

文章编号: 1001-4322(2004)04-0465-04

# 光学元件损伤在线检测装置及实验研究\*

任冰强, 黄惠杰, 张维新, 赵永凯, 韩广礼, 杜龙龙, 王树森, 路敦武

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 利用暗场成像原理, 研制成功一套应用于大型激光装置的光学元件损伤在线检测装置, 并在多程放大系统上进行了实验研究。与传统的检测手段相比, 该检测装置可以实现对光学系统的在线检测, 并可对损伤点的图像进行分析处理, 最后提出通过减小小像差和扩大检测范围的方法来改进该装置的检测效果。

**关键词:** 光学元件; 光学损伤检测; 暗场成像技术

**中图分类号:** TH247 **文献标识码:** A

在大型激光装置中, 光束因非线性效应而产生自聚焦现象。自聚焦将导致光束最终形成高强度的细丝, 从而对装置中的光学元件造成损伤, 如光学元件表面膜层被破坏、内部形成丝状裂纹等<sup>[1~3]</sup>。这些损伤会产生极大的危害, 其主要表现在以下几个方面: (1) 光束质量下降; (2) 在损伤点产生的热效应会造成光学元件的爆炸; (3) 由于光束在损伤点的衍射造成其它光学元件的损伤等<sup>[4]</sup>。以前对于光学元件损伤的检测, 主要利用非激光光源照明并靠人眼来观测, 其缺点是费时费力, 检测效率低, 且有很大的不确定性。利用光学元件损伤在线检测装置, 可以对整个光学系统进行在线检测, 并可对损伤点的图像进行存储分析。

通常, 光学元件损伤在线检测装置采用暗场成像技术, 以提高系统的分辨率与图像的对比度。所谓暗场成像, 就是用主动式光源照明被检的光学元件, 如光学元件存在损伤, 则损伤点会产生散射光, 利用成像光学系统接收损伤点产生的后向散射光, 则可在暗背景下观察到明亮的损伤图像。如被检测光学元件无损伤, 则视场总是暗场。为了提高光束传输效率, 照明光源的波长一般与被检光路的工作波长接近或相同。

## 1 检测装置结构及主要参数

如图 1 所示, 在线检测装置主要由照明平行光管、接收平行光管和图像接收与处理系统组成, 其中的分光镜使照明平行光管与接收平行光管共光轴。由激光器发出的光束经照明平行光管准直后透过分光镜, 再由平面反射镜导入被检光学系统。如果被检光学系统中的光学元件表面或内部有损伤, 则损伤点的后向散射光经平面反射镜和分光镜反射后进入接收平行光管, 损伤点就成像在 CCD 摄像机靶面上, 图像由计算机记录。通过软件对图像进行分析和处理后, 给出损伤的光学元件在被检光学系统中的位置和损伤点的尺寸。接收平行光管为内调焦平行光管, 可以实现对不同位置处的损伤元件进行逐一调焦成像。本检测装置中各部分的主要参数和功能如下。

(1) 照明平行光管: 照明光源为半导体激光泵浦的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器, 波长为 1.064μm, 功率可调, 最大功率为 200mW; 照明光束口径为 φ65mm。(2) 接收平行光管: 这是一个内调焦平行光管, 通光口径为 φ142mm, 焦距  $f = 107.2\text{cm}$ , 视场角  $2\theta = 0.4^\circ$ , 理论分辨率为 1, 实测分辨率为 3, 调焦范围为 [1.5m, )。在距离平行光管 5m 处, 实际的空间分辨率小于 0.1mm, 能够满足大型激光装置中对光学元件损伤的检测分辨率要求 (通常要求检测空间分辨率小于 1.5mm)<sup>[4]</sup>。(3) 分光镜: 透射照明光束, 反射成像光束, 将照明平行光管和接收平行光管光轴合二为一。(4) 反射镜: 将照明光束导入被检光学系统, 同时将光学元件损伤点产生

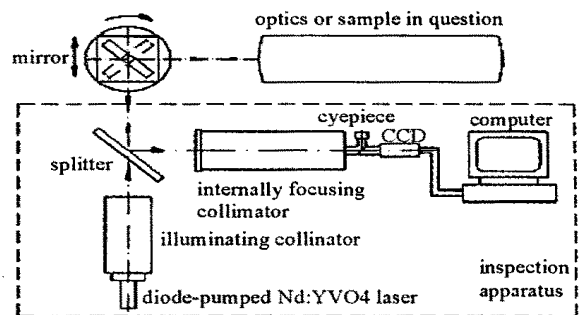


Fig. 1 Schematic configuration of the inspection apparatus

图 1 检测装置结构示意图

\* 收稿日期: 2003-05-08; 修订日期: 2003-10-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 任冰强 (1978 -), 男, 河南安阳人, 助理工程师, 主要从事光学检测仪器与设备研制; E-mail: ldwsiofm@mail.shcnc.ac.cn.

的散射光反射到分光镜,经分光镜反射后进入接收平行光管。反射镜可以移动,也可以旋转,以对被检光学元件进行扫描检测。(5)图像接收与处理系统:由观察目镜、1/3黑白CCD摄像机和计算机组成。CCD摄像机像素尺寸为 $6.51\mu\text{m} \times 6.36\mu\text{m}$ 。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 离线实验

为了检验大型激光装置光学元件损伤在线检测装置的性能,我们进行了离线和在线实验。离线实验的装置结构如图1所示,在被检光学系统位置放置有损伤的光学元件,照明平行光管将照明光束直接投射到被检光学元件上,激光在损伤点处发生散射,接收平行光管将散射光成像在CCD摄像机靶面上,图像由计算机接收、显示并保存。主要实验结果如下。

1. 直接检测到了以布儒斯特角放置的钕玻璃平板内部的自聚焦丝和垂直于光轴放置的窗口平板表面的增透膜层损伤。钕玻璃平板前表面或窗口平板前表面与接收平行光管的距离均为3.5m。钕玻璃平板的通光口径为 $\phi 106\text{mm}$ ,厚度为24.2mm,自聚焦丝的直径约为 $\phi 0.2\text{mm}$ 。窗口平板上膜层损伤点的最小尺寸约为 $\phi 2\text{mm}$ 。检测到的损伤图像如图2所示。

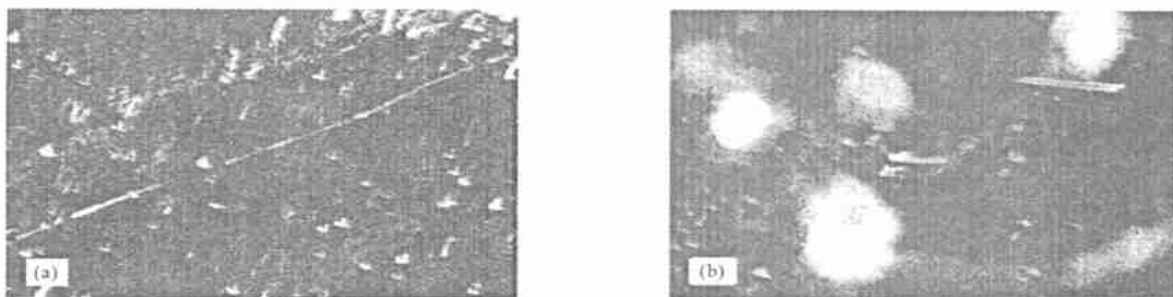


Fig. 2 Damage images of self-focusing filament (a) and anti-reflective film (b)  
图2 钕玻璃平板内部的自聚焦丝(a)和窗口平板表面增透膜层损伤(b)图像

2. 直接检测到了以布儒斯特角放置的钕玻璃平板2的前后表面的细微划痕,钕玻璃平板2的前表面距离接收平行光管3.72m,钕玻璃平板的厚度为24.2mm,检测到的损伤图像如图3所示。

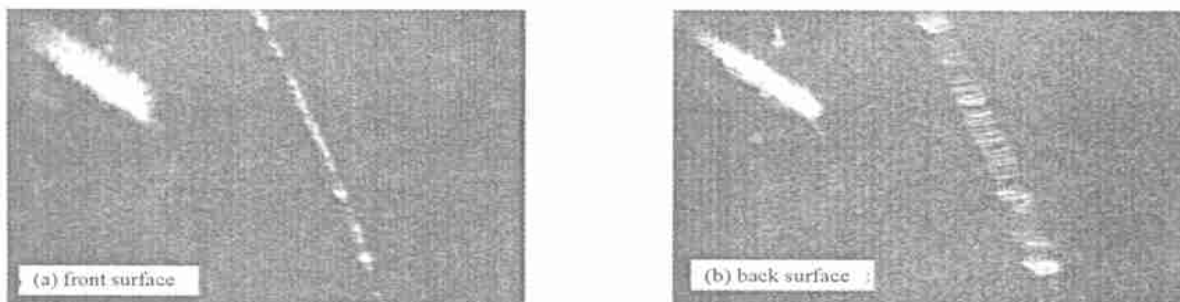


Fig. 3 Damage images on the front (a) and back surfaces (b) of Nd glass plate 2  
图3 直接检测到的钕玻璃平板2前表面(a)和后表面(b)的损伤图像

3. 在直接检测到单块钕玻璃平板损伤的基础上,在Nd glass 2之前,以接近于布儒斯特角再放置一块表面质量很差的Nd glass 1,如图4所示。Nd glass 1前表面距接收平行光管3.5m,Nd glass 2前表面距接收平行光管3.72m。所检测到的Nd glass 2前后表面的损伤图像见图5。与直接观察到的图像(图3)相比,Nd glass 2前后表面损伤图像的质量变差。原因是倾斜放置的Nd glass 1破坏了光路的对称性,使成像质量变差。

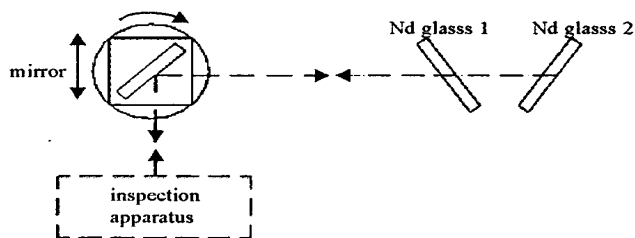


Fig. 4 Experimental setup for inspection of two Nd glass plates  
图4 检测多块光学元件时的实验布置

### 2.2 在线实验

在某大型激光装置上,针对其最容易受到损伤的多程放大系统进行了实验检测,实验布置如图 6 所示。放大系统总长约为 4m,被检光学元件放在放大系统之后约 30mm 处,接收平行光管与被检光学元件距离约为 5m。为了避开放大系统窗口将照明光反射进接收平行光管,实验中采用倾斜照明方式,即在照明光束光轴与放大系统光轴之间存在一个合适的夹角。

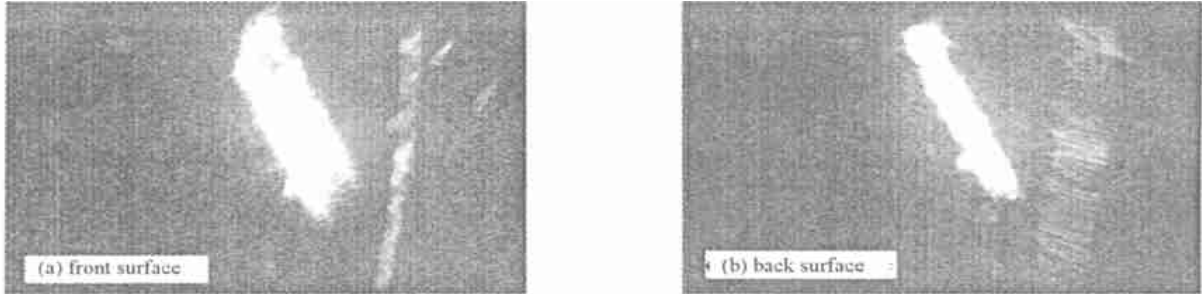


Fig. 5 Damage images on the front and back surfaces of Nd glass 2 plate, Nd glass 1 plate is inserted between the Nd glass 2 and the internally focusing collimator

图 5 在被观察元件与平行光管之间倾斜放置钕玻璃平板后观察到的图像

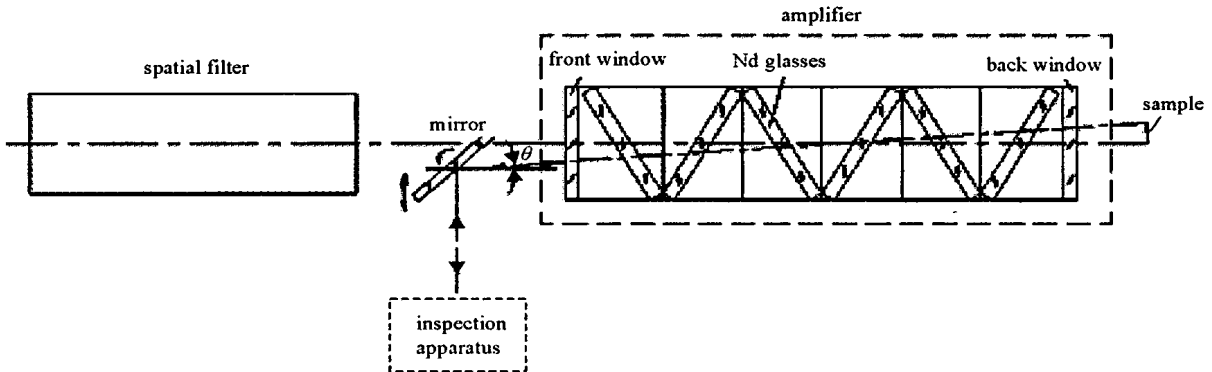


Fig. 6 Online experimental setup

图 6 在线实验布置图



Fig. 7 Image of film damage on the back window of the amplifier

图 7 放大系统中后窗口平板上的膜层损伤图像(两条弧形亮纹)



Fig. 8 Image of film damage on a window outside the amplifier

图 8 放大系统外窗口平板上的膜层损伤图像(亮斑)

图 7 为观察到的放大系统内后窗口平板上的增透膜层损伤图像,图 8 为置于放大系统之后的一块窗口平板上的增透膜层损伤图像,膜层损伤的宽度约为 1.5mm。可以看到,由于放大系统内部存在倾斜放置的片状放大器,通过放大系统检测到的损伤图像质量劣化。与离线实验结果相比,由于被检光路中的片状放大器数量增多,所以像质更差些。

### 3 存在的问题与改进措施

实验结果表明,采用暗场成像技术检测大型激光装置中光学元件的损伤是可行的。但本检测装置也存在一些不足,需进一步改进与提高。

### 3.1 图像质量需提高

被检光学系统中倾斜放置的钨玻璃平板破坏了接收平行光路的对称性,产生了严重的轴外像差,如场曲、像散等,使像质降低,这在一定程度上限制了本检测装置的检测能力。我们利用光学设计软件 ZEMAX 计算了透过与不透过放大系统两种情形接收平行光管的像。计算中照明光波长为  $1.064\mu\text{m}$ ,物面与接收平行光管相距  $5\text{m}$ ,在物面与接收平行光管之间倾斜放置了 6 块(3 对)厚度为  $45\text{mm}$  的钨玻璃平板。计算结果表明在被检光路中放入倾斜的光学元件后轴外像差明显增大,MTF 明显降低,这与实验结果相符。在物面与接收平行光管之间倾斜放置了 6 块钨玻璃平板后,经计算得到检测装置的物面分辨率约为  $1\text{mm}$ ,这仍可满足文献[4]提出的空间分辨率小于  $1.5\text{mm}$  的损伤检测要求。放大系统中窗口平板的反射杂光和激光散斑效应也对成像质量产生了很大的影响。实验中使照明激光束倾斜入射,基本消除了窗口平板的反射杂光。如在接收平行光管焦面处加一个在垂轴平面内可调的中心拦光光阑以滤除反射杂光,则效果更好。另外,通过图像处理技术有可能使图像质量得到一定程度的提高。

### 3.2 检测范围应扩大

目前照明平行光管的口径和接收平行光管的视场都较小,这不适宜于对大口径光学元件的快速检测。为了提高检测效率,需要扩大检测装置的检测范围,即增大照明平行光管的口径和接收平行光管的视场,但因为大口径照明平行光管和大视场接收平行光管的设计和加工比较困难,所以切实可行的解决途径是设计由两个反射镜组成的扫描机构代替图 1 中的单个反射镜,如图 9 所示,通过反射镜 M1 沿  $y$  轴移动、及反射镜 M1 和 M2 同时沿  $x$  轴移动可实现对大口径元件的全面检测。

致谢: 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心景峰研究员和卢宗贵工程师等在实验中给予的大力帮助。

### 参考文献:

- [1] Kozłowski M R, Maricle S, Mburser R, et al. 3 damage threshold evaluation of final optics components using beamlet mule and off-line testing[A]. SPIE[C]. 1999, 3492: 254—261.
- [2] 唐永林, 张小民, 景峰, 等. 强激光超高斯光束形成的自聚焦丝的分裂与抑制[J]. 光学学报, 2001, 21(4): 390—393. (Tang Y L, Zhang X M, Jing F, et al. Breakup and suppression of self-focusing rings originated from high intensity super-Gaussian beams[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(4): 390—393)
- [3] 文双春, 范滇元. 光束成丝的非线性理论[J]. 光学学报, 2001, 21(12): 1458—1462. (Wen S H, Fan D Y. Nonlinear theory of filamentation of intense laser beams[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(12): 1458—1462)
- [4] Thompson C E, Knopp C F, Decker D E. Optics damage inspection for the NIF[A]. SPIE[C]. 1999, 3492: 943—954.

## Online inspection apparatus and experiments on optics damage

REN Bing-qiang, HUANG Hui-jie, ZHANG Wei-xin, ZHAO Yong-kai,  
HAN Guang-li, DU Long-long, WANG Shu-sen, LU Durr-wu

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

**Abstract:** An online inspection apparatus of optics damage in large scale laser facility is developed applying darkfield imaging technology. Experiments were carried out on a multi-pass amplifier. Optical defects, such as film damage, self-focusing filament and cranny on optical elements are inspected. Experimental results show that this apparatus can be used for online inspection of optics damage. Further improvements, that the image aberration should be decreased and the inspection range be extended are proposed.

**Key words:** Optical elements; Inspection of optics damage; Dark-field imaging technology; Large scale laser facility

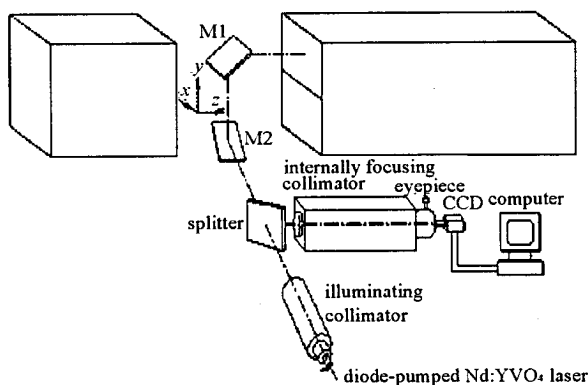


Fig. 9 Schematic of online inspection apparatus with two movable mirrors

图9 具有可动反射镜的在线检测装置示意图