

文章编号: 1001-4322(2004)10-1263-04

激光光斑有效面积的准确测定*

杨镜新, 庄亦飞, 沈卫星, 林尊琪

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 从激光光斑有效面积的定义出发, 采用 CCD 图像摄取技术, 设计了一套激光光斑有效面积测量装置。在 4 种不同激光光斑能量分布和不同能量密度的情况下, 用有效面积测量仪分别进行了实际测试验证。结果表明, 该测量装置可以对任何能量非均匀分布的激光光斑的有效面积进行准确测试, 有助于提高光学元件激光损伤阈值的测量精度。

关键词: 光斑有效面积; 激光损伤阈值; 准确测量; 峰值能量密度

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

在光学元件与材料的激光损伤阈值测试过程中, 需要知道激光作用在被测样品上的阈值总能量与激光的光斑面积。然后用阈值总能量除以光斑面积, 就可得到该样品的激光损伤阈值。如果被测样品上的激光光斑的能量分布是均匀的, 无任何空间调制, 那么光斑面积的测量是简单的。但是实际上激光光斑的空间能量分布并不是均匀的, 而是有调制的, 即有多个峰值, 并且存在一个最大的峰值。在这个最大峰值能量密度下, 光学元件是最容易受损伤的。因此, 测量出与激光光斑上的最大峰值能量密度相关的“有效面积”, 是准确测量光学元件激光损伤阈值的关键之一。国内一般测量有效面积时, 是假设激光光斑在高斯分布状态下, 然后用“光楔法”, 计算出有效面积。我们根据 ISO11254—1.2 中有效面积的定义, 研制了有效面积测试仪。可实时测量激光光斑的有效面积, 对光学元件的损伤阈值测试提供了方便, 提高了测量精度。

1 有效面积的定义

根据 ISO11254—1.2 的测试规范^[1], 如果激光光束的空间分布是稳定的(并不要求是均匀分布的), 则激光总能量 Q , 最大峰值能量密度 H_{\max} 和光束有效面积 A_{eff} 之间的关系为

$$A_{\text{eff}} = \frac{Q}{H_{\max}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) dx dy}{H_{\max}} \quad (1)$$

换句话说, 就是激光总能量除以光斑的有效面积应该等于光斑的最大峰值能量密度。实际上就是将激光能量等效为以最高峰值为顶点的一个均匀能量分布, 这个均匀能量分布的范围被定义为有效面积。由于光学元件的激光损伤阈值是指激光与光学材料元件相互作用后不产生损伤的最大允许的激光能量密度。因此我们要计算光学材料的激光损伤阈值, 关键是要知道打在被测材料上的激光总能量以及被测材料上的激光光斑的有效面积。有效面积的概念在激光损伤阈值测量中是至关重要的。因为实际的激光能量的空间分布并非是均匀的, 这就不能简单地用几何方法计算激光光斑的面积。作用在被测光学元件上的激光光斑总存在着一个或几个激光能量峰值, 其中必有一个最大的能量峰值, 这个最大峰值能量是最容易对材料产生损伤的。因此就不能用激光总能量除以光斑几何面积的方法来确定损伤阈值。而是要用激光总能量除以光斑的有效面积来确定。

图 1 是激光光斑近场能量分布 1 维曲线。在相对光强 3 400 处有一最大能量峰值。这一峰值能量对光学元件的损伤应该是最严重的。如果能够知道这一峰值的能量及与之相对应的面积, 就可以算出这一峰值的能量密度, 也就能算出激光损伤阈值。但是实际上峰值能量是很难直接测量的。

如果光斑的空间能量分布是高斯型的, 那么用高斯光束的表达式能够方便的计算出被测样品上的激光光斑的有效面积。

对于激光输出的空间分布为高斯型的情况下的有效面积的计算:

* 收稿日期: 2003-12-09; 修订日期: 2004-06-17

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 杨镜新(1950—), 男, 高级工程师, 主要从事高功率激光与光学元件激光损伤阈值的测量; 上海 800-211 信箱; E-mail: jxyang@mail.shcnc.ac.cn.

高斯光束的表达式为

$$H(r) = H_0 e^{-2r^2/w_0^2} \quad (2)$$

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} H_0 e^{-2r^2/w_0^2} r dr d\theta = \pi w_0^2 H_0 / 2 \quad (3)$$

$$A_{\text{eff}} = Q/H_0 = \frac{\pi w_0^2}{2} \quad (4)$$

式中： w_0 为中心最高高度下降到 e^{-2} 时，所对应的光斑的半径，因此只要测出 w_0 就可知道 A_{eff} 。采用光楔法，在光学尖劈两个表面的反射率已知的情况下，借助于激光束在尖劈内的多次反射，使通过尖劈后的激光束分成多束，即传播方向不同，但能量分布比例不变而强度变化可知的子光束，在场图纸上打出一列斑点。在经读数显微镜观察并经数据处理后就得出 w_0 。举例来说，如果采用光楔法测得 w_0 为 0.24mm，则该激光高斯光斑的有效面积为 0.09mm²。

由于高斯型或近高斯型的光束的空间分布具有圆对称性，用极坐标表示较为方便，计算较为容易。但是在测量 w_0 时由于光斑的边缘比较模糊，给有效面积的准确测定带来一定的困难，误差比较大。

例如当光斑直径为 $\phi 1\text{mm}$ 的时候，如果半径测量误差为 0.1mm，则有效面积的误差就高达 36%。而且当激光光束的空间分布不是近高斯型的时候，就很难或者无法确定光束空间分布的函数表达式。

2 CCD 测光斑有效面积

为了能够精确测定激光光斑的有效面积，研制了有效面积测试仪。采用 CCD 图像摄取系统对光斑的有效面积进行精确测定。基本原理是：CCD 采集激光光斑的全部能量，即总能量 Q 。而最大峰值能量（最高点）则由单个像元素获得。像元素的尺寸是固定的。用单个像元素采集到的最大峰值能量除以像元素面积，就能得到激光光斑的最大峰值能量密度 H_{max} 。最后由 CCD 采集的总能量 Q 除以峰值能量密度 H_{max} 即可得到激光光斑的有效面积 A_{eff} 。根据这一原理编制计算程序嵌入 MATLAB 软件中。

在高斯分布状态下，用光楔法与有效面积测试仪对被测样品上的激光光斑分别进行了有效面积的测试。结果是用光楔法测得的有效面积为 0.09mm²；用有效面积测试仪测得的有效面积为 0.082mm²。

测量装置如图 2 所示。YAG 调 Q 激光器输出的激光脉冲宽度 10ns，激光全部能量最大可达 400mJ。激光束经能量调节器与能量取样板后，通过焦距为 2m 的聚焦透镜。靠近聚焦透镜后还有第二块取样板，第二块取样板的两个面镀增透膜，其反射率控制在 1%~2%。使少量的激光能量会聚到面阵 CCD 上。由于激光输出光斑为 $\phi 8\text{mm}$ ；并且采用了 2m 长焦距的透镜，焦深较长。被测样品与 CCD 之间的共轭位置之间有几 mm 的位置误差不会影响测试结果。在有效面积实时测试前，先要调试 CCD 的位置，使 CCD 的位置与被测样品的位置形成共轭。调试过程中，首先用场图纸粗调，在光路中移动场图纸，分别打出最小即最强的激光光斑的图像；然后把 CCD 放在被测样品的位置上，测出此位置的有效面积；再把 CCD 放在共轭位置上，微调 CCD 的位置，使测量出的有效面积与样品位置测出的有效面积完全相同。

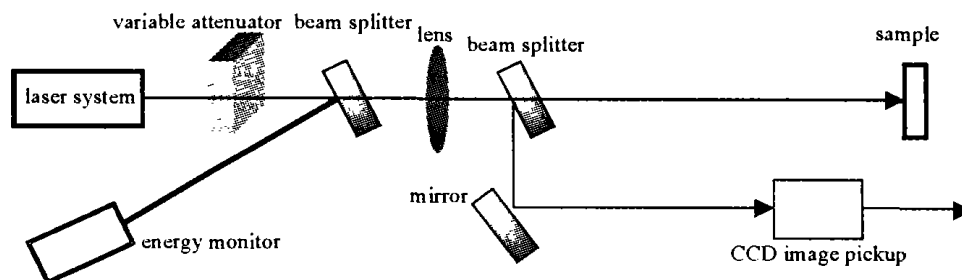


Fig. 2 Experimental setup for effective area measurement

图 2 激光光斑有效面积测量装置

激光光斑的图像由 CCD 摄取并存储，然后由 MATLAB 软件分析处理得到 1 维、2 维、3 维空间分布图像及光斑有效面积，就可以对任何能量空间非均匀分布的激光光束进行有效面积的计算。稳定的激光有效面积，

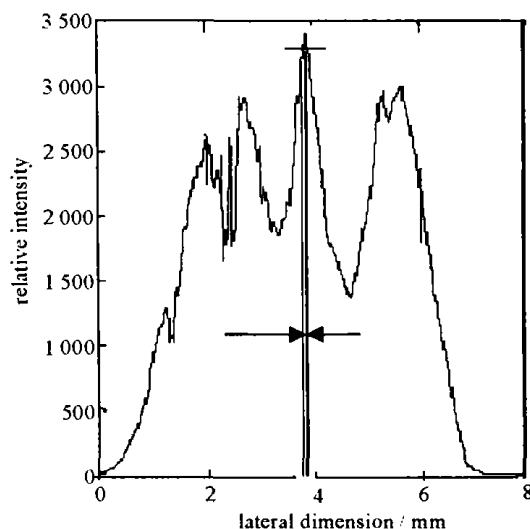


Fig. 1 Intensity profile along the vertical direction of laser spot

图 1 激光光斑能量分布 1 维曲线

并不是说激光的输出能量不能改变,而是要求在激光输出能量改变的情况下,激光打在样品上的光束有效面积不能变化。在激光损伤阈值的测量过程中,为保持激光光束的有效面积不变,必须使激光器一直工作在最佳状态并使之保持较高的激光能量输出。把用半波片与偏振片组成的激光输出能量调节器放入光路中,通过旋转半波片的角度以改变打到被测样品上的激光能量。

图像摄取系统采用 SIZE512×512 全帧型 CCD 器件。像元素为 512×512,像元尺寸 24μm×24μm,图像分辨率 12bit,动态范围大于 3 000,成像面积 12.3mm×12.3mm。最大峰值能量密度 $H_{max} = \max[\lim_{A_{hole} \rightarrow 0} (E_{hole}/A_{hole})]$ 。其中 E_{mp} 为一个像元素中采集到的最大能量,即最大峰值能量, A_{pixel} 为像元素尺寸,点面积 A_{hole} 是常数,并且不小于像元素尺寸,因此 $H_{max} = E_{mp}/A_{pixel}$ 。

根据光斑有效面积定义得到 $A_{eff} = A_{pixel}Q / E_{mp}$ 。CCD 的像元素尺寸 $A_{pixel} = 24\mu m \times 24\mu m$ 。只要能确定 Q/E_{mp} 的比值就能得到 A_{eff} 。要求 CCD 的每一像元素和观察到能量是线性关系,摄取时噪声背景很小,处理时噪声背景被减去,CCD 动态范围要大。光斑有效面积的计算公式为

$$A_{eff} = \frac{(Q - E_b)A_{pixel}}{E_{mp}} \tag{5}$$

式中:Q 是总能量; E_b 为背景能量。

图 3 给出了有效面积测试仪测出的激光光斑近场和远场的 1 维图形。其中图 3(a)是把 CCD 放在焦点处,图 3(b)是 CCD 放在焦点前面约 500mm 处测得的。可以看出,在焦点处,激光光斑轮廓具有高斯形状。而在焦前 500mm 处,激光光斑有二个峰值。如果从 2 维图形观察,实际上就是一个中间凹陷,四周呈环状凸起的峰。呈现出近场分布的明显特征。

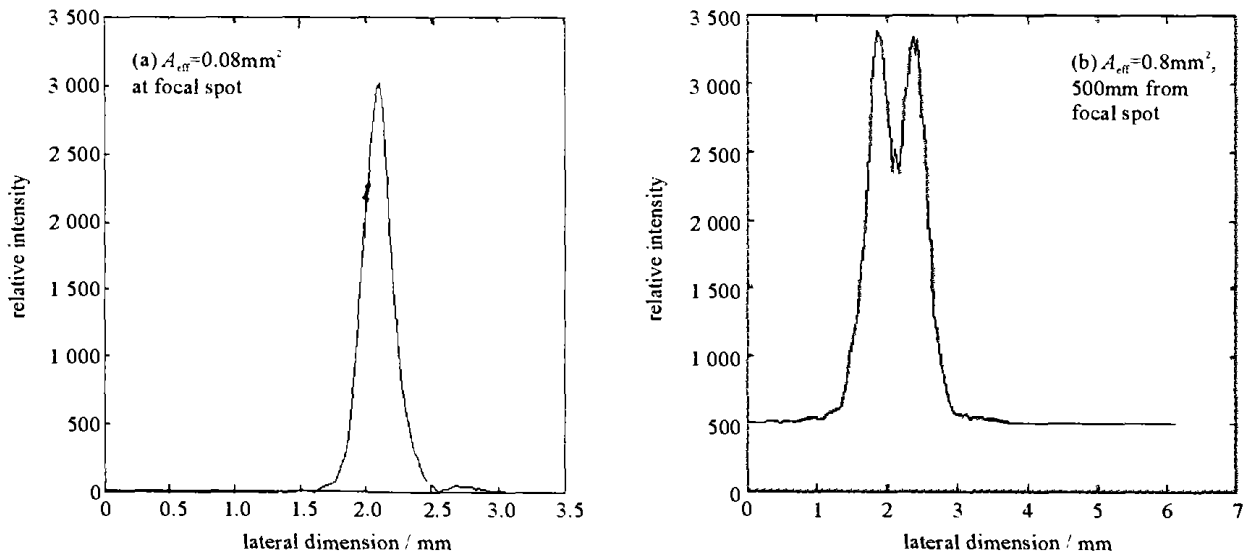


Fig. 3 Calculated from measured data of effective area on different laser spots

图 3 激光光斑有效面积测试数据

用研制的 CCD 有效面积测量仪对激光光斑在焦点位置及焦前几个位置的有效面积进行了测量。在每个测量位置,采用能量调节器改变光斑上的能量密度,测量了 4 档不同激光能量密度时的有效面积。观察了激光器能量变化对有效面积的影响。测量结果如表 1 所示。

表 1 激光光斑在不同位置与不同能量密度时的有效面积

Table 1 Effective area of laser spot under different location and fluence

laser intensity/(J·cm ⁻²)	3.2	5.7	10.1	18.7
effective area at focal spot/mm ²	0.083	0.081	0.083	0.082
effective area 200mm from focal spot/mm ²	0.170	0.173	0.170	0.171
effective area 250mm from focal spot/mm ²	0.230	0.230	0.228	0.230
effective area 300mm from focal spot/mm ²	0.363	0.362	0.364	0.363
effective area 500mm from focal spot/mm ²	0.802	0.809	0.808	0.808

从表 1 可看出,当 CCD 位于焦点时,测量出的有效面积最小。随着 CCD 逐渐离开焦点,所测得的有效面

积变大。同时激光光斑的能量分布逐步变化,由远场分布向近场分布转变。在 CCD 放置的每一个位置上,都进行了 4 次有效面积的测量,每次测量所用的激光能量密度都不同,但是测得的光斑有效面积基本上不变。这说明在实验室条件下,激光能量密度的变化对有效面积基本上不产生影响。在实际测量时,由于激光器工作是处于最佳状态,实验室内恒温恒湿,激光能量的调节采用置于光路中的能量调节器。所以在一般情况下,激光器输出的横向模式不变,能够保证有效面积的测试精度。

3 结 论

为准确测定光学元件的激光损伤阈值,根据激光光斑有效面积的定义,采用 CCD 图像摄取技术,研制了有效面积测试仪。在高斯光束状态下,与传统的光楔法的测量结果进行了比对。并在 4 种不同激光光斑能量分布和 4 档不同能量密度的情况下,用有效面积测试仪分别进行了有效面积测量。结果表明,用有效面积测试仪可以对任何能量非均匀分布的激光光斑进行有效面积的准确测量,可以有效提高光学元件激光损伤阈值的测量精度。

参考文献:

- [1] Optics and optical instruments-laser and laser related equipment-test methods for laser induced damage threshold of optical surfaces-Part 1: 1 on 1 test[S]. ISO/DIS 11254-1. 2. 1995-03-01.
- [2] Laser-induced damage threshold and certification procedures for optical materials[Z]. NASA Langley Research. Hampton, Virginia 23681-2199
- [3] Benett H E. Insensitivity of the catastrophic damage threshold of laser optics to dust and other surface defects[A]. Laser Induced Damage in Optical Materials[C]. 1980. 256.
- [4] Sheehan L M, Schwartz S, Battersby C L, et al. Automated damage test facilities for materials development and production optic quality assurance at Lawrence Livermore National Laboratory[A]. Proc of SPIE[C]. 1999, **3578**: 302—313.

Precise measurement of the effective area of laser spot

YANG Jing-xin, ZHUANG Yi-fei, SHEN Wei-xing, LIN Zun-qi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences,
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

Abstract: The system for effective area measurement of laser spot on target plane was designed based on the definition of effective area. A 12-bit CCD camera is used for the effective area measurement. A bmp image of the beam profile is stored. This image is processing by software to evaluate the ratio of total energy and peak fluence (effective area). Some test results were given using effective area measurement system. The system was employed in the laser induced damage threshold test and it is helpful to improving the precision of laser induced damage threshold test.

Key words: Spot effective area; Laser induced damage threshold; Accurate measurement; Peak energy density