

文章编号: 0258-7025(2009)08-2014-05

非圆对称光束 M^2 因子矩阵的实验研究

邓国亮¹ 冯国英^{1*} 李玮¹ 张天祥¹ 廖海¹ 周寿桓^{1,2}

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 M^2 因子的计算和测量与所采用的坐标系有关, 所以对光斑为非圆对称的光束进行 M^2 因子测量时, 若选取的实验室坐标系不同或者是在非完全相同的实验条件下进行的测量, 测量所得的 M^2 因子并不唯一, 这给实际应用中光束质量的评价带来了不便。为更方便地进行光束质量的评价, 使得不同的实验室坐标系下测量所得 M^2 因子统一, 引入了两个交叉项来表征待测光束光斑主轴与实验室坐标系的位置关系, 定义了 M^2 因子矩阵。同时研究了 M^2 因子矩阵的测量原理和方法, 搭建了 M^2 因子矩阵测试系统, 实验研究了非圆对称光束的束宽以及 M^2 因子随坐标系旋转的变化规律, 测出了 M^2 因子矩阵。

关键词 激光光学; 光束质量; M^2 因子矩阵; 实验测量; 坐标系

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2014

Experimental Study of Beam Quality Factor M^2 Matrix for Non-Circular Symmetry Beam

Deng Guoliang¹ Feng Guoying^{1*} Li Wei¹ Zhang Tianxiang¹ Liao Hai¹ Zhou Shouhuan^{1,2}

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

(² North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract It is inconvenience for the practical application of beam quality assessment because of the uncertainty when test beam quality factor about non-circular symmetry beam is done. The value of M^2 will change if the reference frame or other experimental conditions are different because the test for M^2 is based on reference frame. To have a unity of different laboratory coordinate systems of the M^2 , two cross-terms were introduced into present the relationship of beam spot spindle and laboratory coordinates under test. For describing the beam quality convenient, the M^2 factor matrix is defined. The principle and method for test is studied, and a system to test the M^2 factor matrix has been built. The law of beam width and quality factor M^2 vary with the rotation of the coordinates has been studied by using two laser diodes who have the non-circular symmetry beam on the test system. Their M^2 factor matrix have been tested and calculated at last.

Key words laser optics; laser beam quality; M^2 factor matrix; measurement; coordinates

1 引言

光束质量是评价激光束质量好坏的重要参数, 也是评价激光器品质好坏的重要依据。具有高光束质量的光束, 能极大地提高激光武器的作战参数。在光学存储、医疗、激光焊接、激光切割等应用领域,

光束质量也扮演着重要的角色。所以, 必须对光束质量做定性分析及量化。1990年, Siegman^[1] 提出采用 M^2 因子统一地描述激光光束质量, 这一建议被国际标准化组织所采纳, 并于1991年公布了基于这一建议的 ISO/TC172/SC9/WG1 标准草案^[2]。

收稿日期: 2008-06-16; 收到修改稿日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(10676023, 60890203)和固体激光国家级重点实验室基金资助课题。

作者简介: 邓国亮(1984—), 男, 博士研究生。主要从事新型激光技术和激光检测等方面的研究。

E-mail: demenmaxwell@sina.com

导师简介: 周寿桓(1937—), 男, 中国工程院院士。主要从事新型激光技术方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: guoying_feng@yahoo.com.cn

2005 年, 国际标准化组织公布了最新版本的 M^2 因子测量标准(ISO 11146)^[3]。 M^2 因子的描述方法已经成为一种较为完善、合理的光束质量评价标准, 为大家所接受^[4~11]。对 M^2 因子本身, 也有不少学者进行了很多研究^[12,13]。 M^2 因子的计算和测量基于光束束宽的测量值。实验中, 束宽使用光束强度分布的二阶矩来计算。作者认为, 束宽的计算值与实验中坐标系有关, 故 M^2 因子的测量值也与坐标系有关。对于光斑为非圆对称的情况, 坐标系不同, M^2 因子的测量值也不一样, 这给光束质量的评价带来了不便。本文提出了 M^2 因子矩阵, 其中包含了实验室坐标系下的 M_x^2 和 M_y^2 , 同时用交叉项表示了光斑主轴与实验室坐标系的相关信息, 所以能表征 M^2 因子主对角元素测量值随坐标系旋转的变化关系。

2 M^2 因子矩阵定义及测量原理

对于如图 1 所示的非圆对称光斑, 在实验室坐标系下, 将 M^2 矩阵定义为(在本文的讨论中, 均假定光斑的极大值与极小值的方向相互垂直, 且将其

称为光斑的主轴) $\begin{bmatrix} M_x^2 & M_{xy} \\ M_{yx} & M_y^2 \end{bmatrix}$, 其中 M_x^2, M_y^2 分别为实验室坐标系下 x, y 方向上的 M^2 因子。 M_{xy}, M_{yx} 为表征光斑主轴与实验室坐标系位置信息的交叉项。假定光斑主轴与实验室坐标所成角度为 θ (如图 1 所示), 将光斑再旋转一个角度 α , 此时光斑主轴与实验室坐标系所成角度为 $\theta + \alpha$, 将此时的 M^2 矩阵记为 $\begin{bmatrix} M_{x_1}^2 & M_{x_1 y_1} \\ M_{y_1 x_1} & M_{y_1}^2 \end{bmatrix}$ 。旋转前后光束的 M^2 因子矩阵的关系为

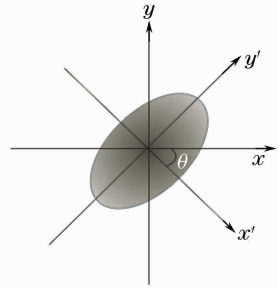


图 1 实验室坐标系下的非圆对称光斑

Fig. 1 Non-circular symmetry spot in laboratory coordinate system

$$\begin{bmatrix} M_{x_1}^2 & M_{x_1 y_1} \\ M_{y_1 x_1} & M_{y_1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x^2 & M_{xy} \\ M_{yx} & M_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

在实验测量中, $M_x^2, M_y^2, M_{x_1}^2, M_{y_1}^2$ 都可以通过实验数据拟合得出。将拟合所得结果代入式(1), 可得交叉项 M_{xy}, M_{yx}

$$M_{xy} = \frac{M_{x_1}^2 - M_x^2 \cdot \cos^2 \alpha - M_y^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cos \alpha}, M_{yx} = \frac{M_x^2 \cdot \sin^2 \alpha + M_y^2 \cdot \cos^2 \alpha - M_{y_1}^2}{2 \sin \alpha \cos \alpha}, \quad (2)$$

这样, 就可以得到所测光斑的 M^2 矩阵为

$$\begin{bmatrix} M_x^2 & \frac{M_{x_1}^2 - M_x^2 \cdot \cos^2 \alpha - M_y^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cos \alpha} \\ \frac{M_x^2 \cdot \sin^2 \alpha + M_y^2 \cdot \cos^2 \alpha - M_{y_1}^2}{2 \sin \alpha \cos \alpha} & M_y^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

通过此时的 M^2 因子矩阵, 可以推算出当光斑主轴与实验室坐标重合时($\theta = 0$)的 M^2 因子矩阵。此种情况下交叉项为零。代入初始状态, 求解式(1), 可得此种状态下的 M^2 因子矩阵为

$$\begin{bmatrix} \frac{M_x^2 \cos^2 \theta - M_y^2 \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} & 0 \\ 0 & \frac{M_y^2 \cos^2 \theta - M_x^2 \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{M_{xy} + M_{yx}}{M_y^2 - M_x^2} \right), \quad (4)$$

若将这种情况下的 M^2 矩阵记为 $\begin{bmatrix} M_{x_0}^2 & 0 \\ 0 & M_{y_0}^2 \end{bmatrix}$, 则

$$M_{xy} = M_{yx} = (M_{y_0}^2 - M_{x_0}^2) \sin \theta \cos \theta. \quad (5)$$

由式(1)有

由此可见, 两个交叉项 M_{xy}, M_{yx} 实际上包含了实验室坐标系下 x, y 方向上的 M^2 因子之差, 也包含

了实验室坐标与光斑主轴夹角的信息。所以,通过这样一个 2×2 的 M^2 因子矩阵,能够很好地描述待测光的光束质量,同时也包含了实验使用的坐标系信息。通过一定的换算,不同的实验室坐标系下(或者光束整体发生了旋转)测量所得的 M^2 因子能够统一起来。

3 测试系统及测试流程

该测试系统^[14~17]的基本部分包括:待测激光器,可变衰减片,聚焦透镜,CCD,电动平移台,PC。在该系统中,衰减片为均匀、线性的可调衰减片,聚焦透镜焦距为 20 cm,CCD 为 10 bit 黑白相机,其动态范围为 62 dB,信噪比大于 45 dB。整个测试系统工作在隔音且温度变化不大的暗室中。

图 2 所示为实验流程^[14~17]示意图。测量通过在 z 轴上测量多组数据进行拟合来完成。每一个测量点上,都需要测量多次,以降低随机误差的影响。在整个测量过程中,透镜固定,通过平移台移动 CCD。实验时动态调整 CCD 曝光时间的目的是使得测量在 CCD 的线性范围内进行。计算每一个位置处光斑强度分布的二阶矩时,积分区域的选择会严重影响束宽的计算值,在实验的过程中需要进行校核。

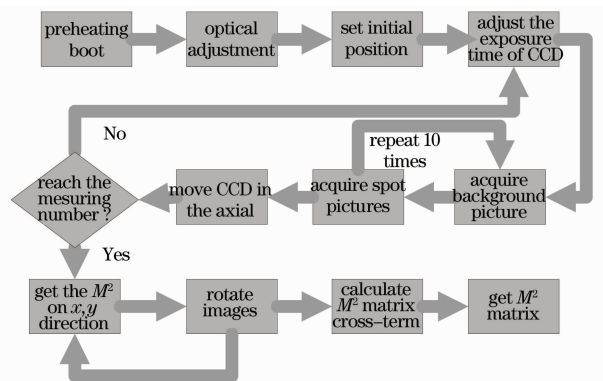


图 2 实验流程示意图

Fig. 2 Flow diagram for experiment

4 实验

采用光斑为非圆对称的两个半导体激光器作为待测光源,分别编号为 1 号和 2 号。其光斑形状及光强度分布的伪三维分布图如图 3 和图 4 所示。

移动平移台,在 z 轴上作数次测量,通过计算光强分布的二阶矩,可以得到两束 x, y 方向上光束束宽的大小随 z 轴的变换曲线,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,光束经过透镜之后,束宽在焦

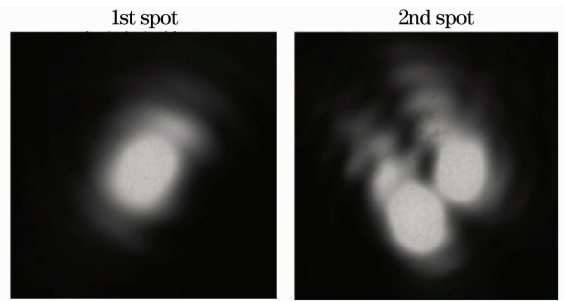


图 3 待测光束光斑

Fig. 3 Beam spot under test

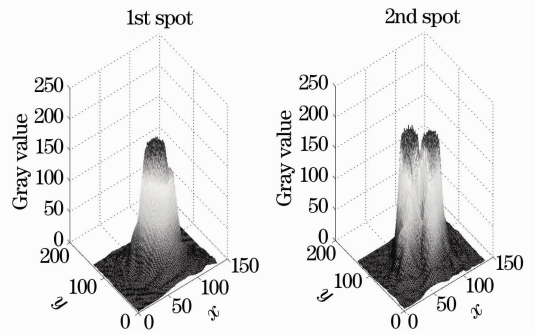


图 4 待测光斑光强分布

Fig. 4 Intensity distribution of spot under test

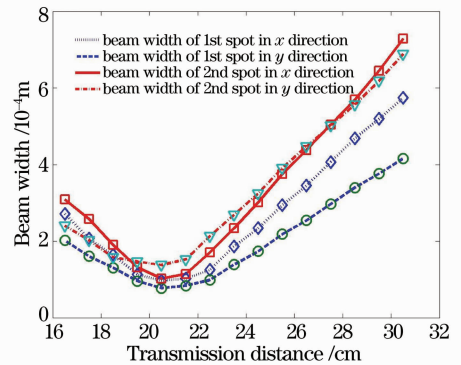


图 5 束宽随传输距离的变化曲线

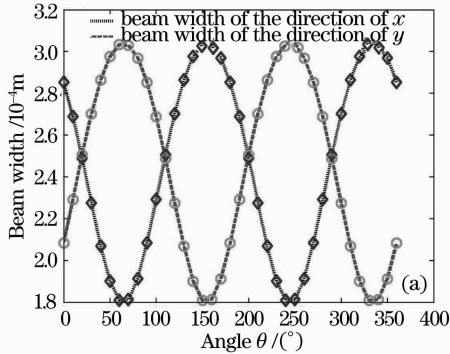
Fig. 5 Beam width versus propagation distance

点处达到最小值,此即为透镜像方的腰斑。腰斑之后,随着传输距离的增加,束宽增大。实验中使用的光束为简单像散光束,其 x, y 方向上的束宽最小值都在同一传输距离处达到。对于 1 号光斑, x 方向上的束宽始终大于 y 方向上的束宽,而 2 号光斑束宽的变化有交叉。1 号光更趋近理想的简单像散光束。

对于确定的 z 轴上的位置,其光斑的计算值的大小会随着测量所采用的坐标系的变换而变化,以 1 号光斑为例,其变化规律见图 6(a) 所示。明显可见,束宽的计算值随着所使用的实验室坐标的旋转而发生有规律的变化,计算值以 180° 为周期重复出现。其物理意义为光束旋转 180° 之后,在 x, y 方向

上的束宽大小和旋转前一样。

束宽在不同坐标系下的计算值大小不一致, M^2 因子也会因此随之发生变化, 实验中坐标轴 x 方向和 y 方向的光束 M^2 因子的测量值随坐标系旋转的变化规律如图 6(b) 所示, 明显可见, M^2 因子的测量



计算值也随着使用的实验室坐标的旋转而发生有规律的变化, 其变化的周期也为 180° 。其物理意义在于当光旋转 180° 之后, 其 x, y 方向上的 M^2 因子的测量值相同, 也与物理实质相符。

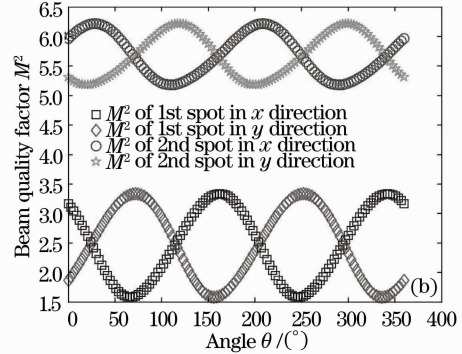


图 6 x 方向和 y 方向的束宽(a)和 M^2 (b)随坐标系旋转角度的变化曲线

Fig. 6 The beam width (a) and the M^2 (b) in the x and y directions versus the rotation degree of coordinate

M^2 因子的测量值随着所使用的实验坐标系的变换而变化, 会使得不同的实验情况下(实验室坐标定义得不一致)测量所得的 M^2 因子的大小不一致, 测量值唯一性的丧失给实验评价光束质量带来了不便。通过引入两个交叉项来表示坐标系的相关信息, 建立 M^2 矩阵, 可以有效地使得 M^2 因子的测量值统一起来, 更为客观地描述光束质量, 为实验中评价光束质量带来了便利。

实验中, 实验室坐标系下 x, y 方向上 M^2 因子可以通过实验数据拟合得到, 交叉项(在光斑主轴与实验室坐标系不重合的时候该交叉项不为零)需要计算得到。

对于 1 号光斑, 可拟合得到实验室坐标系下 x, y 方向上的 M^2 因子分别为 3.17 和 1.86, 则 M^2 矩阵为 $\begin{bmatrix} 3.17 & M_{xy} \\ M_{yx} & 1.86 \end{bmatrix}$ 。将实验测量所得图像旋转 9° , 重新拟合得到在该情况下的 M^2 因子分别为 2.97 和 2.07。将上述结果代入(2)式, 则可以得到交叉项为: $M_{xy} = -0.5428$, $M_{yx} = -0.5670$ 。再由(1)式, 在一般情况下, 该两个交叉项应该相等, 即 $M_{xy} = M_{yx}$, 故可将上面所得值取平均, 得到 $M_{xy} = M_{yx} = -0.5549$ 。则在初始状态下的 M^2 矩阵为 $\begin{bmatrix} 3.17 & -0.5549 \\ -0.5549 & 1.86 \end{bmatrix}$ 。对于 2 号光斑, 采用相同的流程, 可得 M^2 矩阵为 $\begin{bmatrix} 5.97 & -0.5532 \\ -0.5532 & 5.3 \end{bmatrix}$ 。

实验测量和计算出的 M^2 因子矩阵中, 既包含

了实验室坐标系下 x, y 方向上的 M^2 因子, 也有实验室坐标与光斑主轴这一对计算和测量 M^2 因子至关重要的信息。作为实验数据, 能更好地给他人提供参考, 更客观地反映光束质量的真实情况。

5 结 论

为了使在不同实验室坐标系下测量的 M^2 能够统一起来, 引入了能表征坐标系相关信息的交叉项, 定义了 M^2 因子矩阵。经过理论推导, 得出了 M^2 因子矩阵的测量原理。通过搭建的实验平台, 对非圆对称的光束的束宽和 M^2 因子的测量值与实验室坐标系的关系进行了实验研究。结果表明, 随着坐标系的旋转, 束宽的测量值发生有规律的变化, 这导致 M^2 因子的测量值也发生了有规律的变化, 以 180° 为一个周期。 M^2 因子矩阵本身包含了这种变化规律, 通过一个已知的 M^2 因子矩阵, 可以推算实验室坐标与光斑主轴成任意角度的 M^2 因子矩阵。本文通过实验测量和拟合得出了光束的 M^2 因子矩阵。

参 考 文 献

- 1 A. E. Siegeman. New developments in laser resonators [C]. SPIE, 1990, 1224: 2~14
- 2 International Standardization for Standardization. Terminology and Test Methods ISO/TC 172/SC 9/W G1N14 [S]. ISO Standards, ISO, 1991
- 3 International Standardization for Standardization. ISO 11146: Lasers and Laser-Related Equipment-Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios Part 1,2,3 [S]. First Edition, ISO Standards, ISO, 2005
- 4 Hatakoshi G-i. Analysis of beam quality gactor for semiconductor

- lasers[J]. *Opt. Rev.*, 2003, **10**(4): 307~314
- 5 M. H. Mahdih. Numerical approach to laser beam propagation through turbulent atmosphere and evaluation of beam quality factor[J]. *Opt Commun.*, 2008, **281**(13): 3395~3402
 - 6 Chen Jiayuan, Yu Wenfeng, Yang Feng *et al.*. Beam quality of unstable resonator of TEA CO₂ coaxial output laser with vortex tube cooling system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1057~1060
陈佳元, 余文峰, 杨峰 等. TEA CO₂ 激光器涡流管同轴非稳腔光束质量[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1057~1060
 - 7 Wang Ning, Lu Yutian, Li Xiaoli *et al.*. Experimental study of partially end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with hybrid resonator operation[J]. *Laser Technology* 2008, **32**(2): 125~127
王 宁, 陆雨田, 李晓莉 等. 部分端面抽运混合腔 Nd:YVO₄ 板条激光器实验研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(2): 125~127
 - 8 Zhang Huiyun, Zhang Yuping, Zhong Kai *et al.*. Efficient high power diode-side-pumped intracavity-doubled continuous wave green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 3~5
张会云, 张玉萍, 钟 凯 等. 高效高功率侧面抽运腔内倍频连续绿光激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 3~5
 - 9 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 323~326
李立波, 楼祺洪, 周 军 等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 323~326
 - 10 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*. 2008, **28**(3): 497~501
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
 - 11 Feng Zhongyao, Li Chengrong, Li Xiu *et al.*. Laser-diode side-pumped two rods quasi-continuous-wave Nd:YAG green laser[J]. *Acta Optica Sinica*. 2008, **28**(8): 1543~1546
冯忠耀, 李成荣, 李 修 等. 激光二极管侧抽运双棒串接准连续 Nd:YAG 高功率绿光激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1543~1546
 - 12 Chen Peifeng, Qiu Junlin. The comparison of the propagation factor M^2 of various practical light beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(2): 139~143
陈培锋, 丘军林. 各种实际光束 M^2 的参数特性比较[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(2): 139~143
 - 13 Peng Yuanjie, Lü Baida. Second-order moments matrix and M^2 factor of optical beams[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(6): 648~651
彭愿洁, 吕百达. 光束的二阶矩矩阵和 M^2 因子[J]. *激光技术*, 2004, **28**(6): 648~651
 - 14 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
 - 15 You Ningsi, Huo Yujing. A practical measuring system on laser beam quality[J]. *Laser and Infrared*, 1997, **27**(4): 222~225
游凝思, 霍玉晶. 实用化的光束质量测量系统[J]. *激光与红外*, 1997, **27**(4): 222~225
 - 16 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 訢, 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
 - 17 Feng Guoying, Lü Baida, Kong Fanlong *et al.*. Experimental study of the beam quality using two-dimensional CCD system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(4): 491~495
冯国英, 吕百达, 孔繁龙 等. 用二维 CCD 系统测量光束质量的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(4): 491~495