

文章编号: 1001-3806(2013)05-0668-04

基于光学材料阈值测量时激光对焦方法研究

董泽俊, 杨昊东, 朱志武

(中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471003)

摘要: 为了抑制非线性光学效应对光学材料表面损伤阈值测量的影响, 设计了一种新的激光焦点对焦方法, 利用激光对空气电离所发射的等离子体光线作为参照物进行焦点定位, 对焦过程中, 激光电离焦点处的空气形成等离子体亮点, 该亮点通过光学材料表面形成镜像, 由镜面成像原理可知样品表面位于等离子体亮点和其镜像连线的中点, 调节亮点和镜像重合即可完成对焦。结果表明, 该方法操作简便、精度高, 这对光学材料的表面损伤阈值测量具有重要意义。

关键词: 光学设计; 非线性光学效应; 阈值测量; 焦点定位

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.023

Research of laser-focusing method while measuring the damage threshold on optical material surface

DONG Ze-jun, YANG Hao-dong, ZHU Zhi-wu

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: A new laser focusing method was proposed to reduce the nonlinear optical effect for the measurement of damage threshold on optical material surfaces. The focus is located by utilizing the plasma beam as the reference object which is emitted by the air ionization. In the focusing process, an image is formed by a plasma luminous point which is formed by the air ionization. Based on the mirror image principle, the sample surface is in the middle of the luminous point and the image, the focusing process is completed when the luminous point and the image coincide. In conclusion, the method is simple operation and high precision, it is important to the measurement of damage threshold on optical material surfaces.

Key words: optical design; nonlinear optical effect; damage threshold measurement; focus location

引言

在光学窗口玻璃、薄膜以及晶体等光学材料的表面激光损伤阈值测量中, 光学窗口玻璃、薄膜衬底以及晶体等材料在强激光作用下会产生非线性效应^[1], 如自聚焦效应。自聚焦效应会使入射激光在材料内部形成会聚作用, 加速材料损伤, 从而影响表面损伤阈值的测量。为了降低该效应对阈值测量的影响, 一般采用大数值孔径、短焦距透镜对激光束进行聚焦, 并将样品表面定位在激光焦点位置^[2]。短焦距透镜聚焦条件下, 焦点前后激光束迅速发散, 从而强度迅速下降。阈值测量过程中, 较小的定位误差将带来严重的阈值测量误差^[3]。

当焦点处的激光功率密度达到一定水平时, 可使处于焦点位置的材料发生电离, 从而发射出肉眼可观察的等离子体光线^[4], 该效应已被用来进行手动对焦操作。操作中执行者需要边移动材料位置边观察光斑区域, 当出现等离子光线如白光时即停止移动, 完成焦点在材料表面的定位操作, 该方法会因执行者的不同而出现不同的执行效果。作为改进, 有学者利用光电传感器探测等离子体光线, 能够实现焦点位置的自动定位^[5]。但是, 该方法会因激光焦点区域本身存在一定空间尺度而带来定位误差, 无法确定材料表面是否定位在焦点区域中心位置。尤其是在短焦距透镜聚焦条件下, 由于激光束在焦点前后快速发散, 该定位误差将使实际作用在材料表面的激光光斑尺寸大于焦点光斑尺寸, 从而影响表面损伤阈值的测量结果。另一方面, 由于相同的激光强度在不同材料表面激发出的等离子体光线强度不同, 因此定位的效果也会因材料不同而出现差

作者简介: 董泽俊(1984-), 男, 工程师, 主要从事光电对抗和激光技术的研究。

E-mail: dongzejun0307@sina.com

收稿日期: 2012-12-31; 收到修改稿日期: 2013-03-01

异^[6]。此外,焦点区域的大小以及材料表面到焦点的距离无法直接跟踪观测,定位误差难以控制。

本文中利用激光对空气电离所产生的等离子体亮点以及该亮点通过材料表面形成的镜像作为参照物进行焦点定位,排除了因光学材料电离特性不同的定位差异性,并且在显微镜下可直接观察两个亮点相互靠近的过程,使定位误差可以控制。

1 原理

当入射激光为平面波时,经过透镜会聚在焦点处形成的艾里斑直径为:

$$d = 1.22 \times \frac{\lambda f}{D} \quad (1)$$

式中, λ 为激光波长, f 为聚焦系统焦距, D 为聚焦系统孔径。在理论情况下,聚焦光斑大小与会聚系统焦距成正比,焦距越小,得到的聚焦光斑尺寸也越小^[7]。实际情况下,激光器输出激光束不是理想平面波,因此聚焦光斑要大于理论值^[8]。聚焦光斑大小实际由光束质量和会聚系统共同决定,从而焦点处的激光功率密度也由两者与激光器输出功率共同决定。

采用大数值孔径、短焦距系统对激光束进行聚焦,可形成更小的聚焦光斑尺寸以及更大的会聚角度。焦点光斑面积更小,更容易提升激光功率密度从而形成空气电离;会聚角度更大,更容易使激光束在焦点前后迅速发散,有效抑制非线性光学效应对阈值测量的影响^[9]。

基于以上分析,本文中提出了一种新的激光焦点定位方法并搭建了光学系统。激光器输出的激光束垂直入射到会聚透镜上,聚焦后入射到待测材料表面。升高激光功率使焦点处的空气发生电离并产生一等离子体亮点,该等离子体亮点通过待测材料表面形成镜像。对焦过程的监测由带显微镜头的 CCD 成像系统实现,调整 CCD 显微成像系统使两个亮点同时位于 CCD 相机的视场中,根据镜面成像原理,此时光学材料表面将垂直并等分等离子体亮点和亮点镜像的连线。控制样品向等离子体亮点靠近,同时观察成像系统输出画面中两个亮点逐渐靠近的过程,当二者相互重叠时,即完成材料表面在焦点处的定位操作。

2 光学系统设计与对焦方法

2.1 激光对焦光学系统

激光对焦光学系统如图 1 所示,包括激光器、激

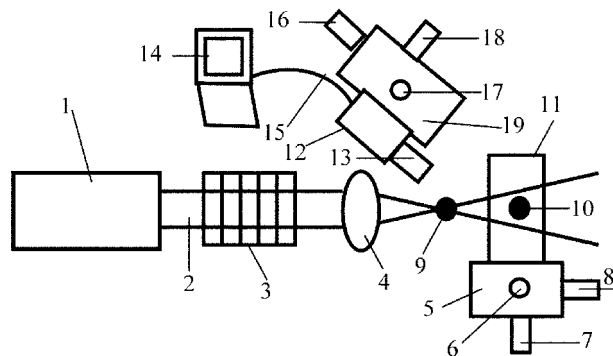


Fig. 1 The system of laser focus location, 1—laser; 2—laser beam; 3—laser attenuator system; 4—convergent lens; 5—material translation device; 6—the y axis of material translation stage; 7—the x axis of material translation stage; 8—the z axis of material translation stage; 9—the plasma window; 10—bright mirror; 11—the measured optical materials; 12—CCD camera; 13—micro lens; 14—the image output device; 15—the data line; 16—the camera platform z axis; 17—the camera platform y axis; 18—the camera platform x axis; 19—the camera panning device

光衰减片、会聚透镜、材料平移台、CCD 显微成像系统。

文中实验系统采用的激光器输出波长为 800nm,最大输出平均功率为 5W。光束质量 M^2 因子为 1.2,较好的光束质量可以实现更小的聚焦光斑,从而提升焦点处的激光功率密度。图 2 为可调型激光衰减片系统,通过调节衰减量控制焦点处的激光功率密度。

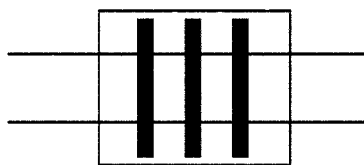


Fig. 2 The system of adjustable attenuation slice

测量光学玻璃材料的表面损伤阈值过程中,一般采用短焦距透镜聚焦,使得焦点前后激光功率密度小于自聚焦效应阈值,提高测量的准确性^[10];另一方面,这种紧聚焦方式也可以防止激光首先损伤材料的后表面,因为激光在材料后表面附近由于干涉形成场增强效应,提高了局部的光场强度。利用短焦距和长焦距透镜对激光的聚焦效果分别如图 3 和图 4 所示,可见,短焦距透镜一方面可以使聚焦光斑更小,另一方面焦点所占的区域也 smaller;但同时激光束在焦点前后发散更大,这对材料表面在激光焦点的定位控制要求更高。

在本实验系统中,透镜焦距为 10mm,通过刀口法测量焦斑直径($1/e^2$)为 $6\mu\text{m}$,从而计算得到焦点

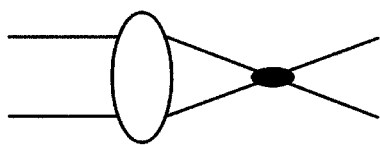


Fig. 3 The focus spot with the short focal length lens

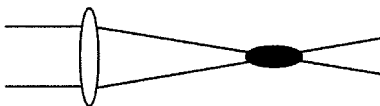


Fig. 4 The focus spot with the common focusing method

处激光功率密度达到 $0.18\text{TW}/\text{cm}^2$, 该功率密度下, 观察到了明显的空气电离现象。实际上, 光束质量是影响焦斑大小从而影响焦点功率密度的最主要因素, 其次才是激光功率, 因为对衍射极限的激光束而言, 理论上只要使用大数值孔径的聚焦透镜, 就可以使焦点激光功率密度到达空气电离的要求。

材料平移装置为 3 维可调型移动设备, 如图 1 所示。材料平移装置 3 个维度分别是指材料平移台 y 轴、材料平移台 x 轴和材料平移台 z 轴, 其中使材料平移台 z 轴平行于激光束的光路方向 (即会聚透镜的光轴方向), 材料平移台 y 轴和材料平移台 x 轴垂直于激光束的光路方向。将待测光学材料固定在平移台上, 使材料表面垂直于激光束。

激光束经会聚透镜聚焦, 产生空气电离形成等离子体亮点, 该等离子体亮点通过光学材料表面形成一亮点镜像, CCD 显微成像系统同时采集等离子体亮点和亮点镜像的图像并实时输出到图像输出设备。

CCD 显微成像系统装包括 CCD 相机、显微镜头、相机平移装置和图像输出设备 (本方法的图像输出设备是指装有图像采集、处理系统的计算机, 且该计算机带有输出图像的显示设备)。显微镜头的放大倍率为 10 倍, CCD 相机安装在相机平移装置上, CCD 相机通过数据线与图像输出设备相连接, CCD 相机拍摄的图像画面可通过图像输出设备的显示器实时输出。为保证整个 CCD 显微成像系统不会对光束传播、材料平移及成像造成阻碍, 显微镜头的工作距离为 30mm , 显微镜头的光轴与激光束的光轴夹角约为 45° 。CCD 显微成像系统中的相机平移装置 (如图 1 所示) 同样为 3 维可调型移动设备, 其中相机平移台 z 轴控制显微镜头与等离子体亮点的远近, 相机平移台轴和相机平移台 x 轴所在的平面与会聚透镜光轴的夹角约为 45° 。

2.2 激光对焦方法

利用上述的激光对焦光学系统, 实现激光对焦

定位, 具体包括以下步骤。

(1) 形成等离子体亮点。激光器输出的激光束通过激光衰减片, 再垂直入射到会聚透镜上, 形成激光焦点; 本实验系统中, 焦点激光功率密度为 $0.18 \times 10^{12}\text{W}/\text{m}^2$, 该功率密度下, 焦点处的空气被电离产生肉眼可观察的等离子体亮点。

(2) 形成亮点镜像。如图 5 所示, 将待测光学材料固定在平移台上, 平移台 z 轴与会聚透镜的光轴平行, 此时材料表面垂直于激光束的传播光路; 平移台 x 轴和 y 轴, 使材料表面对准等离子体亮点, 通过调节平移台 z 轴, 使光学材料表面逐渐靠近等离子体亮点, 直至等离子体亮点能在材料表面形成清晰的镜像, 调整过程中不要使材料表面接触等离子体亮点, 以免发生激光烧蚀, 间隔的距离以恰好能清晰观察到亮点镜像为准。

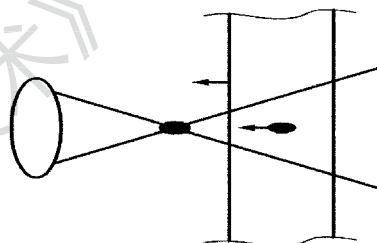


Fig. 5 The movement direction of the measuring material and spot image

(3) 采集输出图像。根据 CCD 显微镜的输出图像调整显微镜平移台, 使显微镜首先对焦点处的等离子体亮点清晰成像, 进一步使材料表面靠近等离子体亮点, 以保证等离子体亮点和亮点镜像均进入显微镜视场; 带显微镜头的 CCD 相机的布置及相机平移台的调节过程均要求显微镜头不能接触光学材料, 也不能阻挡激光束。

(4) 调节亮点大小。通过调节激光器的输出功率和/或激光衰减片系统以逐渐减弱等离子体亮点和亮点镜像的亮度, 直至等离子体亮点和亮点镜像刚好能被 CCD 相机探测到, 此时通过 CCD 显微成像系统观察到的等离子体亮点和亮点镜像最小, 对应激光焦点处的等离子体区域最小, 此时通过等离子体亮点确定的焦点位置也最为精准。

(5) 最终定位。如图 5 所示, 根据镜面成像原理, 当光学材料向等离子体亮点靠近时, 亮点镜像会以两倍于材料的平移速率向等离子体亮点靠近, 而材料表面则始终位于等离子体亮点和亮点镜像连线的中心位置, 直至从 CCD 显微镜中观察到等离子体亮点和亮点镜像完全重合, 即完成光学材料在激光焦点处的定位操作。

3 结 论

设计提出了一种新的激光焦点对焦方法,并构建了激光对焦光学系统。与现有技术相比,该方法的优点主要有以下几个方面。

(1)利用激光对空气电离所发射的等离子体光线作为参照物进行焦点定位,避免了材料刚接触焦点区域边缘即被激光电离而造成的定位误差。

(2)相比利用激光对光学材料的电离效应进行定位的操作方式,激光对空气的电离效应进行定位的方法,排除了因光学材料激光电离特性不同所带来的定位差异性,换言之,本文中所述方法可适用于不同材质光学材料的定位,且能够达到相同的定位精度,一般仅要求光学材料表面平整光滑即可。

(3)通过 CCD 显微镜可以从焦点区域的侧面观测到空气电离区域的大小,利用镜面成像原理即可方便地将待测光学材料表面定位在焦点区域的中心位置,操作简便、直观,有利于进一步提高定位精度。

总的来说,本文中的激光焦点对焦方法具有精度高、结构简单、制作方便、适应性强的特点,定位方法不仅操作简便、定位精度高,而且人工因素干预较小、适应范围广,对后续光学材料(例如光学窗口玻璃、薄膜以及晶体材料等)的损伤阈值测量及表面高精度加工具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] NI X W, LU J, HE A Zh. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices[J]. Laser Technology, 1994, 18(3): 153-156 (in Chinese).
- [2] FAN F M, CHENG L L, WANG X F, *et al.* A new type of high-speed automatic focusing system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(5): 127-132 (in Chinese).
- [3] WANG G, XU Q, LIU Y, *et al.* Transient distributions of temperature field and thermal stress field induced by laser irradiation[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 801-805 (in Chinese).
- [4] YOFFA E J. Role of carrier diffusion in lattice heating during pulsed laser annealing[J]. Applied Physics Letters, 1980, 36(1): 37-38.
- [5] LIRON Y, PARAN Y, ZATORSKY N G, *et al.* Laser autofocusing system for high-resolution cell biological imaging[J]. Journal of Microscopy, 2006, 221(2): 145-151.
- [6] LING J Y, SHU R, HUANG G H, *et al.* Study on threshold of laser damage to CCD and COMS image sensor[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008, 27(6): 475-478 (in Chinese).
- [7] TANG G Q. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 61-64 (in Chinese).
- [8] LIU H, FU X Q, HOU Y Ch. Control of high-power laser focal position in nonlinear media[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2): 267-271 (in Chinese).
- [9] SCHWENKS H, NEUSCHAEFER-RUBE U, PFEIFER T, *et al.* Optical methods for dimensional metrology in production engineering[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 685-699.
- [10] SCHAFFER C B, BRODEUR A, MAZUR E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(3): 1784-1794.