

# 全内反射技术检测大口径光学元件体内缺陷

杨菲菲<sup>1,2</sup>, 缪洁<sup>1,2\*</sup>, 谢雨江<sup>1</sup>, 刘德安<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为有效检测光学元件体内的缺陷情况, 利用全内反射技术, 让激光束在光学元件内部多次全内反射后获得缺陷的散射光斑图像, 结合基于最小二乘法的椭圆拟合等方法对散射图像进行处理, 得到缺陷的三维位置信息。对该方法进行了实验验证, 实验结果表明, 扫描采集 35 幅图像即可完成对尺寸为 150 mm×120 mm×20 mm 的大口径光学元件的全部缺陷检测, 待测样品缺陷点的深度位置定位精度优于 150 μm, 说明该方法可以有效检测大口径光学元件缺陷点。针对可能影响实验结果的误差来源和限制系统分辨率的因素进行了分析, 结果表明提高成像系统横向分辨率或减小激光束横截面宽度均可有效地提高系统的分辨率。

**关键词** 测量; 缺陷深度位置检测; 全内反射; 大口径光学元件; 椭圆拟合; 分辨率

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604005

## Internal Defects of Large Optics Detected by Total Internal Reflection Technique

Yang Feifei<sup>1,2</sup>, Miao Jie<sup>1,2</sup>, Xie Yujiang<sup>1</sup>, Liu Dean<sup>1</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to detect the internal defects of the optics effectively, the scattering images of the defects are obtained after multiple total internal reflections of the laser beam in optics using total internal reflection technique. The three-dimensional position information of the defect is obtained by image processing technique, such as ellipse fitting based on least squares method. The proposed method is verified experimentally, and the experimental results show that 35 scans can complete defect detection of large optics with size of 150 mm×120 mm×20 mm. The positioning accuracy of the defect depth for samples to be tested is smaller than 150 μm. It indicates that the method can detect the defects of large optics effectively. Furthermore, the error sources that influence experimental result and factors that limit the system resolution are analyzed. The results show that the system resolution can be effectively increased by increasing the lateral resolution of the imaging system or reducing the cross-section width of laser beam.

**Key words** measurement; depth detection for defect; total internal reflection; large optics; ellipse fitting; resolution

**OCIS codes** 120.4630; 120.5700; 140.3330; 290.5820

## 1 引言

大型高功率激光装置如美国国家点火装置、法国兆焦耳激光装置以及中国神光系列装置<sup>[1-4]</sup>等通常都需

收稿日期: 2017-01-20; 收到修改稿日期: 2017-03-06

作者简介: 杨菲菲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率激光装置中大口径光学元件缺陷检测方面的研究。

E-mail: yangfeifei\_11@163.com

导师简介: 刘德安(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率激光光束传输方面的研究。E-mail: liudean@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: miaojie@siom.ac.cn

要使用一定数量的大口径光学元件。光学元件的缺陷不仅影响了其长期稳定性、镀膜质量和面形精度,而且直接降低了光学系统的抗激光损伤阈值,影响了其光束质量和使用寿命<sup>[5-6]</sup>,因此有效地检测光学元件的缺陷内显得尤为重要。

常见的非破坏性光学元件缺陷检测方法包括光学相干层析技术<sup>[7]</sup>、共聚焦激光扫描显微技术<sup>[8]</sup>和全内反射显微技术<sup>[9]</sup>。光学相干层析技术利用光源的弱相干性,只能检测与相干层析装置光程相匹配的样品;共聚焦激光扫描显微技术检测的分辨率高,但在缺陷检测过程中必须逐点扫描、依次成像,检测效率较低,耗时长,不适用于大口径光学元件的缺陷检测。另外,近年来缺陷或损伤的检测均集中在亚表面<sup>[10-11]</sup>,鲜有针对体内的缺陷检测研究。20世纪80年代, Temple<sup>[12]</sup>首先提出了应用全内反射显微技术来探测光学元件的表面缺陷。随后, Kranenberg 等<sup>[13]</sup>指出利用全内反射显微技术检测光学元件时,可以通过改变入射光的偏振态来区分表面和亚表面缺陷。Sheehan 等<sup>[9]</sup>将原子力显微镜与全内反射显微技术相结合,研究了熔石英光学元件的缺陷。崔辉等<sup>[14]</sup>结合全内反射显微技术和数字图像处理技术,利用清晰度曲线得到亚表面缺陷的深度位置和深度尺寸信息。传统的全内反射检测方法具有结构简单、成本低、适应性强等优点,但这些方法均为针对小口径光学元件的表面或亚表面的定点检测技术,不适用于大口径光学元件的体内缺陷检测。

为解决大口径光学元件缺陷检测过程复杂、效率低、耗时长等问题,本文提出了一种基于全内反射的大口径光学元件体内缺陷的快速检测方法。该方法首先利用成像系统采集的图像获得缺陷的二维位置信息;然后根据斯涅耳定律、入射角度确定入射光束的全内反射路径,并根据不同深度缺陷点的成像位置不同等原理,获得大口径光学元件体内缺陷的三维位置信息。全内反射方法重复性很高,只进行单个周期的扫描就能实现大口径光学元件的全口径检测,提高了检测效率。进一步利用该方法检测样品中已知位置的表面和体内缺陷,结合椭圆拟合等图像处理技术得到了缺陷的具体位置信息,验证了该方法的有效性。同时对比测量值与真实值的差异,对实验结果的误差来源进行了分析。此外,分析了系统的分辨率,提出了提高系统分辨率的两种方法,即提高成像装置的横向分辨率和减小光束横截面宽度。

## 2 实验原理

基于全内反射的光学元件体内缺陷检测技术根据光的全内反射原理对光学元件内部缺陷进行暗场成像。如图1所示,当激光束以大于全反射临界角的角度入射到待测大口径光学元件样品内部时,如果样品内部没有气泡、杂质等缺陷,激光将在样品上下表面多次全内反射,不会有光进入到成像系统,成像系统呈暗像并接近黑色;如果样品内部存在缺陷,在缺陷处激光的全内反射条件被破坏,产生散射现象,成像系统就会采集到一幅暗背景下存在亮点的图像。

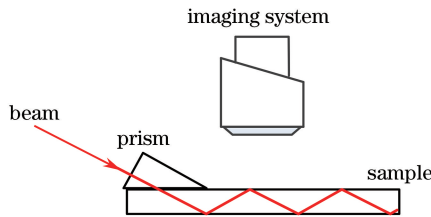


图1 全内反射技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of total internal reflection technology

根据斯涅耳定律可知,光波从光密介质入射到光疏介质的全内反射临界角( $\theta_c$ )为

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1)$$

式中  $n_1$ 、 $n_2$  分别为入射介质和出射介质的折射率。

激光在待测样品中进行全内反射的光线路径如图2所示。以待测样品上表面一个顶点为原点建立直角坐标系,其中待测样品的深度方向为  $z$  方向,光线传播方向为  $y$  方向,原点处放置一长条状棱镜用来导入激光以满足全内反射对角度的要求。设激光在样品中的全内反射角为  $\theta$  ( $\theta > \theta_c$ ),成像系统第  $i$  次扫描采集到的光学元件图像为  $I_i(x, y)$ ,光束在样品内多次全内反射恰好经过缺陷点1,如图2(a)所示,缺陷点1的光

斑信息可用  $I_i(x_1, y_1)$  表示,同时获得缺陷点 1 的二维位置信息  $(x_1, y_1)$ ,进而可由平面位置坐标  $y_1$  换算得到缺陷点 1 的深度方向位置  $z_1$ ,即

$$z_1 = |\Delta y_1| \cdot \cot \theta, \quad (2)$$

式中  $|\Delta y_1|$  为散射点 1 对应的平面位置坐标  $y_1$  与最邻近的上表面全反射线之间的距离的绝对值,由此可得缺陷点 1 带有三维位置信息的散射光斑图像  $I_i(x_1, y_1, z_1)$ 。如果待测样品内部存在深度位置不同的两个缺陷点,如图 2(a)和(b)中的缺陷点 1 和缺陷点 2,1 次成像并不能同时得到两个缺陷点的信息,只需对待测样品进行依次扫描成像即可得到处于不同深度位置缺陷点的三维位置信息。如图 2(a)中第  $i$  次成像得到缺陷点 1 的相对距离  $|\Delta y_1|$ ,经简单换算后得到缺陷点 1 的散射光斑图像  $I_i(x_1, y_1, z_1)$ ,同理,第  $j$  次成像得到缺陷点 2 的相对距离  $|\Delta y_2|$  后就可以得到缺陷点 2 的散射光斑图像  $I_j(x_2, y_2, z_2)$ ,如图 2(b)所示。

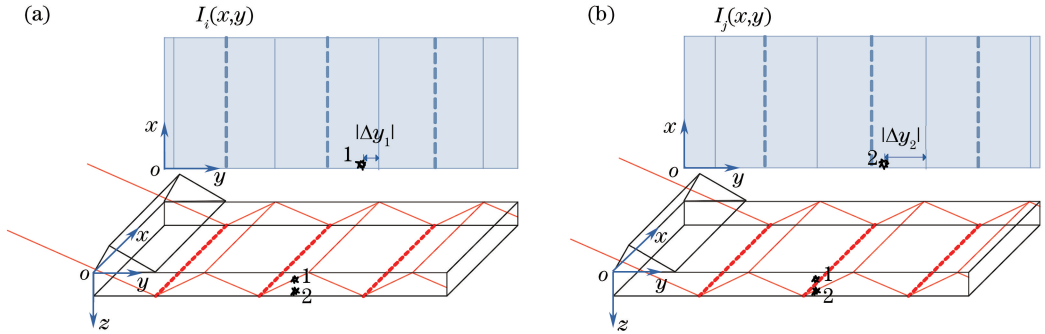


图 2 激光在光学元件体内的光路图。(a)缺陷点 1;(b)缺陷点 2

Fig. 2 Beam path diagrams of laser in optics. (a) Defect 1; (b) defect 2

### 3 实验装置

为了验证该全内反射方法检测光学元件表面和内部缺陷的有效性,选用大小为  $150 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的 K9 玻璃作为待测样品,K9 玻璃的折射率为 1.52,空气的折射率为 1,由(1)式可知待测样品的全反射临界角为  $41.1^\circ$ 。样品表面和内部均存在缺陷点,缺陷点的显微图像分别如图 3(a)和(b)所示。

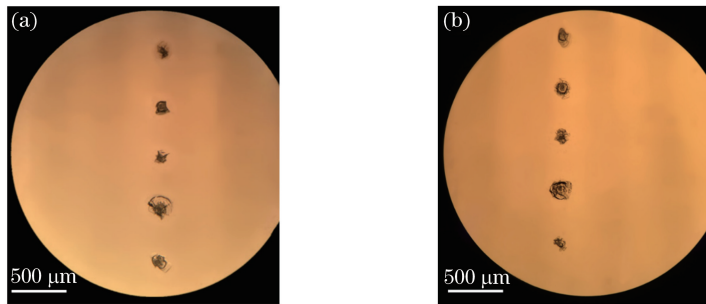


图 3 待测样品的缺陷显微图像。(a)样品表面;(b)样品内部

Fig. 3 Defects' microscopic images of the sample to be tested. (a) Surface of the sample; (b) inside of the sample

基于全内反射的光学元件体内缺陷检测技术的实验装置如图 4 所示。该装置主要由激光器、光束调节系统、光束入射角度调整系统、二维平移控制系统、成像系统及图像处理系统等组成。激光器为  $532 \text{ nm}$  波长的连续光激光器;光束调节系统用于将激光束横截面宽度调整至  $1 \text{ mm}$ ,包括两个柱透镜和一个狭缝,狭缝位于两柱透镜的共同焦面上;入射光束角度调整系统由两个反射镜组成,两个反射镜的倾角分别为  $45^\circ$  和  $30^\circ$ ;二维平移控制系统由两个一维可控调整平台构成,两个方向的最小步距均为  $0.01 \text{ mm}$ ;成像系统由德国 Allied Vision Technologies 公司的 Mako 系列相机和成像镜头构成,相机分辨率为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。为了满足在样品中的全内反射条件,激光束通过材质同样为 K9 玻璃的直角棱镜耦合进待测样品,直角棱镜其中一个锐角为  $60^\circ$ ,激光束垂直于直角所对的棱镜面入射,此时入射角为  $60^\circ$ ,满足全反射条件,激光将在待测样品中以  $60^\circ$  角进行全内反射。

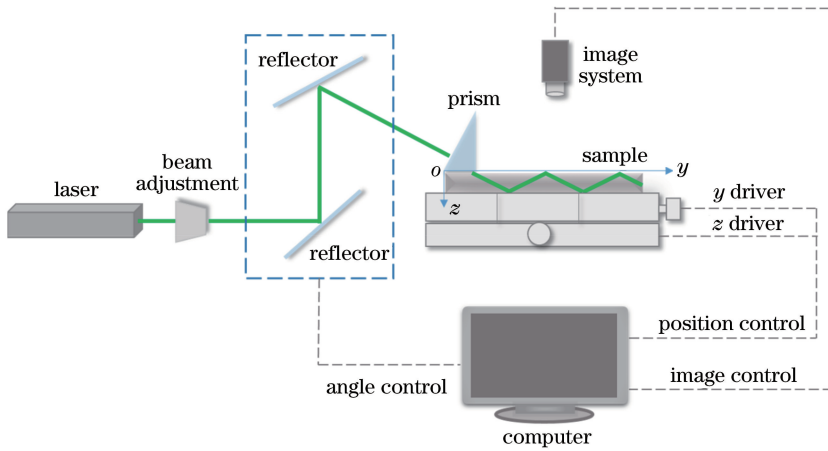


图 4 光学元件缺陷检测实验装置图

Fig. 4 Layout of defect detection in optics

实验过程中, 单次扫描只能检测激光束在大口径光学元件中全内反射光路经过的部分, 如图 2 所示, 单独第  $i$  次扫描仅能检测到缺陷点 1, 第  $j$  次扫描才能检测到缺陷点 2, 因此为了避免漏检单次扫描光路中没有扫描到的那部分光学元件, 必须进行多次扫描。扫描时, 如图 4 所示的实验装置中的成像系统和激光器均处于固定位置不动, 只通过二维平移系统控制待测样品沿  $y$  轴方向移动, 从待测样品的边缘位置开始进行第 1 次扫描, 使激光束在待测样品内发生全内反射, 此时成像系统对第 1 次扫描光路中的所有缺陷点同时成像。待成像系统采集完第 1 幅缺陷图像后, 通过二维平移控制系统将待测样品沿  $y$  轴方向移动特定步距, 为了不重复地扫描, 该扫描步距应为光束截面宽度在  $y$  轴方向的投影  $|\Delta y'|$ , 如图 5 所示,  $|\Delta y'|$  是由光束横截面宽度  $\Delta d$  和入射角度  $\theta$  决定的, 根据图 5 可知扫描步距  $|\Delta y'|$  可表示为

$$|\Delta y'| = \Delta d / \cos \theta. \quad (3)$$

实验中  $\Delta d = 1 \text{ mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ , 由(3)式可得扫描步距为  $|\Delta y'| = 2 \text{ mm}$ 。待测样品移动扫描步距  $2 \text{ mm}$  后激光束仍在样品中进行全内反射, 此时成像系统对第 2 次扫描光路中的所有缺陷点成像, 采集第 2 幅缺陷图像。以此类推, 在扫描周期内继续移动待测大口径光学元件样品, 成像系统依次采集缺陷图像直至完成整个大口径光学元件的缺陷检测。光束在元件内上下表面来回反射, 具有一定的重复性, 因此这里的扫描周期为全内反射的单个周期  $|\Delta Y|$ , 如图 5 所示, 它与待测样品的厚度  $d$  和入射角  $\theta$  有关, 根据图 5 可知扫描周期  $|\Delta Y|$  可表示为

$$|\Delta Y| = 2 |\Delta y'| = 2d \cdot \tan \theta. \quad (4)$$

实验中采用的光学元件样品厚度  $d = 20 \text{ mm}$ , 由(4)式可得扫描周期为  $|\Delta Y| = 69.28 \text{ mm}$ 。由表示扫描步距的(3)式和表示扫描周期的(4)式可知扫描次数  $N$  为

$$N = |\Delta Y| / |\Delta y'| = 2d \cdot \tan \theta / (\Delta d / \cos \theta) = (2d \cdot \sin \theta) / \Delta d, \quad (5)$$

由此可知扫描次数是由待测元件厚度、光束入射角和光束横截面宽度共同决定的, 与待测大口径光学元件的具体口径无关。即使继续增大待测元件口径, 扫描次数也不会增加。将  $|\Delta y'|$  和  $|\Delta Y|$  代入(5)式可得实验中的具体扫描次数为  $N = |\Delta Y| / |\Delta y'| = 34.64$ , 即依次采集 35 幅图像即可完成全口径的待测元件的缺陷检测。对于口径为  $l$  的大口径光学元件, 传统方法需要逐行扫描整个大口径光学元件, 扫描的次数为  $N' =$

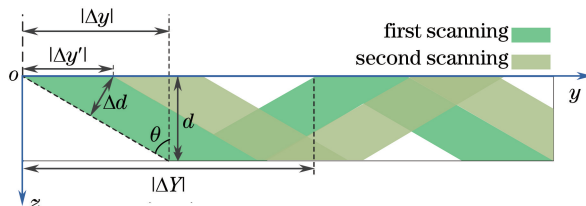


图 5 光束在光学元件中扫描示意图

Fig. 5 Schematic of laser scanning in optics



$l/\Delta d$ ,该方法与传统方法的扫描次数倍数关系为  $n = N'/N = l/(2d \cdot \sin \theta)$ ,一般情况下, $d$  比  $l$  小得多,因此采用该方法检测的扫描次数是传统方法的  $1/n$ ,相应的检测时间也是传统方法的  $1/n$ 。例如,对于口径为  $l=300$  mm、厚度为  $d=20$  mm 的样品,当入射角  $\theta=60^\circ$  时, $n=8.66$ ,理论上检测时间可以缩短为传统方法的  $1/9$ ,大幅度提高检测效率。

#### 4 实验结果及处理

实验中采集到的待测样品缺陷点散射图像如图 6 所示。由实验原理可知,要获得缺陷点的深度位置,必须精确定位缺陷点对应的散射光斑和全反射线的位置。全反射线的位置可由传输光束和待测元件边缘相交处的亮点表示,如图 6(a) 中蓝色椭圆标注位置。图 6(b) 和 (d) 分别为图 6(a) 中蓝色椭圆标注的全反射线亮点的放大图像和对比度增强图像。图 6(c) 和 (e) 分别为图 6(a) 中红色椭圆标注的缺陷点的放大图像和对比度增强图像。原始图像清晰度较差,对比度增强后,缺陷点的散射光斑和表示全反射线的光斑均更加清晰。从图 6 中可以看出,缺陷点的散射光斑和表示全反射线的亮点光斑中均包含多个像素,不能直接定位,其中缺陷点的散射光斑包含的像素个数较少,可用质心法定位。表示全反射线的亮点光斑包含像素个数较多,一般包含的像素个数在 100 左右,由于该亮点近似于椭圆,本文采用基于最小二乘法的椭圆拟合方法对其进行定位<sup>[15-17]</sup>。

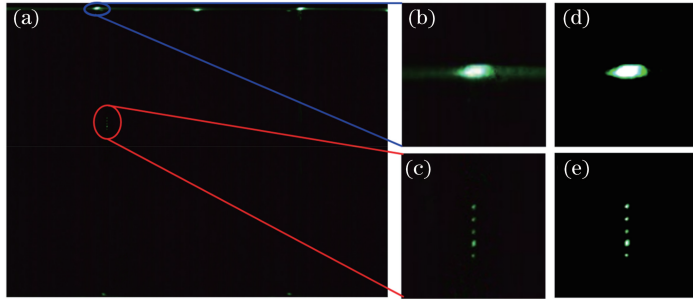


图 6 待测样品缺陷散射图像。(a)原始图像;(b)全反射线光斑放大图;(c)缺陷点光斑放大图;  
(d)全反射线光斑对比度增强图;(e)缺陷点光斑对比度增强图

Fig. 6 Defect scattering images of the sample to be tested. (a) Original image; (b) magnified spot of the total reflection line; (c) magnified spot of the defect; (d) contrast enhanced spot of the total reflection line; (e) contrast enhanced spot of the defect

椭圆的二次曲线方程可表示为

$$F(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{X}) = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\alpha} = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0, \quad (6)$$

式中  $\boldsymbol{\alpha} = (A, B, C, D, E, F)^T$ , 为椭圆方程的系数向量;  $\mathbf{X} = (x^2, xy, y^2, x, y, 1)$ ; 椭圆方程定义要求存在约束条件  $4AC - B^2 = 1$ 。图像边缘任意数据点的最小二乘法椭圆拟合可以用这些点到椭圆曲线的最小正交距离表示<sup>[13]</sup>, 即

$$\boldsymbol{\beta} = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \right\} = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\alpha}} \|\mathbf{U}\boldsymbol{\alpha}\|^2, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{U} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \dots, \mathbf{X}_n)^T$ ,  $n$  为图像边缘数据点的个数, 由于  $\boldsymbol{\alpha}$  的任意倍数代表同一个椭圆, 添加约束条件  $\|\boldsymbol{\alpha}\| = 1$ , 用最小二乘法求解(7)式即可得到椭圆方程的系数向量  $\boldsymbol{\alpha}$ , 即得到椭圆的 6 个参数  $A, B, C, D, E, F$ , 则椭圆的中心位置  $(x_0, y_0)$  可表示为

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, \quad y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}, \quad (8)$$

根据椭圆的中心位置可以确定表示全反射线的光斑的位置, 即为全反射线的位置。

第 1 次扫描检测到待测样品的体内缺陷图像如图 7 所示。图 7(a)~(f) 分别为待测样品体内缺陷的原始图像、原始图像的灰度图、对比度增强后的图像、图像二值化结果、边缘提取结果和椭圆拟合及缺陷点定位结果。从图 7 可以看出, 由于存在杂散光和背景光等干扰因素, 原始图像清晰度较差, 灰度变化后缺陷光斑

和背景对比不明显。对比度增强后,缺陷光斑和表示全反射线的光斑清晰度明显增加,便于后续图像处理。采用 Canny 算子<sup>[18]</sup>进行边缘提取,便于光斑定位。椭圆拟合后可以得到代表全反射线的光斑的中心位置像素坐标为(27.9643,370.5654),即全反射线的位置为  $Y=370.5654$ ( $Y$  表示像素位置坐标),5 个缺陷点的像素坐标、缺陷点与全反射线之间的距离、缺陷点的深度位置见表 1。已知每个像素点代表的距离为 0.0967 mm,利用高倍显微镜聚焦测得待测样品体内损伤的深度位置约为表面以下 2.372 mm 处。

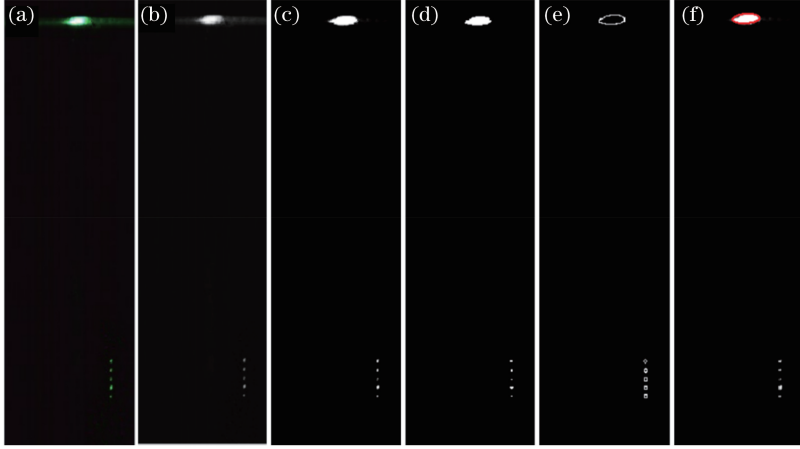


图 7 第一次扫描得到的体内缺陷点原始及处理图像。(a)原始图像;(b)灰度图像;(c)对比度增强后的图像;(d)二值图像;(e)边缘提取后的图像;(f)椭圆拟合与定位

Fig. 7 Original and processed images of internal defects obtained by the first scan. (a) Original image; (b) grayscale image; (c) image after contrast enhancement; (d) binary image; (e) image after edge extraction; (f) ellipse fitting and location

表 1 第一次扫描获得的待测样品的体内缺陷点数据

Table 1 Data of internal defects of the sample to be tested obtained by the first scan

	Number of defects shown in Fig. 7				
	1	2	3	4	5
$X$ /pixel	443.0357	455.6357	466.4357	476.6357	489.2357
$Y$ /pixel	411.0000	411.6000	411.0000	412.2000	410.4000
$ \Delta y $ /mm	3.9100	3.9680	3.9100	4.0261	3.8520
$z$ /mm	2.2575	2.2910	2.2575	2.3245	2.2240

继续扫描,第 15 次扫描时检测到待测样品的表面缺陷点散射图像如图 8 所示。对缺陷图像进行灰度变换、对比度增强、二值化、边缘提取和椭圆拟合及定位处理,如图 8(a)~(f)所示。从图 3 中可以看出元件体内缺陷和表面缺陷的大小基本相同,而图 8 所示的表面缺陷图像却比图 7 所示的体内缺陷图像亮度更高,更加清晰。这是因为体内缺陷对全反射光进行散射成像时,散射光经过待测元件与空气的界面会发生反射和吸收,使得成像系统接收的光被削弱,甚至有些散射光得不到成像系统的响应,说明界面的反射和吸收对成像质量有一定影响。椭圆拟合后得到离缺陷点最近的全反射线光斑中心位置的像素坐标为(14.9261, 514.1214),即全反射线的位置为  $Y=514.1214$ ( $Y$  表示像素位置坐标),5 个缺陷点的像素坐标、缺陷点与全反射线之间的距离、缺陷点的深度位置见表 2。

表 2 第 15 次扫描获得的待测样品的表面缺陷点数据

Table 2 Results of the surface defects of the sample to be tested obtained by the 15<sup>th</sup> scan

	Number of detects shown in Fig. 8				
	1	2	3	4	5
$X$ /pixel	736.5739	747.7406	759.1406	771.3509	782.2268
$Y$ /pixel	515.3700	515.0400	515.3867	514.6386	515.4254
$ \Delta y $ /mm	0.1207	0.0888	0.1224	0.0500	0.1261
$z$ /mm	0.0697	0.0513	0.0706	0.0289	0.0728

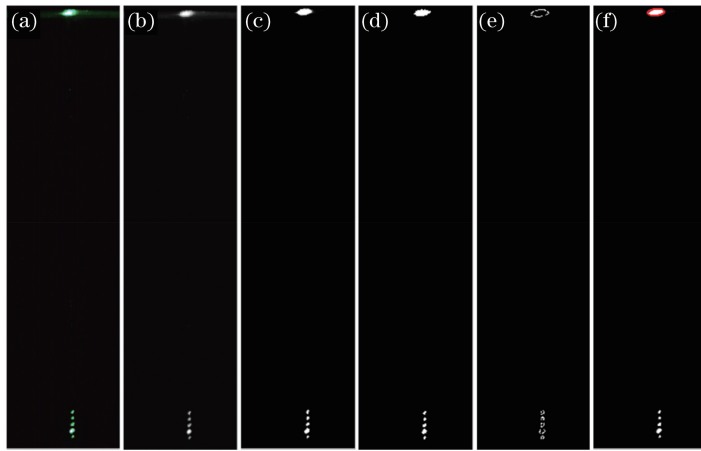


图 8 第 15 次扫描得到的表面缺陷点的原始及处理图像。(a)原始图像;(b)灰度图像;(c)对比度增强后的图像;(d)二值图像;(e)边缘提取后的图像;(f)椭圆拟合与定位

Fig. 8 Original and processed images of the surface defects obtained by the 15<sup>th</sup> scan. (a) Original image; (b) grayscale image; (c) image after contrast enhancement; (d) binary image; (e) image after edge extraction; (f) ellipse fitting and location

根据测量数据,通过图像处理和整合还原待测样品的缺陷分布情况,如图 9 所示,每个像素点代表的长度仅为 0.0967 mm,如果采用真实长度为单位,受作图空间限制,测量值与真实值将完全重合,无法区分,图中坐标采用像素作为单位。

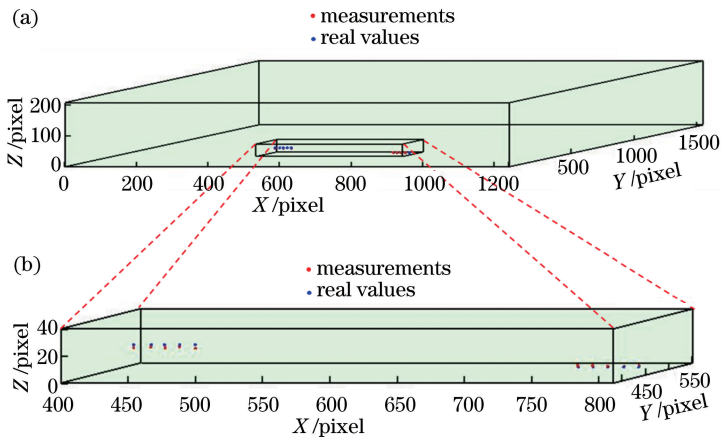


图 9 待测样品(a)整体和(b)局部缺陷分布三维图

Fig. 9 Three-dimensional maps of defects distribution for the (a) whole and (b) part of the sample to be tested

为了更直观地说明该方法检测大口径光学元件体内和表面缺陷的有效性,根据测量数据绘制了缺陷点深度位置的测量值和真实值的对比图。图 10(a)表示待测样品的体内缺陷,图 10(b)表示待测样品的表面缺陷。从图 10 中发现,待测样品体内缺陷点深度位置测量值和真实值之间存在差异,表面缺陷点的散射光斑与全反射线的距离也不为 0。产生这种现象的原因一方面是成像系统和图像处理过程存在一定误差,椭圆拟合和质心法几乎都相当于中心定位,对于表面缺陷来说,缺陷点的定位结果无论是在全反射线位置的左边还是右边,表面缺陷定位结果均显示其位于表面下一定深度处,因此表面缺陷的实际测量结果通常大于真实值;而对于体内缺陷来说,如果缺陷点的定位结果偏向远离全反射线的位置时,检测结果大于真实值,而本实验中缺陷点的定位结果更靠近全反射线的位置,所以检测结果小于真实值。另一方面是缺陷点存在一定深度,激光经过缺陷点的深度边缘时也会发生散射现象。结合图 3 和图 10 可以看出,缺陷点越大,缺陷图像越清晰,其测量值越接近真实值,误差越小。表 1 和表 2 的测量数据与真实值对比显示,待测样品体内和表面缺陷点的深度位置定位误差均小于 146  $\mu\text{m}$ 。理论上,实验中采用的 CCD 的像元尺寸为 5.5  $\mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ ,但对应于成像镜头的放大倍率,该成像系统对应所成的图像在  $xy$  成像面上的定位精度为 96.7  $\mu\text{m}$ ,即成像系

统的横向精度为  $96.7 \mu\text{m}$ 。由于深度方向的位置是由缺陷图像在  $y$  轴方向上的相对位置经换算得到的,由换算关系可知在  $60^\circ$  入射角下深度方向定位精度为  $96.7 \mu\text{m} \cdot \cot \theta = 96.7 \mu\text{m} \cdot \cot 60^\circ = 56 \mu\text{m}$ ,不考虑其他因素的影响,理论上深度方向的定位精度应为  $56 \mu\text{m}$ 。但是在实际测量中,由于系统误差、扫描时移动待测样品的抖动误差及图像处理过程中带来的误差等外部因素,实际上的测量误差可能要比理论上大  $2\sim 3$  倍,经过大量的对比实验和数据分析,发现测量值和真实值之间的误差均小于  $150 \mu\text{m}$ ,因此可以认为在本实验条件下的定位精度约为  $150 \mu\text{m}$ 。总体来说,虽然存在一定的误差,但无论是体内缺陷还是表面缺陷,缺陷深度位置的测量值和真实值都非常接近,说明该方法检测误差较小,可以有效地检测大口径光学元件缺陷点的深度位置。

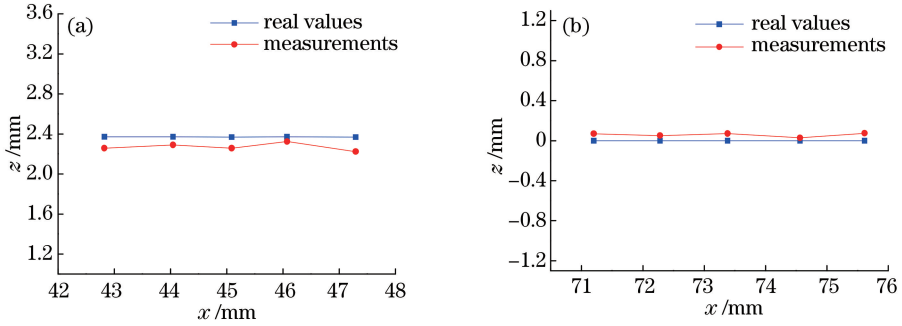


图 10 待测样品中缺陷点的深度位置的测量值和真实值对比。(a)体内缺陷;(b)表面缺陷

Fig. 10 Comparisons of measured and true values for the defect depth of the sample to be tested.

(a) Internal defect; (b) surface defect

## 5 分析与讨论

利用全内反射技术检测光学元件缺陷的方法可以准确地检测光学元件内部及表面一定尺寸的缺陷,一般来说该方法的分辨率取决于成像系统的横向分辨率。成像系统沿  $y$  轴方向分辨率  $M_y$  和沿  $x$  轴方向的分辨率  $M_x$  相互独立,根据全反射关系可知沿  $z$  轴方向的分辨率  $M_z$  与沿  $y$  轴方向分辨率  $M_y$  和全反射角  $\theta$  有关,并存在关系式  $M_z = M_y \cdot \cot \theta$ ,如果成像系统沿  $y$  轴方向的分辨率  $M_y$  可达到  $15 \mu\text{m}$ ,那么沿深度方向的分辨率可达  $8.7 \mu\text{m}$ 。

另外作为一种特例,当存在深度方向相同、深度位置不同且深度距离较近的两个缺陷点时,如图 11 所示,由于两个缺陷点在同一光路中,成像系统对其成像时,这两个缺陷点的散射图像几乎重合,即缺陷点与全反射线的距离均为  $|\Delta y_1|$ ,换算得到的深度位置相同,很难在深度位置上分辨出两个缺陷点,此时检测系统的深度方向分辨率与光束横截面宽度有关。若激光束横截面宽度为  $\Delta d$ 、入射角为  $\theta$ ,则光束横截面宽度造成的系统深度方向的分辨率为  $M_z = \Delta d / \sin \theta$ ,如图 11 所示。在这种情况下适当减小激光束横截面宽度,可以进一步提高检测系统在深度方向的分辨率。但光束横截面宽度不能太小,如果太小就会引起较强的衍射效应,反而会降低检测系统的分辨率,不具有实际意义。在本实验中,采用毫米量级的光束衍射效应较小,能够较为精确地测量缺陷的三维信息,因此认为毫米量级的光束能够满足本实验对于深度方向分辨率的要求。

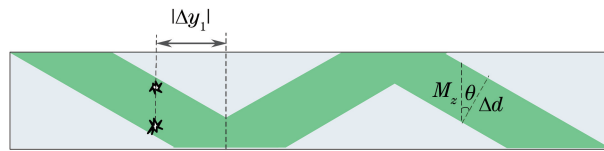


图 11 激光束在光学元件中传输的横截面示意图

Fig. 11 Cross-sectional schematic of laser propagation in optics

实验中二维可平移载物台的扫描步距应根据激光束横截面宽度和入射角设定,已知激光束横截面宽度为  $\Delta d$ 、入射角为  $\theta$ ,根据(3)式可知  $|\Delta y_1| = \Delta d / \cos \theta$  时,可以不重复地扫描整个大口径光学元件。若减小扫描步距使不同扫描次数的光束之间发生重叠,就会不断重复采集重叠部分的缺陷点信息降低检测效率,使



后期图像处理整合的难度增加。扫描步距越小,重复检测的次数越多、检测效率越低;若增大扫描步距,会减少扫描次数、提高检测效率,但会使光学元件中有些部分无法被扫描到,发生漏检的情况,因此扫描步距的最佳设定就是刚好使光束能够不重复地扫描整个待测元件。

## 6 结 论

基于传统的全内反射技术提出了检测大口径光学元件体内和表面缺陷的新方法,该方法能够非常快速地检测大口径光学元件的缺陷,不受限于光学元件口径的大小。进一步集成自动化后,与传统方法相比,该方法可以使检测效率提高  $n$  倍。本文阐述了基于全内反射的大口径光学元件缺陷的三维检测方法的基本原理,给出了深度换算公式,在理论上进行了实验验证。采用已知深度的缺陷点作为实验对象,通过成像系统采集缺陷点的散射图像,结合最小二乘法的椭圆拟合等图像处理过程获得缺陷点的二维位置信息,通过深度换算公式得到缺陷点的深度位置信息,将实验测量值与真实值进行了对比,分析了测量值与真实值之间产生差异的根本原因,实验结果显示测量值与真实值相差较小,在误差允许范围内,验证了该方法的有效性。利用该方法可以高效率地检测光学元件的体内和表面缺陷,对于尺寸为  $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 20\text{ mm}$  的光学元件,如果激光束横截面宽度为  $1\text{ mm}$ ,仅 35 次扫描依次采集图像即可完成全口径的待测样品表面及体内缺陷情况的检测,无需逐点或逐行扫描。此外,针对限制光学元件缺陷检测分辨率的因素进行了分析和讨论,结果表明提高成像系统的横向分辨率或减小激光束横截面宽度均可以有效地提高检测系统的分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the national ignition facility[J]. Fusion Sci Technol, 2016, 69(1): 295-351.
- [2] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [3] André M L. The French megajoule laser project (LMJ)[J]. Fusion Eng Des, 1999, 44(1-4): 43-49.
- [4] Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Liu Shenye, *et al.* Recent inertial confinement fusion experiments and diagnostic techniques on the shenguang laser facility[J]. Physics, 2010, 39(8): 531-542.  
江少恩, 丁永坤, 刘慎业, 等. 神光系列装置激光聚变实验与诊断技术研究进展[J]. 物理, 2010, 39(8): 531-542.
- [5] Wang Zhuo. Study on the detection and control techniques of subsurface damage in optical fabrication[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 2-5.  
王 卓. 光学材料加工亚表面损伤检测及控制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 2-5.
- [6] Lamainière L, Chambonneau M, Diaz R, *et al.* Laser damage resistance qualification of large optics for high power laser[C]. SPIE, 2015, 9345: 934508.
- [7] Stifter D. Nondestructive material testing using OCT[M]//Drexler W, Fujimoto J G. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Second Edition. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 2497-2527.
- [8] Catrin R, Neauport J, Legros P, *et al.* Using STED and ELSM confocal microscopy for a better knowledge of fused silica polished glass interface[J]. Opt Express, 2013, 21(24): 29769-29779.
- [9] Sheehan L M, Kozlowski M R, Camp D W. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica[C]. SPIE, 1998, 3244: 282-295.
- [10] Wang Jinghe, Zhang Lei, Wang Hongxiang, *et al.* Fused quartz subsurface damage detecting method based on confocal fluorescence microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406004.  
王景贺, 张 磊, 王洪祥, 等. 基于荧光共聚焦技术熔石英亚表层损伤检测办法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406004.
- [11] Xu Yixuan, Jiang Zhengdong, Wang Hualin, *et al.* Theoretical research and experimental analysis on the depth measurement of subsurface damage[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111401.  
许逸轩, 蒋正东, 王华林, 等. 亚表面损伤深度测量的理论研究与实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111401.
- [12] Temple P A. Total internal reflection microscopy: a surface inspection technique[J]. Appl Opt, 1981, 20(15): 2656-2664.
- [13] Kranenberg C F, Jungling K C. Subsurface damage identification in optically transparent materials using a

- nondestructive method[J]. Appl Opt, 1994, 33(19): 4248-4253.
- [14] Cui Hui, LiuShijie, Zhao Yuanan, *et al.* Study on total internal reflection microscopy for subsurface damage[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612004.  
崔 辉, 刘世杰, 赵元安, 等. 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612004.
- [15] Fitzgibbon A W, Pilu M, Fisher R B. Direct least-square fitting of ellipses[J]. IEEE T Pattern Anal, 1999, 21(5): 476-480.
- [16] Wang Dan, Liao Yanbiao, Zhang Min. Analysis of precisions of parameters calculated by ellipse fitting in double beam interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312002.  
王 丹, 廖延彪, 张 敏. 双光束干涉仪中椭圆拟合估算的参数精度研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312002.
- [17] Yan Bei, Wang Bin, Li Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3): 295-298.  
闫 蓓, 王 斌, 李 媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295-298.
- [18] Fan S S, Wang B. An improved canny edge detection algorithm[C]. Computer Science and Engineering, 2009: 497-500.