测量多点的光强分布, 当前的国际标准 (ISO 11146;

2005) 是至少 10 点^[4]。传统方法是移动 CCD 逐点测量, 操作烦琐, 为非同时测量, 不能实时检测光束质量, 且不适合于高重复频率脉冲激光的测量。1999 年 Paul M. Blanchard 等^[5]提出了基于散焦光栅的多平面成像技术, 2004 年, 他们又报道了将两个正交叠放的相位型散焦光栅用于测量光束质量 M^2 因子, 但散焦光栅的设计比较复杂^[6]。

本文利用两个直观的设计参量: 等效焦距和离轴量, 设计出了相位型正交散焦光栅, 通过实验验证了这种基于散焦光栅的测量系统的有效性, 并进行了误差分析。

作者简介: 耿义峰 (1981—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事激光光束质量测量方面的研究。

E-mail: gyf0217@163.com

导师简介: 许晓军 (1973—), 男, 江苏人, 副教授, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

2 原 理

散焦光栅实质上是离轴的非涅耳波带片(FZP)^[7],具有一对实虚焦点。汇聚到或发散自实虚焦点处的光是正负一级衍射光,如图1所示,一方面,由于离轴的原因,散焦光栅有对称分布的 ± 1 级衍射光轴;另一方面,由于非涅耳波带片的作用, ± 1 级衍射光有大小相等,一正一负的散焦作用(这也是称之为散焦光栅的原因)。

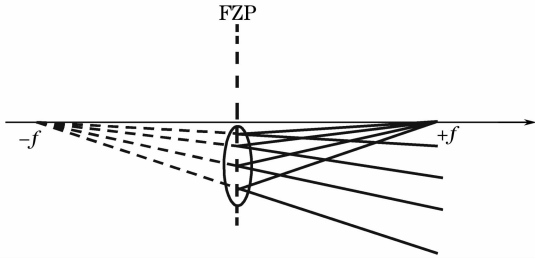


图1 散焦光栅原理示意图

Fig.1 Schematic for the principle of defocus grating

若将散焦光栅和短焦距透镜密接使用,透镜提供主要的聚焦能力,散焦光栅将产生多个光轴,且在每个光轴上对焦距进行微调,使之具有不同的等效焦距,这样就可以在单一的像平面(透镜焦平面)上对3个物平面同时成像。

若将两个正交叠放的散焦光栅和短焦距透镜密接使用,则会产生9个具有不同等效焦距的光轴,这样就可以在单一的像平面上对9个物平面同时成像^[6]。合理设计光栅的参量,可使所测光斑按分布要求在待测激光束的两倍瑞利范围内,对所得光斑采用二阶矩的方法计算束宽,再经双曲线拟合得到激光束的 M^2 因子。若光束为非圆对称的(椭圆率 $\epsilon \leq 0.87$),则应沿光强分布的两主轴方向分别计算束宽,分别算出两主轴方向的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 ^[4]。

3 相位型正交散焦光栅的设计

散焦光栅实质上是离轴的非涅耳波带片,故只需确定其等效焦距 f_g 和离轴量 x_0 ,以及 ± 1 级与0级的衍射效率之比,使其满足测量的要求。所测光斑分布在待测光束的两倍瑞利范围内、CCD上各个光斑大小适中,这两点的实现都取决于散焦光栅的等效焦距 f_g 和透镜的焦距 f_l ,可利用高斯光束的传输公式反复迭代计算来确定它们的值。

CCD上光斑之间的距离由散焦光栅的离轴量 x_0 决定,可先根据 CCD 的大小确定光斑间的距离,从而计算出离轴量 x_0 。各个光斑的峰值光强应尽量相等,否则对 CCD 的动态范围要求很高,可通过设计光栅的衍射效率来实现这点,这也是采用相位型散焦光栅的原因。

设计的光栅参量为:两非涅耳波带片的等效焦距分别为 $f_{g1} = 12120 \text{ mm}$, $f_{g2} = 36360 \text{ mm}$;波带片的离轴量分别为 $x_{01} = 90 \text{ mm}$, $x_{02} = 270 \text{ mm}$;两光栅+1级、0级与-1级的衍射效率之比分别为 $40\%:20\%:40\%$, $33\%:33\%:33\%$ 。另外,透镜焦距 $f_l = 200 \text{ mm}$,入瞳口径 $D = 30 \text{ mm}$,各光斑中心之间的距离 $d = 1.6 \text{ mm}$ 。

4 实 验

实验中测量了 He-Ne 激光器的输出光束,波长为 632.8 nm ,实验装置如图2所示,将正交光栅组、短焦透镜以及放置在透镜焦平面上用以探测光斑的 CCD 封装在一起。待测激光束经衰减及扩束后入射到该系统,对 CCD 探测的光斑进行处理,即可得到待测激光束的光束质量。

实验得到的光斑图样如图3所示,以 d 代表束宽, z 代表光斑间的相对位置,计算得到的各光斑直径如表1所示,对应图3中光斑的顺序为从右向左,

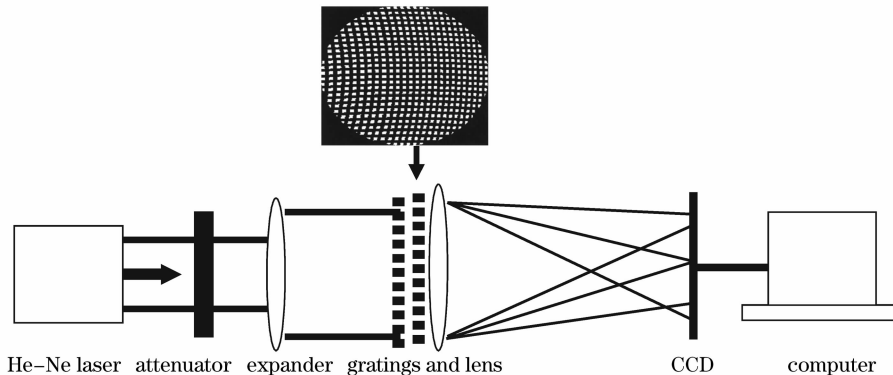


图2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

从下向上。由光斑直径及光斑之间的相对位置拟合的曲线如图 4 所示。计算得到 He-Ne 激光器光束的光束质量 $M^2 = 5.775$ 。

表 1 利用散焦光栅测得的各位置处的光斑直径

Table 1 Beam diameters of various positions based on defocus gratings

d / mm	z / mm	d / mm	z / mm	d / mm	z / mm
0.082	-0.72	0.056	-0.18	0.081	0.36
0.069	-0.54	0.047	0	0.069	0.54
0.079	-0.36	0.053	0.18	0.080	0.72

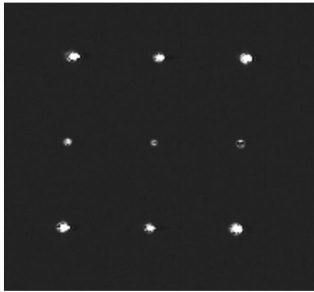


图 3 实验得到的光斑图样

Fig. 3 Experimental beam spot

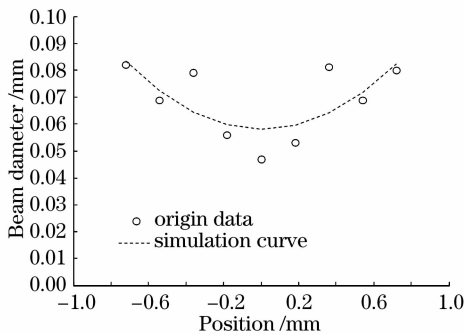


图 4 光斑直径与位置的拟合曲线

Fig. 4 Plot of beam diameters and positions

传统的移动 CCD 法是沿光束方向逐点测量不同位置的光强分布,每次移动 10 mm,测得的各个位置处的光斑直径如表 2 所示。

表 2 传统移动法测得的各个位置处的光斑直径

Table 2 Beam diameters of various positions measured by conventional method

d / mm	z / mm	d / mm	z / mm	d / mm	z / mm
0.917	0	0.885	40	0.910	80
0.950	10	0.909	50	0.910	90
0.897	20	0.879	60		
0.873	30	0.895	70		

由表 2 测量数据计算得到的光束质量因子

$M^2 = 6.085$,而利用散焦光栅测得的结果为 $M^2 = 5.775$,误差为 5.1%,可见基于散焦光栅的 M^2 因子测量系统是有效的。

实验误差主要来源于以下几点:散焦光栅与透镜并不是严格在同一平面,而是存在一定的位置误差;由于扩束镜不是无像差元件,它的使用会影响光束的质量;所测的光斑并不是同一高斯光束上的,而是经分束所形成的 9 个高斯光束上的,这里是将它们近似为同一高斯光束上来拟合的;由于光斑较小,在用 CCD 探测及处理光斑时也会带来一定的误差。

5 结 论

利用等效焦距和离轴量,设计出了相位型正交散焦光栅,并将其与短焦透镜密接使用,对 He-Ne 激光器的输出光束进行了测量,得到其光束质量因子 $M^2 = 5.775$,与传统测量方法得到的结果相比,误差为 5.1%。实验结果表明,该方法结构简单紧凑,操作方便,不仅可以实时测量连续激光的 M^2 因子,还可以测量脉冲激光的 M^2 因子。该技术可用于激光加工中,对光束质量进行实时检测,以保证较高的加工精度和加工效率^[1]。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 Lü Baida. *Laser Optics-Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* [M]. 3rd ed., Beijing: High Education Press, 2003. 12
吕百达. *激光光学-光束描述、传输变换余光腔技术物理* [M]. 3 版,北京:高等教育出版社,2003. 12
- 4 ISO:11146-2005
- 5 Paul M. Blanchard, Alan H. Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- 6 Robert W. Lambert, R. Cortés-Martínez, A. J. Waddie *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
- 7 Andrew Scott. Smart sensing—combining a specialized grating and short-focal—length lens yields a smart sensor for wavefront sensing and beam characterization[C]. *SPIE*, 2004. 25~28