

基于光斑轮廓特征的激光光束质量简易评价方法

李晓明 沈学举 李 刚 刘 恂

军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

摘要 提出一种非实验室条件下激光光束质量的简易评价方法,通过检测激光光斑轮廓特征来评价激光光束质量。根据原理定义一组表征激光光束质量的参量,给出测量方案和算法。利用灯抽运Nd:YAG电光调Q脉冲激光器测试了谐振腔镜倾斜和不同调Q状态两种失调态时激光器参量值的变化规律,结果显示参量值随着失调量增加而单调增大,当失调量较大时,可以用相邻两截面上参量差值的平均值来评价激光光束质量。研究结果表明,所提出的简易评价方法能够有效地评价激光器激光光束质量,测量过程仅需要光敏相纸、数码相机以及计算程序。对实验条件要求低,可用于非实验室条件下激光器工作状态的初步检测。

关键词 激光技术; 光束质量; 非实验室条件; 光斑轮廓; 失调

中图分类号 TN247 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0502001

Evaluating Specifications of Laser Beam Quality Based on Beam Profile

Li Xiaoming Shen Xueju Li Gang Liu Xun

*Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College,
Shijiazhuang, Hebei 050003, China*

Abstract A simple evaluation method of laser beam quality used out of laboratory is proposed. Through detecting profiles of laser spots, laser beam quality is measured. According to the principles, a suite of parameters are defined to express beam quality, what is more, the measured schemes and algorithms are shown. The relationship between output energy and misalignment is researched in both mirror slanting and change of Q-states based on electro-optic Q-switch pulse laser pumped by lamp. Experimental results show that new parameters increase with the increase of misalignment and average value of parameter difference on adjacent two sections can be used to evaluate beam quality in large amount of disorder. These results indicate that valuating specifications presented can be used to evaluate beam quality and only light-sensitive photographic paper, digital camera and calculation procedure are used in the process. For simple measuring method and low experiment condition requirement, it can be used in preliminary detection of laser working position out of laboratory.

Key words laser technique; beam quality; out of laboratory; beam profile; misalignment

OCIS codes 140.3295; 140.3515; 140.3540

1 引 言

激光光束质量能反映激光器的工作状态,是激光器性能检测中重要的检测指标^[1-3]之一,因此有效地评价激光光束质量,对激光器的设计、制造、检测和维护具有重要意义。目前能全面评价激光光束质量且被普遍采用的参量是由Siegman引入的 M^2 因子^[4-6],并于1991年被国际标准化组织的ISO/TC172/SC9/WG1标准草案采纳^[7]。其测量原理是对激光能量衰减取样后利用电荷耦合元件(CCD)探测远场光斑强度分布,计算远场

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2014-12-23

基金项目: 河北省自然科学基金项目(F2014506004)

作者简介: 李晓明(1988—),男,博士研究生,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: mouwat@163.com

导师简介: 沈学举(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术和光学信息处理等方面的研究。

E-mail: shxjoptics@aliyun.com

光斑半径。实验过程需要 CCD 摄像头接收衰减片衰减后的激光,由于不同激光器发射激光的脉冲能量和波长均可能不同,对衰减片的要求也不尽相同。即使对同一激光器,不同的激光脉冲其能量也不尽相同,因此很难确认衰减片的数量和衰减倍数。此外 M^2 因子测量还需要图像采集卡、精密导轨、衰减片、镜头、控制测试软件等,测量复杂,实验条件要求高^[8-12]。

目前,激光设备已广泛运用于军事、工业、医疗等多种领域,而激光器在长期使用后光学谐振腔可能失调,腔镜、调 Q 器件和激光棒等也可能受损伤,这些因素会使激光光束质量下降,影响激光设备的性能。如果有一种对实验条件要求低、操作简单的激光光束质量评价方法,能够有效地评价激光光束质量,诊断激光器状态,就能够实现对问题的早发现早解决。因此探索一种非实验室条件下激光光束质量的简易评价方法具有重要意义。

2 基于光斑轮廓特征的评价方法

2.1 评价因子定义

以理想基模高斯光束光斑为参考依据,理想状态下基模高斯光束激光斑是圆斑,当激光光束质量较差时,激光斑的形状将会发生变化。图 1 是处于不同状态下的激光器照射光敏相纸烧蚀出的激光光斑,随着激光器失调量增加,相纸被依次烧蚀出图 1(a)~(c) 3 个光斑。从图 1 中可以看出,当激光器发生失调时,光斑的形状随之发生改变,根据光斑形状可以初步判断激光器的光束质量。在此,根据光斑轮廓特征定义一个光束评价参量。

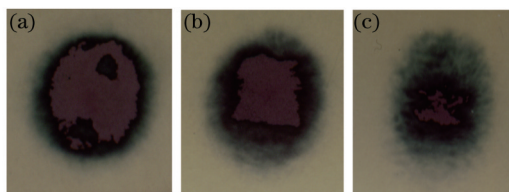


图 1 不同失调量时的脉冲激光光斑

Fig.1 Pulse laser spots in different cavity mirrors tilting

参考 M^2 因子的定义,定义圆面积与激光斑面积比值为 M_p ,其表达式为

$$M_p = \frac{S_1}{S_2}, \quad (1)$$

式中 S_1 为光斑最大线度为直径的圆面积, S_2 为光斑面积。由于 M_p 不能从纵向表征激光光束的远场发散特征,如要完整表征激光光束质量,还需要结合激光发散角 θ 才能对光束质量进行更全面的评价。

$$\theta = \frac{l_0}{f_0}, \quad (2)$$

式中 l_0 为焦面上激光斑最大线度, f_0 为透镜焦距。目前激光发散角的理论研究和实验测量已经非常成熟^[13-16],因此主要分析 M_p 因子。

M_p 反映了被检激光器发射的激光斑形状偏离圆形光斑的程度。激光斑为圆形光斑时, M_p 等于最小值 1,此时激光光束质量最好。当激光器失调时,光斑形状会发生变化, M_p 也随之改变,失调越严重, M_p 值越大。

图 1 中光斑是发射激光照射光敏相纸烧蚀得出的,当激光能量较弱时亦可先经过透镜汇聚再烧蚀相纸,由于光敏相纸能被激光烧蚀出光斑的光强度是确定的,因此在激光光束不同截面位置和在经过透镜汇聚后不同的离焦面上,光敏相纸上烧蚀出的光斑形状相当于在光束某一截面以不同阈值切取的激光光斑。

当光束截面上光强分布不对称或光强度大小变化不规则时,光束不同截面位置或者透镜不同离焦面上烧蚀的光斑可能不同,光束质量越差,光斑形状差异越大。因此还应测量不同截面位置或者透镜不同离焦面上的 M_p 值,根据不同位置 M_p 值可定量表示激光光束截面上光强度的分布情况。

根据不同位置测得的 M_p 值,计算出 M_p 的平均值 \bar{M}_p 以及相邻两平面上 M_p 差值的平均值 $\Delta \bar{M}_p$:

$$\bar{M}_p = \frac{\sum_{i=1}^3 M_{pi}}{3} p, \quad (3)$$

式中 $i=1,2,3$ 表示不同截面位置或者透镜焦平面和两个离焦面;

$$\Delta \bar{M}_p = \frac{|M_{p3} - M_{p2}| + |M_{p2} - M_{p1}|}{2}, \quad (4)$$

\bar{M}_p 最小为 1, $\Delta \bar{M}_p$ 最小值为 0。 $\Delta \bar{M}_p$ 值越大, 激光光束质量越差, 由此, 根据 M_p 、 \bar{M}_p 、 $\Delta \bar{M}_p$ 可定量评价激光光束质量。

根据定义可知 M_p 因子的测量只需要光敏相纸、数码相机以及计算程序等, 光敏相纸廉价易携, 数码相机和程序则完全可以集成到已广泛普及的便携智能设备如智能手机、平板电脑等中去, 这使得 M_p 因子用于激光光束质量检测非常方便。

2.2 算法实现与程序设计

在计算光斑面积和任意两点的最大线度之前, 须首先对光斑进行二值化以确定光斑的有效范围。由于不同类型、不同强度激光以及使用不同相纸烧蚀出的激光斑的对比度等特征不尽相同, 在对激光进行二值化时不能采用定阈值的方法。

采用自动计算阈值对光斑进行二值化的方法。设灰阶为 L 的图像各个像素灰度值为 $[1, 2, \dots, L]$, 像素灰度值为 i 的像素点数量为 n_i 。

对其归一化后,

$$p_i = n_i/N, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1, \quad (5)$$

将所有的像素以灰度值 k 为界分为两部分 C_0 和 C_1 , C_0 包括的像素点灰度值为 $[1, \dots, k]$, 而 C_1 包括的像素点灰度值为 $[k+1, \dots, L]$, 则像素被分配到 C_0 和 C_1 中的概率分别为

$$\begin{cases} \omega_0 = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k), \\ \omega_1 = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k), \end{cases} \quad (6)$$

分配到 C_0 和 C_1 的像素的平均灰度值分别为

$$\begin{cases} \mu_0 = \sum_{i=1}^k ip_i/\omega_0 = \mu(k)/\omega(k), \\ \mu_1 = \sum_{i=k+1}^L ip_i/\omega_1 = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)}, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\mu(k) = \sum_{i=1}^k ip_i$ 是到 k 级的累加均值, 而 $\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L ip_i$ 是原始图像的平均灰度即全局灰度, 由上述关系易得:

$$\omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu_T, \quad \omega_0 + \omega_1 = 1. \quad (8)$$

为了寻找最佳的阈值 k , 根据 otsu 的方法^[17], 引入参数 η , 其定义为

$$\eta = \sigma_B^2 / \sigma_T^2, \quad (9)$$

式中 σ_B^2 为类间方差, σ_T^2 为全局方差, 其定义分别为

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2, \quad (10)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i, \quad (11)$$

从(4)~(10)式可以看出, 如果 μ_0 和 μ_1 相差越大, 则 σ_B^2 越大, 表明类间方差是类之间的可分性度量。而 σ_T^2 是一个常数, 因此, 最大化 η 等价于最大化 σ_B^2 。再引入阈值 k , σ_B^2 是 k 的函数, 得:

$$\eta(k) = \sigma_B^2(k) / \sigma_T^2. \quad (12)$$

问题简化为计算 k 使得目标函数 η 最大。则以 k 为阈值即可对原始图像进行二值化分割, 即

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq k \\ 0, & f(x, y) < k \end{cases}. \quad (13)$$

对于二值化图像,可以计算其面积,二值化图像包括一个或多个部分,如果一个像素是目标图像的一部分,则 $F(x,y)=1$, 如果不在目标图像上,则 $F(x,y)=0$, 图像面积定义为 $F(x,y)=1$ 像素的数量。

利用二值化过程,可得其光斑面积为

$$A_E = \sum_{i=k+1}^L n_i. \quad (14)$$

图像二值化后,判断一个像素是否在边界的逻辑为:如果一个像素非零并且与其连通的区域至少有一个零像素,则该像素位于二值化图像的边界,在此采用八连通,通过检测二值化图像中的每个像素和其直接邻域的状态,决定该像素是否处于边界上。

计算 M_p 的基本思路是对光斑进行二值化,计算出光斑面积,而后提取出光斑的边缘轮廓,同时采用逐行扫描的方法得出光斑边缘的任意两点间的最大距离,最后计算出 M_p 值。

算法的流程为:

- 1) 将读入的图像转换成灰度图,以便后续处理;
- 2) 扫描并存储所有的像素点的灰度值,计算使得目标函数 η 最大的阈值 k , 根据阈值 k 来二值化光斑图像;
- 3) 计算光斑面积;
- 4) 提取二值化后的光斑的边缘轮廓,逐行扫描存储所有轮廓位置像素坐标,计算任意轮廓位置像素点的距离,取其最大值;
- 5) 根据 3)和 4)步计算出 M_p 值。

程序设计的流程图如图 2 所示。

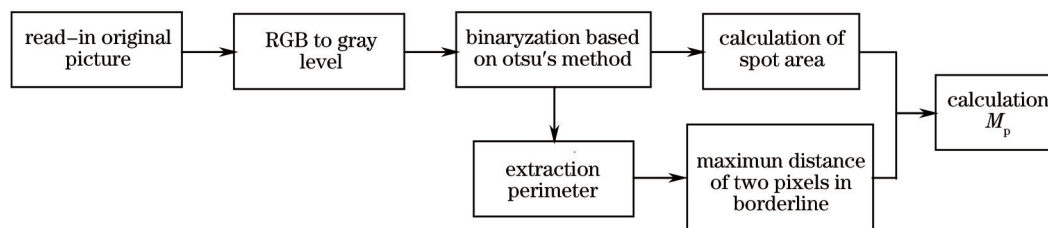


图 2 程序设计流程图

Fig.2 Flow chart of program composition

根据上述算法计算状态逐次变差的某激光器烧蚀出的光斑效果,如图 3~5 所示。

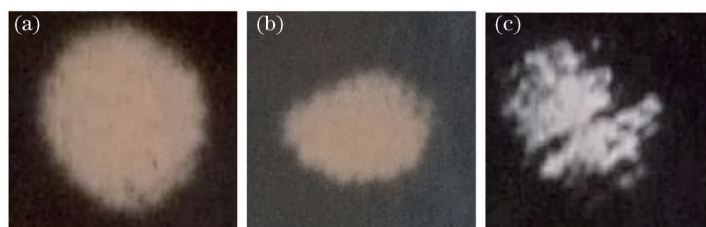


图 3 3 种不同状态激光器烧蚀出的不同激光光斑

Fig.3 Laser plots ablated by laser under three conditions

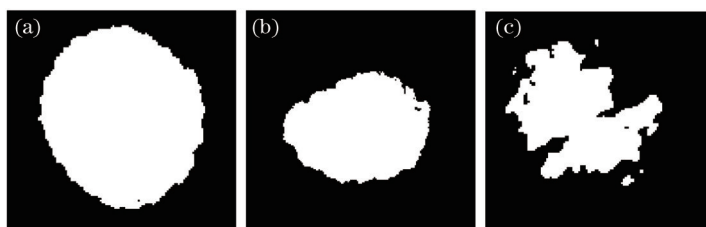


图 4 3 种不同光斑的二值化图像

Fig.4 Binary images of corresponding three types in Fig.3

图 3(a)~(c)分别是激光器处于 3 种不同状态时烧蚀出的光斑,图 4(a)~(c)分别是对图 3 中对应光斑二值化后的图像,图 5(a)~(c)分别是对图 4 中对应二值化光斑进行边缘提取后的图像。3 种光斑的 M_p 值分别是 1.1626、1.4783、

1.8094。从图3~5中可以看出,随着激光器状态变差, M_p 值也随之增大,这表明采用自动计算阈值来二值化光斑图像能够比较准确地提取出光斑的特征,由此计算出的 M_p 值也能比较准确地反映激光器的状态。

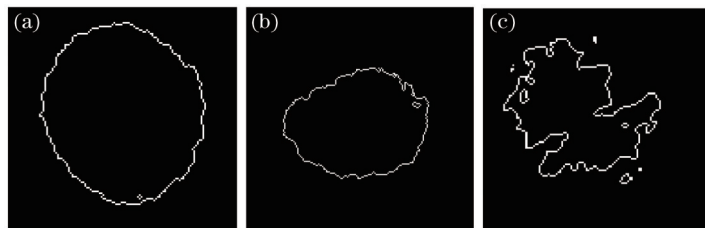


图5 3种光斑的边缘轮廓

Fig.5 Outlines of three laser plots in Fig.4

3 光束质量评价算法实验验证

为了检验 M_p 因子评测激光光束质量的效果,利用灯抽运Nd:YAG电光调Q脉冲激光器,测量该激光器在不同失调情况下的 M_p 值,实验所用的激光器如图6所示, M_1 为全反镜, M_2 为输出镜,KD*P为电光调Q晶体, M_2 上有两个旋钮可以调节 M_2 的倾斜量,KD*P外面有转盘可以旋转KD*P晶体,这两个调整结构在实验中需要使用。

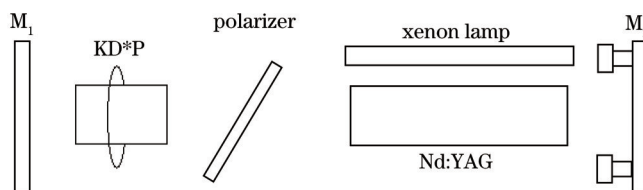


图6 实验所用激光器的结构图

Fig.6 Scheme of laser in the experiment

由于实验所用的电光调Q脉冲激光器能量密度较高,光束直接照射相纸就有明显的光斑,而被透镜会聚后焦平面及附近的光斑过小,这会导致实验测量时偶然误差变大不利于实验数据后续处理,所以实验采用调Q脉冲激光直接照射相纸提取光斑的方案。激光器发射激光在光敏相纸上烧蚀出激光斑,用数码相机将光敏相纸上的激光斑采集到计算机中,对光斑图像进行处理后,由编制的程序计算出光斑面积和最大线度值,再按上述定义得出 M_p 。然后将相纸置于不同截面上重复上述工作,按定义计算出 \bar{M}_p 和 $\Delta\bar{M}_p$ 。

分别在谐振腔输出镜倾斜失调和不同调Q状态两种情况下进行实验研究,按照上述定义测量激光光束的 \bar{M}_p 和 $\Delta\bar{M}_p$ 。

3.1 谐振腔失调情况

首先调整激光器处于最佳调Q工作状态,对激光器输出镜 M_2 进行倾斜失调,等角度间隔的旋转输出镜二维调整架的旋钮,得到距离激光输出窗口距离依次为10、70、130 cm的3个不同截面位置的 M_{p1} 、 M_{p2} 、 M_{p3} 的相对值变化情况,如图7所示,图中所有值均是实测值与第一个测量值的比值。

从图7中可以看出,随着激光谐振腔失调程度的不断增加, M_{p1} 、 M_{p2} 、 M_{p3} 随着失调量的增加呈现单调

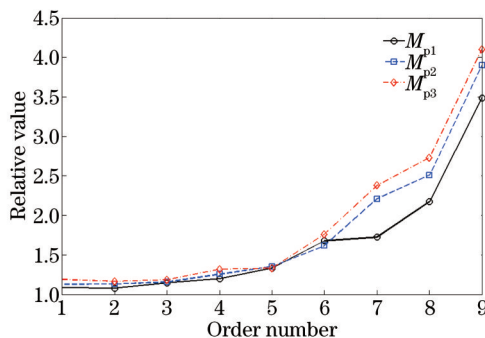


图7 谐振腔失调下不同截面位置 M_p 的相对值

Fig.7 Relative values of M_p with different cross-section positions in different cavity mirrors tilting

上升趋势,且变化规律基本一致,其中在失调较小时,不同截面位置的 M_p 值比较接近。当失调量增大到一定量后, M_p 值快速上升,且不同截面位置 M_{p1} 、 M_{p2} 和 M_{p3} 之差也逐渐变大。这时因为失调量较小时,不同截面位置测得光斑轮廓形状比较接近,当失调量增加到一定程度,由于输出激光光束质量下降,不同位置的能量密度发生改变,以一定阈值截取激光光束不同截面位置得到的光斑轮廓特征发生较大改变,由此可判断激光光束质量。结果表明 M_p 可以较准确地评价谐振腔倾斜失调时激光光束质量。

3.2 不同调 Q 状态情况

首先调整激光器处于最佳调 Q 工作状态,然后朝同一方向旋转装有 KD*P 电光调 Q 晶体的光学调整架,改变电光调 Q 晶体的工作状态,会导致激光器的调 Q 开关不能被完全关闭,影响输出调 Q 激光脉冲的能量密度和脉冲宽度,对于处于不同调 Q 状态的激光器,得到距离激光输出窗口依次为 10、70、130 cm 的 3 个不同截面位置的 M_{p1} 、 M_{p2} 、 M_{p3} 的相对值变化情况,实验结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, M_p 随着 Q 开关状态的变差而近乎单调增加,这是因为调整 Q 开关状态会导致调 Q 器件关门不彻底,影响激光光束的脉冲宽度,而 M_p 是利用相纸来截取激光斑,当脉冲宽度发生变化时,相纸截取的激光斑形状会有所不同,也反映到 M_p 数值变化上。对比 M_{p1} 、 M_{p2} 、 M_{p3} 的变化趋势可以看出,开始时,三者相对值比较接近,且变化缓慢。当 Q 开关状态进一步变差时,不同位置的 M_p 值之差开始增大,这是因为 Q 开关状态差到一定程度时,输出激光能量密度很小,不同截面位置相纸烧蚀出的光斑形状相差越大。通过 M_p 值大小和不同位置 M_p 值的差异可以判断激光光束质量。

根据实验测得的 M_p 值可以计算出 $\Delta \bar{M}_p$, 图 9 为谐振腔失调和不同调 Q 状态两种情况下计算得到的 $\Delta \bar{M}_p$, 可以看出当失调量较小时 $\Delta \bar{M}_p$ 的变化很小,这是因为 $\Delta \bar{M}_p$ 是取相邻两次 M_p 值的差值的平均值,而开始时不同截面位置 M_p 值相差不大。当失调量增加到一定程度时, $\Delta \bar{M}_p$ 开始迅速增大。因此, $\Delta \bar{M}_p$ 可以评价失调量较大时的激光光束质量。

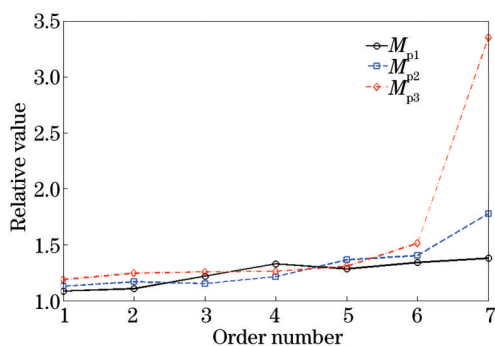


图 8 调 Q 状态变化时不同截面位置 M_p 的相对值
Fig.8 Relative values of M_p with different cross-section positions in different Q -states

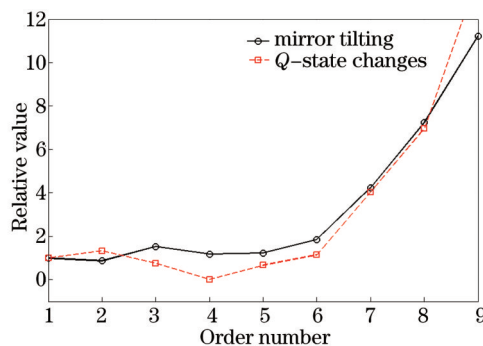


图 9 谐振腔失调和不同调 Q 状态两种情况下 $\Delta \bar{M}_p$ 的相对值
Fig.9 Relative values of $\Delta \bar{M}_p$ in different cavity mirrors tilting and Q -states

4 应用实例

为证明所提出的方法应用于典型问题时的有效性,利用非实验室环境下使用的激光测距仪来进行实验验证。实验中用 A、B 两台激光测距仪发射脉冲激光,经透镜汇聚后入射到光敏相纸上得到激光光斑,所用测距仪波长分别为 1064 nm 和 1574 nm,透镜焦距为 100 mm,获得激光在透镜焦点位置和焦点前后各 2 cm 处的激光斑,如图 10 和图 11 所示。

取不同离焦量时 M_p 值的平均值和差值均值,得 $\bar{M}_{pA}=1.2154$, $\bar{M}_{pB}=1.5009$, $\Delta \bar{M}_{pA}=0.3235$, $\Delta \bar{M}_{pB}=0.5918$, A 测距仪激光光束质量好于 B 测距仪。

可以看出,利用光斑轮廓特征来判断激光光束质量,不仅实现简单,而且可以定量表征激光光束质量优劣程度。而目前工程测绘中判断测距仪激光光束质量的常用方法是:利用光斑镜获得焦平面位置相纸上烧蚀出的光斑,使用肉眼观察,根据经验来判断激光光束质量,与本方法相比,具有较大的主

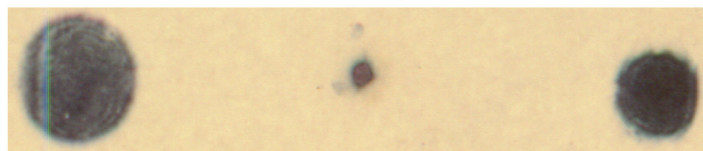


图 10 A 激光测距仪脉冲激光光斑(从左到右离焦量依次为-20, 0, +20 mm)

Fig.10 Laser plots of type A laser range finder (defocusing amount of -20, 0, +20 mm from left to right in sequences)

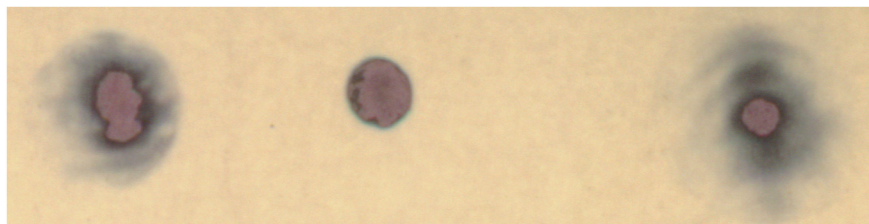


图 11 B 激光测距仪脉冲激光光斑(从左到右离焦量依次为-20, 0, +20 mm)

Fig.11 Laser plots of type B laser range finder (defocusing amount of -20, 0, +20 mm from left to right in sequences)

观性且无法量化,实际使用受到限制。

5 结 论

用激光光斑边缘轮廓特征来评价激光光束质量,并利用圆面积与激光光斑面积比值来表征激光光斑边缘轮廓,使用光敏相纸、数码相机及简单程序即可实现,数码相机和程序能够集成到已经广泛普及的便携智能设备中,使得本文提出的激光光束质量评价方法实现起来更加简单。电光调 Q 脉冲激光器的实验测试结果表明,利用光斑边缘轮廓特征能够比较准确地评价激光光束质量,可用于非实验室条件下激光器工作状态的初步检测,为激光设备维护和工程应用提供参考。

参 考 文 献

- 1 Wang Yunping, Huang Jianyu, Qiao Guanglin. A method for evaluating high energy laser beam quality[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001,12(10): 1029-1033.
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.
- 2 Zhang Luwei, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, *et al.*. Research on nonlinear degeneration and compensation of beam quality in high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214005.
张鲁薇,李晓彤,岑兆丰,等.强激光系统光束质量的非线性退化及补偿研究[J].光学学报,2014,34(2): 0214005.
- 3 Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 47-51.
吕百达,康小平.对激光光束质量一些问题的认识[J].红外与激光工程,2007,36(1): 47-51.
- 4 A E Siegman. New developments in laser resonators[C]. SPIE, 1990, 1224: 2-14.
- 5 Wen Qiao, Zhang Bin. M^2 -factor of partially coherent Gaussian-Schell model beams propagating in media[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 212-216.
文 侨,张 彬.部分相干高斯-谢尔模型光束在介质中传输的 M^2 因子[J].光学学报,2006,26(2): 212-216.
- 6 A E Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality[C]. DLAI, 1998: MQ1.
- 7 J M Fietscher. Laser beam width, divergence, and propagation factor; status and experience with the draft standard[C]. SPIE, 1991, 1441: 2-11.
- 8 Li Jianlong, Feng Guoying, Zhou Shouhuan, *et al.*. Study of the M^2 factor for the single-aperture coherent laser beam synthesis system[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094206.
李建龙,冯国英,周寿桓,等.单口径相干合成系统激光光束的 M^2 因子研究[J].物理学报,2012,61(9): 094206.
- 9 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643-1653.
冯国英,周寿桓.激光光束质量综合评价的探讨[J].中国激光,2009,36(7): 1643-1653.
- 10 Jin Aijun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Evaluation of the beam quality of supercontinuum source using supercontinuum M^2 factor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502006.

- 靳爱军, 侯 静, 姜宗福. 使用超连续谱 M^2 因子评价超连续谱光源光束质量[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502006.
- 11 Ma Haotong, Xi Fengjie, Zhou Pu, *et al.*. Measurement of M^2 factor of 1064 nm pulsed laser based on crossed defocus gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 821-826.
马浩统, 习锋杰, 周 朴, 等. 基于正交散焦光栅的 1064 nm 脉冲激光 M^2 因子测量[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 821-826.
- 12 Chen Feinan, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Change of propagation quality factor of partially coherence Hermite-Gaussian beams traveling through oceanic turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0413002.
陈斐楠, 陈延如, 赵 琦, 等. 部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束传输质量的变化[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0413002.
- 13 Wang Qianqian, Liu Jia, Peng Zhong, *et al.*. Measurement system for laser divergence angle based on LabView[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108005.
王茜茜, 刘 佳, 彭 中, 等. 基于 LabView 的激光光束发散角测量系统[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108005.
- 14 Li Zhen, Zhou Jun, Xue Yuhao, *et al.*. Discussion on applying β factor in the evaluation of beam quality of the passive coherent beam combination system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102012.
李 震, 周 军, 薛宇豪, 等. β 因子用于被动相干组束系统光束质量评价的探讨[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102012.
- 15 Li Xiaojing, An Zhiyong, Xiao Zuojiang, *et al.*. Study on measuring method of the laser divergence angle based on CCD second imagery[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(4): 50-51.
李晓晶, 安志勇, 肖作江, 等. 基于 CCD 二次成像法的激光光束散角测量方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 50-51.
- 16 Xing Jichuan, Luo Xiaohong, Song Yan. Engineering study on the auto-measurement of divergence angle of the laser beam with the variable diaphragms[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2795-2798.
邢冀川, 罗小红, 宋 艳. 全自动可变光阑测量激光发散角的工程化研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2795-2798.
- 17 N A Otsu. Threshold selection method from gray-level histograms[C]. IEEE Transaction on System Man and Cybernetic, 1979, 9(1): 62-66.

栏目编辑: 张 雁