

文章编号: 1002-2082(2006)SO-0051-04

激光光束质量参数测量方法的研究

吉 晓¹, 杨鸿儒¹, 刘国荣²

(1. 西安应用光学研究所 国防科工委光学计量一级站, 西安 710065;

2. 驻天水地区军代室, 陕西 宝鸡 721000)

摘 要: 针对激光器的重要技术指标——激光光束质量(包括光束模式、质心、光束束宽及光束发散角等参量)对激光器使用效果的影响,介绍了激光器光束质量检测仪的工作原理及目前较为常用的测量束宽的2种方法:二阶矩法和刀口法。用这2种方法对小功率激光器的光束质量进行测量,二阶矩法测得的最大束宽平均值为 $2.55E+03 \mu\text{m}$,最小束宽平均值为 $1.50E+03 \mu\text{m}$,最大发散角平均值为 2.13 mrad ,最小发散角平均值为 1.25 mrad 。刀口法测得的最大束宽平均值为 $2.43E+03 \mu\text{m}$,最小束宽平均值为 $1.48E+03 \mu\text{m}$,最大发散角平均值为 2.03 mrad ,最小发散角平均值为 1.24 mrad 。二阶矩法测得光斑质心变化量 x 方向为 0.03 mm , y 方向为 0.01 mm ,刀口法测得光斑质心变化量 x 方向为 0.02 mm , y 方向为 0.00 mm 。这些数据说明光斑质心变化量很小。因 M^2 因子值为 2.53 大于 1 ,说明激光不是理想高斯基模。

关键词: 二阶矩法;刀口法;光束质量;光斑质心;光斑束宽;发散角

中图分类号:TN247

文献标志码:A

Study on measurement method of laser beam quality parameters

JI Xiao¹, YANG Hong-ru¹, LIU Guo-rong²

(1. Optical Metrology Laboratory ,Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Military Representative Office at Tianshui, Baoji 721000, China)

Abstract: Laser beam quality is an important technical specification, which consists of parameters of beam mode, centroid, beam width and beam divergence angle and etc. The working principle of laser beam quality analyzer and two methods (second-order quadrature and knife-edge method) for beam width measurement common used nowadays are presented. The beam quality of low level laser was measured with the two methods. The maximum and minimum width average values are $2.55E+0.3 \mu\text{m}$ and $1.50E+03 \mu\text{m}$, the maximum and minimum divergences are 2.13 mrad and 1.25 mrad measured by the second-order quadrature method; the maximum and minimum width average values are $2.43E+03 \mu\text{m}$ and $1.48E+03 \mu\text{m}$, the maximum and minimum divergence are 2.03 mrad and 1.24 mrad measured by knife-edge method. The variation of centroid at x and y directions are 0.03 mm and 0.01 mm measured by the second-order quadrature method, and the variation of centroid at x and y direction are 0.02 mm and 0.00 mm measured by knife-edge method. The results show that the variation of the light spot centroid is ver small. The value of M^2 factor is 2.53 , larger than 1 , not Gauss so laser bean is idea fundamental mode.

Key words: second-order quadrature method; kinfe-edge method; beam quality ; light spot centroid;light spot beam width;divergence angle

引言

对激光光束质量的研究是激光光学的一个重要方面,它能为激光系统的设计和评价提供理论依据。因此,对于激光器光束质量参数的测量,国内外学者进行了大量的深入研究,提出了很多评价和测量方法,但均未能建立一套普遍认可的评价和测量方法。随着激光技术在各领域中的广泛应用,对激光器光束质量参数测量方法的研究就显得尤为重要。当前市场中也有一些测量仪器产品,但在使用上都有一定的局限性。为此,对激光器光束质量参数的测量方法进行了深入的研究,研制出的激光器光束质量检测仪能测量聚焦光斑且能更客观地评价光束质量参数。

1 激光器光束质量检测仪

1.1 工作原理

研制的激光器光束质量检测仪(原理如图1所示)是采用面阵CCD探测器作为光电转换元件进行光束横截面上功率(或能量)密度分布探测的。采用图像采集卡将采集到的图像信号转换成数字量,通过接口电路进入计算机内存并完成光束质量的计算。该检测仪可通过光学系统对激光器光束进行变换,以适应CCD光敏面的大小。为了满足CCD的响应范围,还采用了一些衰减器对激光束实施适当的衰减。

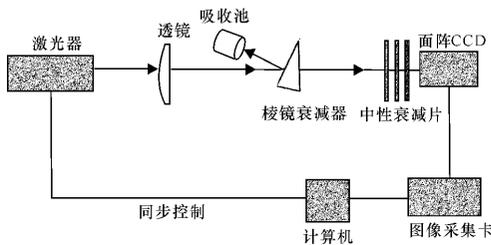


图1 激光器光束质量检测仪原理图

Fig.1 Principle diagram of analyzer for laser beam quality

在对被测光斑进行背景扣除和噪声抑制的基础上,该检测仪通过相应的光束处理软件给出了激光束的光斑分布(见图2和图3所示)、光斑质心、束宽和发散角等多个参数的测量(见表1和表2所示)。通过对光束质心变化量的计算可以了解激光器的稳定性。

1.2 光斑束宽的测量方法

目前有关光斑束宽的测量方法很多^[1],主要有:二阶矩法、刀口法、套桶法及1/e和1/e²法,在

该检测仪中主要采用了前2种检测方法。

1.2.1 二阶矩法

设在光轴方向的某一位置z处,由测量得到的光束截面功率密度分布为I(x,y,z)。则其光束分布的质心位置坐标x̄和ȳ的计算公式如下所示:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xI(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} yI(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (2)$$

x和y方向的束宽w_x和w_y由功率密度分布I(x,y,z)的二阶矩给出,其计算方法如下:

$$w_x^2 = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\bar{x})^2 I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (3)$$

$$w_y^2 = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y-\bar{y})^2 I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (4)$$

1.2.2 刀口法

刀口法是将对应的10%和90%能量的截断点间距离定义为束宽的方法,它不仅可用于无规则的极差光束质量的光束束宽测量,还可用于高能强激光的光束束宽测量。

2 测量结果及分析

由于激光器的光斑通常不具有圆对称性,则需分别计算聚焦光学元件后焦面上的光斑在xz和yz平面内(假定光轴为z)的光束宽度d_{xf}和d_{yf}。原激光束的发散角由其沿x方向和y方向的发散角θ_x和θ_y描述:

$$\theta_{x,y} = \frac{d(xf,yf)}{f} \quad (5)$$

国际标准化度量局(ISO)在激光光束宽度、发散角和辐射特性系数的试验方法中推荐用M²因子来评价光束质量的优劣^[2]。M²因子的定义如下:

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} W_0 \theta = \frac{\text{实际光束束腰直径} \times \text{远场发散角}}{\text{理想高斯光束束腰直径} \times \text{远场发散角}} \quad (6)$$

式中:W₀是实际光束的束宽;θ是远场发散角,它是表征激光束空间光束质量的重要参数。通常M₂≥1,当激光束为基模高斯光束时,M²=1。M²值越大,则说明光束偏离理想高斯光束越远,光束质量越差。由于M²因子采用二阶矩定义,将(3)和

(4)式计算出的束宽值,(5)式计算出的发散角值,一并代入(6)式得到 M^2 因子值。通过 M^2 因子值可以判断激光器光束质量的优劣。但二阶矩法对测量仪器要求较高,且高能激光输出的光束一般是多模激光,其光束空间能量分布是离散型的,因此由二阶矩定义计算得到的光束宽度与实际相差很远^[3],故一般不适用于评价高能激光光束质量。

用激光器光束质量检测仪对 L1500W 型激光器的光束质量进行测量,检测仪聚焦透镜焦距为 1 196 mm,激光器测试功率为 37.07 mW,属小功率测试。采用上述 2 种方法每组间隔时间 30 min 进行 4 次测量(每次共测 10 组数据)。表 1 为二阶矩法的测量结果,表 2 为刀口法的实测结果(所取值为平均值,实测结果仅给出质心、光斑束宽和发散角测量值)。

表 1 二阶矩法实测结果(平均值)一览表

Table 1 Measured results with second-order-quadrature method

x 方向质心 / μm	y 方向质心 / μm	最大束宽 / μm	最小束宽 / μm	最大发散角 /mrad	最小发散角 /mrad
3.97E+03	2.41E+03	2.55E+03	1.50E+03	2.13	1.25
3.96E+03	2.41E+03	2.54E+03	1.49E+03	2.13	1.25
3.99E+03	2.41E+03	2.55E+03	1.50E+03	2.13	1.25
3.99E+03	2.42E+03	2.55E+03	1.51E+03	2.13	1.26

表 2 刀口法实测结果(平均值)一览表

Table 2 Measured results with knife-edge method

x 方向质心 / μm	y 方向质心 / μm	最大束宽 / μm	最小束宽 / μm	最大发散角 /mrad	最小发散角 /mrad
4.01E+03	2.41E+03	2.43E+03	1.48E+03	2.03	1.24
4.00E+03	2.41E+03	2.42E+03	1.47E+03	2.03	1.23
4.00E+03	2.41E+03	2.43E+03	1.47E+03	2.03	1.23
3.99E+03	2.41E+03	2.45E+03	1.50E+03	2.05	1.25

根据光强二阶矩的定义,从同一激光器发出的基模和高阶模光所对应的束宽和发散角具有如下关系:

$$\begin{cases} \omega_m = \sqrt{(2m+1)}\omega_0 \\ \theta_m = \sqrt{(2m+1)}\theta_0 \\ M^2 = (2m+1)M^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_0 和 θ_0 分别为基模光束的束宽和发散角; ω_m 和 θ_m 和分别为高阶模光束的束宽和发散角, m 为模阶次。

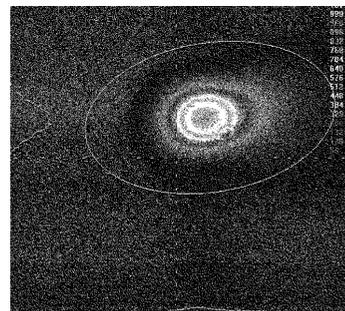
将表 1 中的最大束宽和最小束宽取平均值得到 2.03E+03 μm ,最大发散角和最小发散角取平

均值得到 1.69 mrad,并代入(6)式计算出 M^2 因子值为 2.53 ≥ 1 。这说明该激光器的激光束不是理想高斯基模。

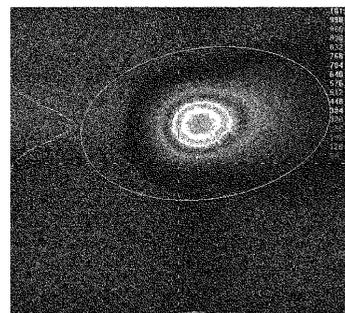
由表 2 数据计算分析可以看出:测量重复性好,该方法完全适用于小功率激光器光束质量相关参数的测量。

从表 1 或表 2 的测量结果可以看出:二阶矩法测得的光斑质心变化量在 x 方向为 0.03 mm,在 y 方向为 0.01 mm;刀口法测得的光斑质心变化量在 x 方向为 0.02 mm,在 y 方向 0.00 mm,光斑质心变化量很小,说明激光器的稳定性很好。根据测得的束宽值,利用(5)式便可求出激光器的发散角。这 2 种方法测得的束宽值稍有差异,而焦距一定,因此求出的束散角不同。通过以上实测结果还可以看出:这 2 种方法测得的数据基本一致。因此,对于小功率激光器光束质量参数的测量,这 2 种方法均适用。

通过对 4 次测量所得数据进行比较,选取第 1 次和第 3 次所测得的第 6 组数据进行绘图并分析,其中图 2 为用二阶矩法实测得到的激光器光束质量的光斑图形,图 3 为用刀口法实测得到的激光器



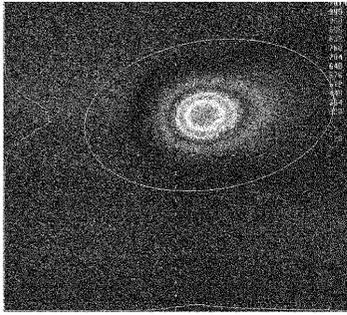
(a) 第 1 组数据的第 6 幅图



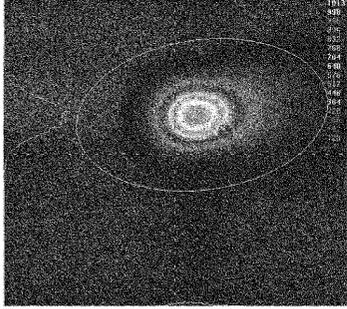
(b) 第 3 组数据的第 6 幅图

图 2 二阶矩法测得的束宽光斑图

Fig. 2 Light spot diagram of beam width measured by second-order quadrature method



(a) 第1组数据的第6幅图



(b) 第3组数据的第6幅图

图3 刀口法测得的束宽光斑图

Fig. 3 Light spot diagram of beam width measured by knife-edge method

光束质量的光斑图形。这4幅图均是经过光学系统衰减后得到的。从实测的光斑图形可以很直观地看出光斑的光强分布情况,那就是越接近中心位置光强越强。

3 结束语

利用激光器光束质量检测仪(分别采用二阶矩法和刀口法)对小功率激光器的光束质量参数进行了测量。从测量结果看,该激光器稳定性好,且光束不是高斯基模。该检测仪同时也适用于中功率激光器的光束质量检测,这为光学系统研制过程中如何选取适当的光学器件及探测器提供了可靠的保障,为提高光学系统的精度起到了积极的促进作用。

参考文献:

- [1] 钱列加,范滇元,张筑虹,等.有关光束质量的若干基本问题及其进展[J].中国激光,1994,21(12):981-987.
- [2] 王科伟,孙晓泉,马超杰.高能激光武器系统中的光束质量评价及应用[J].激光与光电子学进展,2005,42(8):13-16.
- [3] 王云萍,黄建余,乔广林,高能激光光束质量的评价方法[J].光电子·激光,2001,12(10):1029-1033.