

激光束质量因子 M^2 及其测量

牛燕雄 汪岳峰 刘 新 张 雏

(军械工程学院,石家庄,050003)

朱守深

(武汉军械士官学校,武汉,430064)

摘要: 激光束的质量因子 M^2 是一种全新描述激光束质量的参数,能够定量地表征单模、多模光束的传播特性。描述了 M^2 因子的概念和测量方法,利用面阵 CCD 探测器研制一套光束质量测量系统,对激光束质量因子 M^2 进行测量,并给出测量结果的不确定度。

关键词: 光束质量因子 衍射极限倍数 光束腰宽 光束束宽

Laser beam quality factor M^2 and its measurement

Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, Liu Xin, Zhang Chu

(College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang, 050003)

Zhu Shoushen

(School of Ordnance Engineering, Wuhan, 430064)

Abstract: The quality factor of a laser beam often is characterized by parameter M^2 . In our measurement system, we employed a CCD sensor to detect the beam profiles at different location in beam propagation direction, then utilized the data identification to calculate factor M^2 . This paper give out the measurement results and tolerance limits.

Key words: beam quality factor times-diffraction-limited beam waist beam width

引 言

激光束质量是激光器的一个重要的技术性能指标,对于其应用是至关重要的,例如,高质量的光束在很大程度上可提高激光武器的作战参数,因此,激光束质量的评价是近年来国内外研究的热点之一。评价光束质量的标准问题长期困扰着光学界,评价光束质量的方法曾采用聚焦光斑尺寸、远场发散角、 M^2 值和斯特列尔(Strehl)比^[1]等,这些方法各有优缺点,长期以来未占主导地位,未能形成统一的评价激光束质量的标准。1988年,A. E. Siegman利用无量纲的量——光束质量因子 M^2 较科学合理地描述了激光束质量,并由国际标准组织(ISO)采纳。 M^2 克服了常用的光束质量评价方法的局限,对激光光束的评价具有重要意义。

我们对激光束质量的评价方法和激光束的自动测量系统进行介绍,对 He-Ne 激光束质量因子 M^2 进行测量,给出了测量的不确定度。

1 激光束质量因子 M^2 的概念及测量的方法

1.1 激光束质量因子 M^2 的概念

M^2 因子被称为激光束质量因子或衍射极限因子,其定义为:

$$M^2 = \frac{\text{实际光束束腰宽度和远场束散角的乘积}}{\text{基模高斯光束束腰宽度和远场束散角的乘积}}$$

对于基模(TEM_{00})高斯光束,有 $M^2 = 1$,光束质量最好。实际光束 M^2 均大于 1,表征了

实际光束衍射极限的倍数 (Times - diffraction - limited)。光束质量因子 M^2 表示为^[3]:

$$M^2 = D_0 / (4 \theta) \quad (1)$$

式中, D_0 为实际光束束腰宽度, θ 为光束远场发散角。

M^2 参数同时包含了远场和近场特性,能够综合描述光束的品质,且具有通过理想介质传输变换时不变的重要性质。由(1)式可知,对激光束质量因子 M^2 的测量,归结为光束束腰宽度 D_0 和光束远场发散角 θ 的测量。

1.2 激光束宽 D 的定义和束腰宽度 D_0

对光束束宽的定义有多种,如半强度定义、 $1/e^2$ 强度定义等,较严格而通用的是强度矩量分析法,即光束束宽正比于光束横截面上光强分布的二阶中心矩(方差),在直角坐标系中,光束在 z 处能量/功率密度分布函数的二阶矩表示为:

$$\overline{x^2}(z) = \iint (x - \bar{x})^2 E(x, y, z) dx dy \quad \iint E(x, y, z) dx dy \quad (2)$$

$$\overline{y^2}(z) = \iint (y - \bar{y})^2 E(x, y, z) dx dy \quad \iint E(x, y, z) dx dy \quad (3)$$

式中, \bar{x}, \bar{y} 是光束横截面归一化的能量/功率密度分布函数的一阶矩,其表达式为:

$$\bar{x} = \iint x E(x, y, z) dx dy \quad \iint E(x, y, z) dx dy \quad (4)$$

$$\bar{y} = \iint y E(x, y, z) dx dy \quad \iint E(x, y, z) dx dy \quad (5)$$

在 z 处, x 方向和 y 方向光束束宽 D_x 和 D_y 表示为:

$$D_x = 4 \sqrt{\overline{x^2}(z)}; \quad D_y = 4 \sqrt{\overline{y^2}(z)} \quad (6)$$

光束束宽最小处即为光束束腰 D_0 ,其位置为 Z_0 。

假如光束束腰能够直接测量,可沿光束传播轴 z 测量不同位置的束宽 D ,然后利用双曲线拟合来确定光束束腰的大小和位置。双曲线拟合公式如下:

$$D^2 = A + BZ + CZ^2 \quad (7)$$

$$D_x^2 = A_x + B_x Z + C_x Z^2 \quad (8)$$

$$D_y^2 = A_y + B_y Z + C_y Z^2 \quad (9)$$

确定系数 $A, A_x, A_y, B, B_x, B_y, C, C_x, C_y$ 后,束腰的位置 Z_0 及宽度 D_0 表示为:

$$Z_0 = -\frac{B}{2C}, \quad Z_{0x} = -\frac{B_x}{2C_x}, \quad Z_{0y} = -\frac{B_y}{2C_y} \quad (10)$$

$$D_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}}, \quad D_{0x} = \sqrt{A_x - \frac{B_x^2}{4C_x^2}}, \quad D_{0y} = \sqrt{A_y - \frac{B_y^2}{4C_y^2}} \quad (11)$$

如果束腰的宽度和位置不能够直接测量,可利用一无像差的聚焦透镜,对激光束进行变换,测量变换后不同位置 z 处的光束束宽 D ,然后利用公式(7),(8),(9)确定双曲线模拟公式,由公式(10),(11)求出模拟腰斑直径 D_0 和位置 Z_0 。再根据透镜的成像性质,求出实际光束的腰斑直径 D_0 和位置 Z_0 ,如图 1 所示。

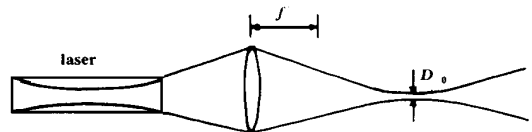


Fig. 1 The lens arrangement of creating artificial waist

再根据透镜的成像性质,求出实际光束的腰斑直径 D_0 和位置 Z_0 ,如图 1 所示。

1.3 光束发散角

激光束在腰部最细,随着离腰部距离的逐渐增大,光束的有效截面逐渐变粗,也就是激光束具有一定的发散性质,发散程度用发散角表示。对于某些激光器,其远场可能距激光器很远,直接测量远场发散角十分不方便。根据拉格朗日不变式,可采用聚焦光束测量法,即在透镜的像方焦点处,测得光束直径为 D_F ,则光束发散角表示为:

$$\theta = D_F / f \quad (12)$$

对于非对称的激光光束,应求出 x, y 方向上相应的发散角 θ_x, θ_y 。

2 自动测量系统及测量结果

2.1 自动测量系统

测量系统的原理框图如图 2 所示。系统由面阵 CCD 探测器、V512B 图像处理卡、计算机和监视器等组成。该系统能对连续激光和脉冲激光进行采集处理。当激光束照射到 CCD 探测器时,图像信号由图像采集卡采集,并转换成数字信号进行存贮和处理,确定光束的束心、光束直径等,能够显示、存贮和打印某一位置的光束三维强度图或某一截面的二维强度分布曲线。该系统的软件是在 Windows 环境下,利用 Borland C++ 编制,具有很好的人机交互界面和很强的处理功能。

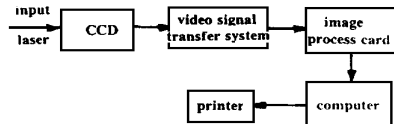


Fig. 2 The block diagram of the measurement system

该测量系统配有三个固定的、不同倍率的中性衰减器和一个可连续调节衰减倍数的中性衰减器。通过调节可实现光强的任意衰减,使该系统不仅能对 He-Ne 等弱激光进行探测,而且也能够对能量为 450mJ,脉冲宽度为 8ns 固体 YAG 强激光进行测量。为了提高测量精度,通常将光束强度最大处调至临近 CCD 探测器饱和值进行测量。

2.2 测量结果

基于以上理论,对全内腔式 He-Ne 激光束进行测量。为保证测量的精度,在测量时,激光器预燃 1h。测量过程中,尽量避免机械震动、热辐射和杂光,光路上不含有水蒸气等,以免引起热畸变。利用一焦距 $f = 1000\text{mm}$ 的无畸变透镜,对激光束进行聚焦,形成模拟腰斑。以透镜为参考位置,沿光轴依次测量不同位置 x 方向和 y 方向的光束束径 D_x 和 D_y 。测量结果如表 1 所示。

利用公式(7),(8),(9)进行双曲线拟合,求出模拟光束的双曲线系数为:

$$A_x = 1.779 \times 10^1; \quad B_x = -2.296 \times 10^{-2}; \quad C_x = 7.467 \times 10^{-6}$$

$$A_y = 1.992 \times 10^1; \quad B_y = -2.580 \times 10^{-2}; \quad C_y = 8.405 \times 10^{-6}$$

由公式(10),(11)可求出模拟腰斑的直径 D_0 和位置 Z_0 ,根据透镜的成像性质,可得原光束的腰斑直径 D_0 和位置 Z_0 ,有

$$D_{0x} = 0.640\text{mm}; \quad Z_{0x} = -2709\text{mm}; \quad D_{0y} = 0.615\text{mm}; \quad Z_{0y} = -2743\text{mm}$$

在透镜的像方焦点 $z = 1000\text{mm}$ 处,对光束直径 D_{Fx}, D_{Fy} 进行测量。为消除偶然性误差,在 $Z = 1000\text{mm}$ 处进行 10 次测量,而每次测量为消除系统噪声进行 10 次采集平均,最后求出光束直径 D_{Fx}, D_{Fy} 平均值,其值为:

$$D_{Fx} = 1.58\text{mm}; \quad D_{Fy} = 1.76\text{mm}$$

由(12)式可得原光束远场发散角为: $\theta_x = 1.58\text{mrad}; \quad \theta_y = 1.76\text{mrad}$

Table 1 The beam widths at the different distance Z from the lens

distance Z_0 (mm)	1420	1450	1485	1505	1510	1580	1605	1640	1690	1730
beam width D_x (mm)	0.486	0.426	0.385	0.369	0.364	0.387	0.408	0.450	0.542	0.640
beam width D_y (mm)	0.479	0.415	0.372	0.356	0.347	0.361	0.401	0.458	0.559	0.662

由公式(1)可得 $M_x^2 = 1.22$, $M_y^2 = 1.23$

2.3 测量不确定度分析

测量过程中,由于探测器、杂光等存在着噪声,在测量光束束宽时,应该扣除背景噪声,并且对噪声和测量的束斑采集 10 次求平均值,可有效地减少噪声的影响。在对束径 D 的测量过程中,由于存在随机误差,造成其它间接量的误差,现以 3 倍的标准差表示测量的确定度。通过透镜后的光束的模拟二阶曲线系数的不确定度为:

$$\begin{aligned}dA_x &= 4.9 \times 10^{-1}; dA_y = 3.2 \times 10^{-1}; dB_x = 6.3 \times 10^{-4}; dB_y = 4.1 \times 10^{-4}; \\dC_x &= 2.0 \times 10^{-7}; dC_y = 1.3 \times 10^{-7}\end{aligned}$$

$$\text{原光束束腰位置的不确定度为: } dZ_{0x} = 1.2 \times 10^2; dZ_{0y} = 1.7 \times 10^1$$

$$\text{原光束束腰直径的不确定度为: } dD_{0x} = 8.6 \times 10^{-2}; dD_{0y} = 5.4 \times 10^{-2}$$

$$\text{激光束质量因子 } M^2 \text{ 的不确定度为: } dM_x^2 = 1.15 \times 10^{-2}; dM_y^2 = 7.06 \times 10^{-3}$$

3 结 论

随着激光技术在国民经济和军事上的应用,评价激光束的质量具有十分重要的意义。近年来,国际标准化组织(ISO)多次组织公布文件,足以说明其重要性。利用 M^2 评价激光束的质量具有重要特点:

1. M^2 因子表示实际光束偏离基模高斯(TEM₀₀)光束(衍射极限)的程度。
2. M^2 因子综合描述了光束的质量,包括光束远场和近场特性。
3. 光束通过理想光学系统后 M^2 因子不变。

利用 M^2 因子来评价激光束的质量也有其局限性,它要求光束截面上光强分布必须是连续的,而且不能有陡直的边缘,比如对于“超高斯光束”(Super - Gaussian beam)、“圆环光束”(Ring beam)等 M^2 就不适用。尽管如此, M^2 因子仍不失为一种较为完善、合理的光束质量的评价标准。

参 考 文 献

1 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992
2 吕百达, 张彬, 蔡邦维. 激光技术, 1992; 16(5): 278
3 陆治国. 激光杂志, 1995; 16(2): 53
4 Johnston T F, L F Word, 1990; 5: 173
5 陈培峰, 王英, 彭渤 et al. 激光与光电子进展, 1996; 3: 11
6 Ruff J A, Siegman A E. Appl Opt, 1992; 31(24): 4907

作者简介: 牛燕雄, 男, 1967 年 11 月出生。工学硕士, 讲师。现从事光电技术方面的教学和科研工作。