

非破坏性玻璃亚表面缺陷定量检测新方法

伍秀玘^{1,2}, 高万荣^{1,2*}, 张运旭^{1,2}, 何勇^{1,2}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院光学工程系, 江苏南京 210094;

²南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 210094

摘要 提出了一种基于频域光学相干层析成像(SDOCT)技术的非破坏性玻璃亚表面缺陷(SSDs)定量检测新方法,描述了所搭建SDOCT系统的成像原理和特性,给出了所重建的玻璃SSDs二维和三维图像。利用所获得的图像,可以定量获得玻璃SSDs的深度、尺寸和形状。该研究结果对光学零件的加工和应用具有重要意义。

关键词 材料; 频域光学相干层析成像术; 玻璃亚表面缺陷; 非破坏性检测; 定量检测

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0603001

New Method for Non-Destructive Quantitative Measurement of Subsurface Damage Within Glasses

Wu Xiupin^{1,2}, Gao Wanrong^{1,2}, Zhang Yunxu^{1,2}, He Yong^{1,2}

¹Department of Optical Engineering, School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technique, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A new method for the non-destructive quantitative measurement of subsurface damages (SSDs) within glass samples is proposed based on the spectral-domain optical coherence tomography (SDOCT) technology. The imaging principle and characteristics of the built SDOCT system are illustrated. The reconstructed two- and three-dimensional images of glass SSDs are given, from which the depths, sizes and shapes of glass SSDs can be obtained quantitatively. These results have significant importance for the manufacture and the applications of optical components.

Key words materials; spectral domain optical coherence tomography; subsurface damage within glasses; non-destructive measurements; quantitative measurements

OCIS codes 030.1670; 120.6650; 110.4500; 240.6700; 240.3990

1 引言

光学元件的加工过程主要包括切削、粗磨、精磨和抛光,每一个加工过程都可能会对脆性材料的表面或者亚表面造成损伤。Preston^[1]首次提出了亚表面缺陷(SSD)的概念,SSD指光学元件表面以下存在的杂质、气泡、划痕、裂纹等。SSD限制了光学元件的成像质量、稳定性和耐用性。例如,在常用的集成电路中,一般采用硅晶片作为微型零件的基底,因此对微型器件(如微型机电系统)而言,硅晶片若含有微小的损伤就可能改变其工作精度,导致其无法正常工作^[2-3];在天文望远镜中使用的光学元件长达几米,如果加工不当,其存在损伤的几率也较大,再加上特殊的放置环境(太空的温差极大),带有损伤的光学元件暴露时间太

收稿日期: 2017-02-06; 收到修改稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61275198,60978069,11473017)

作者简介: 伍秀玘(1990—),女,博士研究生,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: pearlw1990@163.com

导师简介: 高万荣(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事生物医学成像方面的研究。

E-mail: wgao@njjust.edu.cn(通信联系人)

久会导致亚表面裂纹进一步延展,从而严重破坏元件的表面质量,导致望远镜无法获取清晰可靠的图像^[4-5]。

由于对 SSD 的探测比较困难,再加上 SSD 的分布、深度等随加工条件而变化,因此很难得到一个精确预测 SSD 的理论模型。早期,美国劳伦斯利物莫国家实验室针对脆性材料在加工过程中产生的 SSD 进行了大量的实验^[6-13],他们磨削含有 SSD 的光学元件样品,然后检测 SSD 的分布。脆性材料包括光学玻璃、熔融玻璃、微晶玻璃、玻璃陶瓷、多晶陶瓷等,加工方式包括游离磨料研磨、环形工具固定研磨等。总结大量的实验经验后,他们认为 SSD 大致可分为横向裂纹、径向裂纹和轴向裂纹,并且发现横向裂纹分布靠近表面,大概在表面以下 10 μm 深度范围内,而径向和轴向裂纹可延展到较深的区域,最大深度约为 100 μm 。除了该 SSD 的经验分布模型外,他们还给出了一个 SSD 最大深度与磨粒尺寸的经验关系,这些结论让研究者们对 SSD 有了初步的认识,对研究如何调整加工参数以获取高精度的光学元件提供了重要的参考。但该检测方式具有破坏性。

为了加工出高精度的光学元件,关于如何精确获取 SSD 最大深度的研究显得很有意义,目前普遍采用的是上述破坏性方法^[14-22]来实现 SSD 深度的检测,该检测方法虽然直接可靠,但是整个流程耗时长,且需要的辅助器具较多,成本较高。因此,用非破坏性方法观察 SSD 的分布非常有必要。研究者们也提出了一些非破坏性方法,主要包括电子显微检测法^[23-24]、准布鲁斯特角检测法^[25]、共聚焦荧光显微成像法^[26-27]、全内反射显微成像法^[28-29]、X 射线衍射法^[30-31]、拉曼光谱检测法^[32]、数字全息显微观察法^[33]、传统光学相干层析成像法^[34-38]等。电子显微检测法拥有高达埃米量级的高分辨率,但也局限于浅深度的探测。在待测件透明的情况下,准布鲁斯特角检测法、全内反射显微成像法和数字全息显微观察法都可以实现大深度的检测,但前两种方法只能获取强度分布的二维图形,整个深度上的缺陷都投影到一张二维图上,因此无法精确判断每一处缺陷所在的深度位置。共聚焦荧光显微成像法可以实现较高的横向和纵向分辨率,但是需要通过精密的机械扫描才能获取 SSD 的三维结构图像,系统结构较为繁琐,且成本较高。X 射线衍射法和拉曼光谱检测法主要用于测量材料变形所引起的残余应力,前者采用不同类型 X 射线获取图像时,不同的穿透深度导致测得的应力分布不同,准确性较低;后者的分辨率较高,利用入射光与拉曼散射光频率的差值,可以确定材料的相位状态等,但是通常采用穿透力弱的微激光,使得该方法只能探测接近表面区域的结构。数字全息可以快速获取 SSD 的三维结构分布,从而得到深度、尺寸等信息,但它的局限性是纵向分辨率较低。

利用光学相干层析成像术无损伤、非侵入和高分辨率的优点,可在许多领域实现各种检测,如材料检测、医学成像、指纹识别和数据存储^[34-38]。刘宁宁等^[35]将光学相干层析成像术用于车身油漆断层成像分析,获取了油漆结构特征。Bashkansky 等^[38]采用传统的光学相干层析成像系统对陶瓷的 SSD 和激光引入损伤等进行检测,获得了深度在几百微米、宽度在毫米量级的损伤图像。该系统的纵向分辨率和横向分辨率分别约 20 μm 和 10 μm ,表明其只适用于探测尺寸较大的缺陷。本文利用频域光学相干层析成像(SDOCT)对光学玻璃 SSD 进行检测,采用超宽带光源、大数值孔径的物镜和共光路结构等实现了约 2 μm 的横纵分辨率,从而保证了对微小 SSD 的定量检测。与已有的方法相比,基于 SDOCT 的玻璃 SSD 检测方法具有非破坏性、非接触性、高分辨率和实时性等特点。

2 SDOCT 原理和特性

图 1(a)给出了 SDOCT 系统的结构示意图,图 1(b)、(c)给出了系统实物图,其中图 1(b)包含光源和探测部分实物,图 1(c)包含参考臂和样品臂部分实物。系统主要包括光源、迈克耳孙干涉光路以及探测臂。首先宽带光束从超连续发光光谱光源发出后,进入单模光纤耦合器的输入端口 1,接着光束从单模光纤耦合器的输出端口 2 出射,出射光经焦距为 19 mm 的透镜准直后,中心小部分光被反射镜反射进入参考臂,而剩下的环形光束直接透射进入样品臂。参考臂中的透镜 2 将准直光束聚焦,而参考镜放置在透镜的后焦面,聚焦光束打在反射镜后再沿原路返回到光纤耦合器。进入样品臂中的准直光束首先经过二维扫描振镜,然后被透镜 3 聚焦,焦点落在待测光学元件的表面以下且靠近表面的位置。聚焦光束经待测件内部的 SSD 散射,部分光束进入透镜 3 沿原路返回,在光纤耦合器处与参考臂汇合,发生干涉。该干涉光束随后从光纤耦合器的输入端口 2 出射,经透镜 4 准直后的光束打在 1200 lp/mm 的透射光栅中心,然后宽带光束按波长分光,最后透镜 5 将各个波长的光束聚焦到光电耦合探测器(CCD)的感光面。

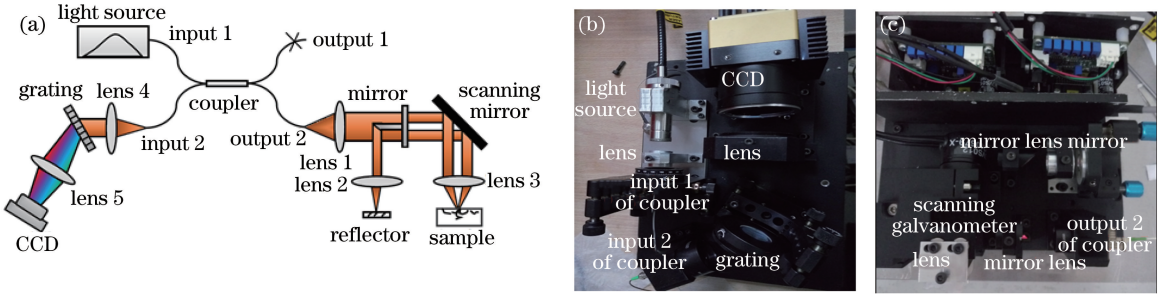


图 1 (a) SDOCT 系统结构示意图; (b) 光源和探测器件; (c) 参考臂和样品臂

Fig. 1 (a) Structural diagram of SDOCT system; (b) light source and detecting devices; (c) reference arm and sample arm

由于采用了共光路结构,单模光纤耦合器的输出端口 1 并未使用。为了采用共轴结构,参考臂和样品臂中的光学元件需尽可能相同,因此透镜 2 和透镜 3 都为短焦距的消色差透镜。此外,进入样品中的准直光束为环形光束,该形状的光束可以有效去除旁瓣,实现较高的横向分辨率,同时增大聚焦深度。

假设从参考臂和样品臂返回的光束偏振态相同,则 CCD 探测到的干涉谱信号可以表示为

$$I(k) = \left| A(k) a_r \exp(i2kr) + A(k) \int_0^{\infty} a(z) \times \exp\{i2k[r + n(\lambda, z)z]\} dz \right|^2, \quad (1)$$

式中 k 为波数, $A(k)$ 为光源功率谱密度强度的平方根, a_r 和 $a(z)$ 分别为参考镜的反射率和样品中不同深度处的反射率, $n(\lambda, z)$ 为样品内部的折射率, r 为两臂的初始光程差, z 为样品深度, λ 为波长。

从(1)式展开可以看出,干涉谱信号实际包含参考光强项、样品光强项、互相关项和共轭项,对重建信号有用的却只有互相关项,因此通常采用平均法将参考光强和样品光强滤除,而共轭项通过将等光程位置移至样品表面以上来消除。为了简化表达式,忽略两臂的色散不匹配,用折射率常数 n_0 代替折射率分布 $n(\lambda, z)$,且假设参考镜的反射率 a_r 为 1,两臂的初始光程差 r 为 0,则互相关项可以简化为

$$I_{\text{cross}}(k) = S(k) \int_0^{\infty} a(z) \exp(i2kn_0 z) dz, \quad (2)$$

式中 $S(k)$ 为光源的功率谱密度函数,通常采用高斯型光源,则有

$$S(k) = \frac{1}{\Delta k \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(k - k_0)^2}{\Delta k^2}\right], \quad (3)$$

式中 $\Delta k = \frac{\pi}{\sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2}$, $\Delta\lambda$ 为光源光谱的有效带宽, λ_0 为光源的中心波长, k_0 为中心波数。由(2)式可见,样品深度信息 $a(z)$ 可以通过对干涉谱信号 $I_{\text{cross}}(k)$ 作傅里叶变换得到。对(2)式两边作傅里叶变换,公式左边即为结构信息沿深度方向的分布,公式右边则是 $S(k)$ 的傅里叶变换与各个深度上反射系数的卷积。由于卷积的光滑作用,各个深度的边界被扩展,而展宽程度取决于 $S(k)$ 的傅里叶变换,即光源的自相干函数。在 SDOCT 中,纵向分辨率通常定义为光源自相干函数的半峰全宽距离,即

$$l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,系统的纵向分辨率与光源的中心波长成正比,与光源的带宽成反比。因此,要提高系统的纵向分辨率必须采用带宽更宽或者中心波长更短的光源。

SDOCT 系统的理论横向分辨率与物镜的有效数值孔径 NA 成反比,可以表示为

$$\delta_x = \frac{2\lambda_0}{\pi NA}. \quad (5)$$

3 实验结果与分析

3.1 SDOCT 系统横向分辨率

为了测量该系统实际的横向分辨率,选用 USAF1951 分辨率板作为样品,图 2(a)为 USAF1951 分辨率

板图样。可以看出,该分辨率板一共有 2~7 六组刻线,每组刻线包含了 6 对不同尺寸的线对,从外到内刻线越来越窄,即分辨率越来越高。首先对分辨率板进行三维成像,然后截取 X-Y 平面图像。图 2(b)表示分辨率板中第 6、7 组的重建图像,可以看到,两组刻线清晰可见,由于三维合成软件对图像设置的透明度不同,图像右侧出现等间隔的线条,实际是断层图像的界限。该分辨率板上的最细刻线为第 7 组第 6 对刻线,查看 USAF1951 分辨率板对应的刻线宽度,得到其宽度为 $2.19 \mu\text{m}$,即该 SDOCT 系统的实际分辨率高于 $2.19 \mu\text{m}$ 。

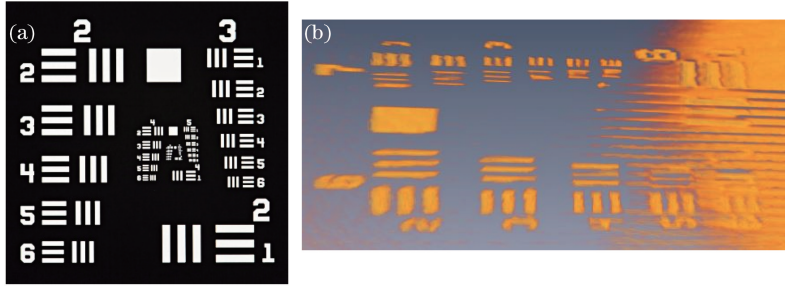


图 2 (a) USAF1951 分辨率板图样;(b) USAF1951 分辨率板中第 6 组和第 7 组的重建图像

Fig. 2 (a) Pattern of USAF1951 resolution target; (b) reconstructed image of sixth and seventh groups of USAF1951 resolution target

3.2 SDOCT 系统纵向分辨率

为了测试该系统的纵向分辨率,对玻璃表面进行成像,然后绘制沿深度方向的归一化强度曲线,将其半峰全宽作为实际的纵向分辨率。图 3(a)给出了玻璃表面的重建图像,可以看到用红色虚线标示出的两个位置的宽度有所差异,因此对这两个位置分别绘制强度曲线,如图 3(b)、(c)所示,每个图中有两个对称的脉冲,这是由 SDOCT 的重建算法决定的,并不影响成像,只需要测量其中一个脉冲的半峰全宽即可。黑色虚线标示出了强度值为 0.5 的位置,而曲线图右侧给出了红色虚线框内的曲线放大图,得到半峰全宽处对应的像素坐标,分别为 2.6 pixel 和 2.7 pixel。为了获得样品结构的实际尺寸,需要标定每个像素对应的实际长度。在纵向方向上,通过多次测量厚度为 $179 \mu\text{m}$ 的盖玻片,获取其重建图像中上下两个表面所在的像素位置,计算得到每个像素对应的实际间距为 $0.85 \mu\text{m}$ 。因此,可以得到两个位置的实际宽度分别为 $2.21 \mu\text{m}$ 和 $2.23 \mu\text{m}$,取两者平均值 $2.22 \mu\text{m}$ 作为该系统的实际纵向分辨率。虽然直观上两个位置的宽度有所差异,但实际上半峰全宽基本一致,且图 3(c)中的背景噪声明显较强。

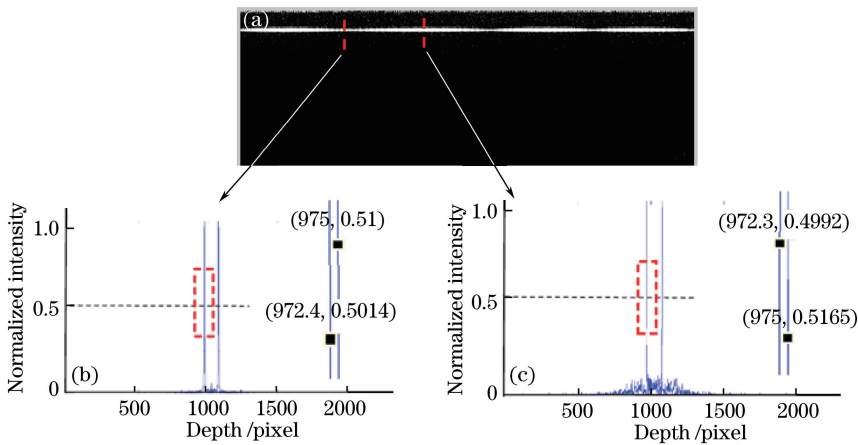


图 3 (a)玻璃表面的重建图像;(b)和(c)深度方向的归一化强度曲线

Fig. 3 (a) Reconstructed image of glass surface; (b) and (c) normalized intensity curves along depth direction

3.3 SDOCT 系统横向测量重复性

为测试该 SDOCT 系统的横向测量重复性,对玻璃 SSD 进行了 15 次测量,并绘制出同一损伤的横向归一化强度分布曲线,然后取其半峰全宽作为该损伤的宽度。图 4(a)所示为玻璃 SSD 在 XZ 平面的重建图像,红色虚线框内的损伤放大图如图 4(b)所示。图 5(a)为对应放大图中红色虚线处的归一化强度曲线,显

然曲线显示不止一个峰值,只测量右侧的最大峰值。图 5(b)所示为 15 个数据的分布,红色直线位置代表 15 个数据的平均值位置,可以发现数据在平均值两侧波动较小,表明该 SDOCT 系统对玻璃 SSD 的横向测量重复性较高。对同一个位置进行 15 次测量后,发现该损伤的宽度值在 $5.05 \sim 5.59 \mu\text{m}$ 之间,具体数值见表 1,15 组数据的平均值为 $5.28 \mu\text{m}$,标准偏差值为 $0.12 \mu\text{m}$ 。

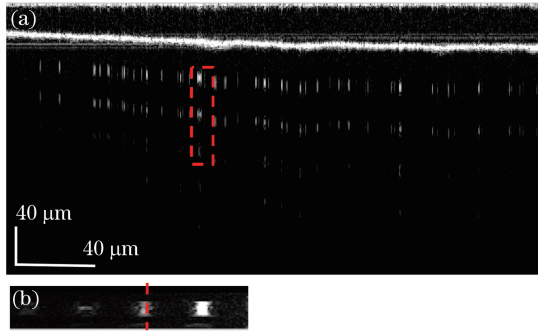


图 4 (a)玻璃 SSDs 在 XZ 平面的图像和(b)局部放大图

Fig. 4 (a) Image of glass SSDs on XZ plane and (b) enlarged partial view

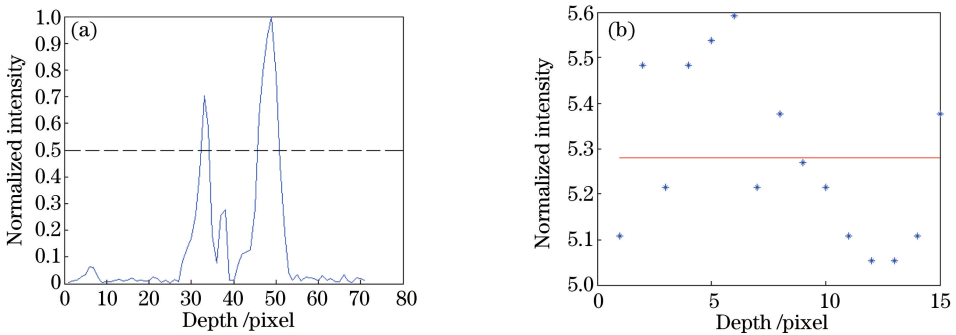


图 5 (a) SSDs 横向归一化强度分布;(b) SSD 宽度测量值的分布

Fig. 5 (a) Lateral normalized intensity distribution of SSDs; (b) measurement value distribution of SSD widths

表 1 SSD 宽度测量值

Table 1 Measurement value of SSD widths

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SSD width / μm	5.11	5.48	5.22	5.48	5.54	5.59	5.22	5.38	5.27	5.22	5.11	5.05	5.05	5.11	5.38

3.4 SDOCT 系统纵向测量重复性

为测试 SDOCT 系统的纵向测量重复性,对玻璃 SSD 进行 15 次测量,并绘制出同一损伤的纵向归一化强度分布曲线,然后取其半峰全宽作为该损伤的长度。图 6(a)所示为玻璃 SSD 在 XZ 平面的重建图像,红色虚线框内的损伤放大图如图 6(b)所示。图 7(a)所示为沿放大图中红色虚线绘制出的归一化强度曲线。

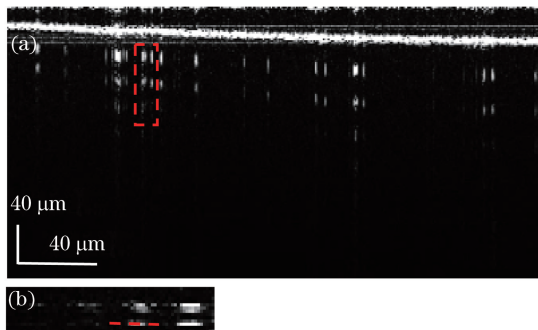


图 6 (a)璃 SSDs 在 XZ 平面的图像和(b)局部放大图

Fig. 6 (a) Image of glass SSDs on XZ plane and (b) enlarged partial view

图 7(b)所示为 15 个数据的分布,红色直线位置代表 15 个数据的平均值位置,同样看到数据在平均值两侧波动较小,但波动幅度比横向数据的波动幅度稍大。对同一个位置进行了 15 次测量后,发现该损伤的长度值浮动在 12.93~15.78 μm 之间,具体数值见表 2,15 组数据的平均值为 14.35 μm ,标准偏差值为 0.64 μm 。

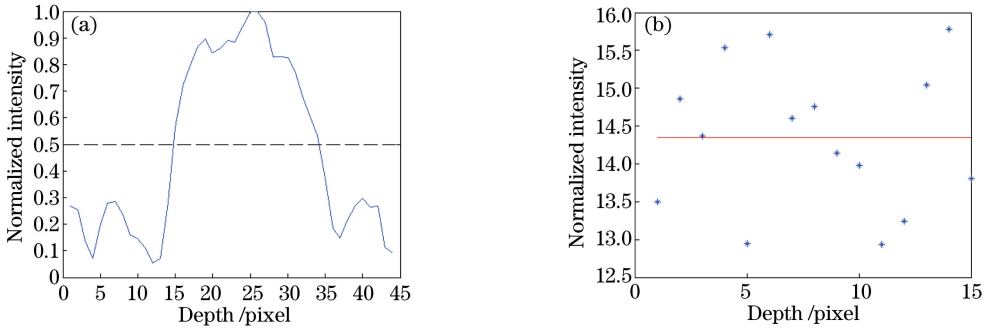


图 7 (a) SSDs 的纵向归一化强度分布;(b) SSD 长度测量值的分布

Fig. 7 (a) Longitudinal normalized intensity distribution of SSDs; (b) measurement value distribution of SSD lengths

表 2 SSD 长度测量值

Table 2 Measurement values of SSD lengths

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Length / μm	13.50	14.86	14.37	15.53	12.95	15.71	14.60	14.76	14.14	13.98	12.93	13.24	15.04	15.78	13.80

3.5 玻璃 SSD 分布

图 8 给出了利用 SDOCT 系统重建出的 SSD 二维和三维结构图像,其中图 8(a)所示为利用尖锐的压头(如圆锥压头)对光学元件表面进行研磨时容易产生的沿施压方向的损伤;图 8(b)为三维重建图像,其余三幅均为断层图像。由图 8(a)可以观察到,玻璃表面以下有很多亮条纹,而亮条纹内部包含了许多黑色区域,其代表待测件表面以下的微小损伤。有的亮条纹中间出现断裂式损伤,如图 8(a)左侧红色线段标识处所示,该断裂损伤的长度约为 6.3 μm 。有的条纹内部充满了随机分布的黑点,如图 8(a)右侧红色虚线框标识处所示,表面下侧首先出现一个凸起的形变,该形变区域下亮条纹分布密集,且包含许多微小断裂和黑色点状损伤,显然这是一个较为复杂的网状损伤。图 8(b)给出了图 8(a)对应的三维结构图像,可以清楚看到,在表面层以下悬浮着无数的微小损伤。通过三维结构,可以直观得到 SSD 的分布及尺寸等特征。图 8(c)、(d)

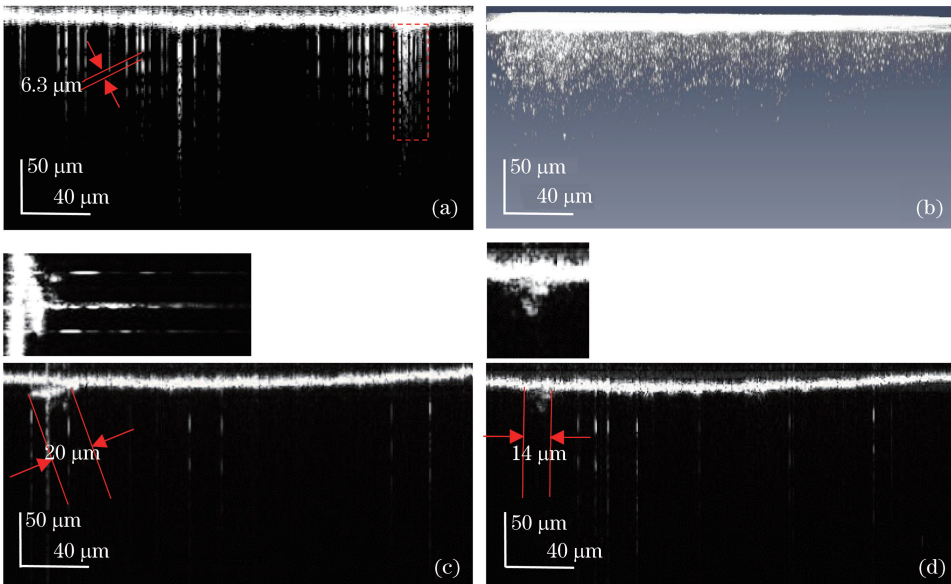


图 8 (a)尖压头产生的 SSDs 二维图像;(b)尖压头产生的 SSDs 三维图像;(c)第一处损伤重建图像;(d)第二处损伤重建图像

Fig. 8 (a) Two-dimensional image of SSDs produced by sharp indenter; (b) three-dimensional image of SSDs induced by sharp indenter; (c) reconstructed image of the first damage; (d) reconstructed image of the second damage

所示为两个典型的靠近表面的损伤结构,左上角给出了损伤的放大图。图 8(c)中的损伤宽度约为 $20\ \mu\text{m}$,最大深度约为 $16.7\ \mu\text{m}$;而图 8(d)中的损伤宽度和最大深度分别约为 $14\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 。可以看到,这两处损伤较大,但内部结构较为复杂,从表面向下延伸。

4 结 论

为了利用 SDOCT 系统对光学元件内部的损伤实现定量检测,首先对系统的分辨率和损伤测量重复性等性能进行了测试。得到 SDOCT 系统的横向分辨率高于 $2.19\ \mu\text{m}$,纵向分辨率达到 $2.22\ \mu\text{m}$,而横向和纵向损伤测量的标准偏差分别为 $0.12\ \mu\text{m}$ 和 $0.64\ \mu\text{m}$,这些数据都表明该 SDOCT 系统具有可靠的定量检测 SSD 尺寸和形状的能力。然后给出了 SSD 的二维和三维重建图像,发现 SSD 大致可以分为两类:一类是较大的损伤,直径约在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,通常从表面向下延伸;另一类是较小的损伤,直径在几微米以内,一般隐藏在表面以下,甚至可以延伸至 $100\ \mu\text{m}$ 。通过非破坏性的检测方法来观察 SSD 在整个深度上的分布,能直观精确地判断出最大损伤深度,从而能在光学零件的加工过程中移除损伤,提高光学元件的表面质量。此外,该方法也可应用于陶瓷、高聚合物材料等的表面损伤或 SSD 检测中。

参 考 文 献

- [1] Preston F W. The structure of abraded glass surfaces[J]. Transactions of the Optical Society, 1922, 23(3): 141.
- [2] Li Yong, Zhou Zhaoying, Ye Xiongying. An overview of Research on Microvalves and Micropumps[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1996, 17(1): 56-60.
李 勇,周兆英,叶雄英. 微型泵和微型阀的进展[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 56-60.
- [3] Yan Zhanhui. Present status of ultra-precision machining technology of silicon wafer[J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(11): 31-34.
闫占辉. 硅晶片超精密加工的研究现状[J]. 半导体技术, 2005, 30(11): 31-34.
- [4] Kevin R F, Reinhold G, Tung G, *et al.* Non-destructive, real time direct measurement of subsurface damage[C]. SPIE, 2005, 5799: 105-110.
- [5] Stahl H P. Optics needs for future space telescopes[C]. SPIE, 2004, 5180: 1-5.
- [6] Hed P P, Edwards D F. Optical glass fabrication technology. 2: Relationship between surface roughness and subsurface damage[J]. Applied Optics, 1987, 26(21): 4677-4680.
- [7] Lambropoulos J C, Li Y, Funkenbusch P D, *et al.* Noncontact estimate of grinding-induced subsurface damage[C]. SPIE, 1999, 3782: 41-50.
- [8] Carr J W, Fearon E, Haack J, *et al.* Subsurface structure in polished fused silica and diamond turned single crystal silicon[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [9] Lambropoulos J C, Jacobs S D, Ruckman J. Micromechanics of material removal mechanisms from brittle surfaces: Subsurface damage and surface microroughness[J]. LLE Review, 1998, 74: 131-138.
- [10] Lambropoulos J C, Gillman B E, Zhou Y Y, *et al.* Glass-ceramics: Deterministic microgrinding, lapping, and polishing[C]. SPIE, 1997, 3134: 178-189.
- [11] Lambropoulos J C, Jacobs S D, Gillman B, *et al.* Subsurface damage in microgrinding optical glasses[J]. Ceramics Transactions, 1997, 82: 469-474.
- [12] Lambropoulos J C, Fang T, Funkenbusch P D, *et al.* Surface microroughness of optical glasses under deterministic microgrinding[J]. Applied Optics, 1996, 35(22): 4448-4462.
- [13] Lambropoulos J C. From abrasive size to subsurface damage in grinding[C]. Optical Fabrication and Testing, 2000: OMA6.
- [14] Randi J A, Lambropoulos J C, Jacobs S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials[J]. Applied Optics, 2005, 44(12): 2241-2249.
- [15] Ball M J, Murphy N A, Shore P. Electrolytically assisted ductile-mode diamond grinding of BK7 and SF10 optical glasses[C]. SPIE, 1992, 1573: 30-38.
- [16] Sun X, Stephenson D J, Ohnishi O, *et al.* An investigation into parallel and cross grinding of BK7 glass[J]. Precision Engineering, 2006, 30(2): 145-153.
- [17] Tonnellier X, Shore P, Luo X, *et al.* Wheel wear and surface/subsurface qualities when precision grinding optical

- materials[C]. SPIE, 2006, 6273: 627308.
- [18] Zhou Y, Funkenbusch P D, Quesnel D J, *et al.* Effect of etching and imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(12): 3277-3280.
- [19] Suratwala T, Wong L, Miller P, *et al.* Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352(52): 5601-5617.
- [20] Neauport J, Ambard C, Cormont P, *et al.* Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20448-20456.
- [21] Suratwala T, Steele R, Feit M D, *et al.* Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(18): 2023-2037.
- [22] Wang Z, Wu Y, Dai Y, *et al.* Subsurface damage distribution in the lapping process[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1417-1426.
- [23] Puttick K E, Jeynes C, Whitmore L, *et al.* Surface damage in nano-ground silicon[C]. Proceeding of IMECH, 1992: 49-51.
- [24] Shibata T, Ono A, Kurihara K, *et al.* Cross-section transmission electron microscope observations of diamond-turned single-crystal Si surfaces[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(20): 2553-2555.
- [25] Wang J, Maier R L. Quasi-Brewster angle technique for evaluating the quality of optical surfaces[C]. SPIE, 2004, 5375: 1286-1294.
- [26] Fine K R, Garbe R, Gip T, *et al.* Non-destructive real-time direct measurement of subsurface damage[C]. SPIE, 2005, 5799: 105-110.
- [27] Neauport J, Cormont P, Legros P, *et al.* Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- [28] Föhnle O W, Wons T, Koch E, *et al.* iTIRM as a tool for qualifying polishing processes[J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 4036-4038.
- [29] van der Bijl R-J M, Föhnle O W, van Brug H, *et al.* In-process monitoring of grinding and polishing of optical surfaces [J]. Applied Optics, 2000, 39(19): 3300-3303.
- [30] Bismayer U, Brinksmeier E, Güttler B, *et al.* Measurement of subsurface damage in silicon wafers [J]. Precision Engineering, 1994, 16(2): 139-144.
- [31] Warren B E. X-ray diffraction methods[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(5): 375-384.
- [32] Gogotsi Y, Baek C, Kirscht F. Raman microspectroscopy study of processing-induced phase transformations and residual stress in silicon[J]. Semiconductor Science and Technology, 1999, 14(10): 936.
- [33] Wu X, Gao W, He Y. Estimation of parameters for evaluating subsurface microcracks in glass with in-line digital holographic microscopy[J]. Applied Optics, 2016, 55(3): A32-A42.
- [34] Stifter D, Burgholzer P, Höglinger O, *et al.* Polarisation-sensitive optical coherence tomography for material characterisation and strain-field mapping[J]. Applied Physics A, 2003, 76(6): 947-951.
- [35] Liu Ningning, Xu Xiaojing, Zhang Ning, *et al.* Studies on optical coherence tomographic images from nondestructive paint chips of motor vehicles[J]. Criminal Technique, 2016, 41(5): 367-371.
刘宁宁, 许小京, 张 宁, 等. 基于光学相干层析(OCT)技术的车身油漆无损断层成像研究[J]. 刑事技术, 2016, 41(5): 367-371.
- [36] Stifter D. Beyond biomedicine: A review of alternative applications and developments for optical coherence tomography [J]. Applied Physics B, 2007, 88(3): 337-357.
- [37] Guss G M, Bass I L, Hackel R P, *et al.* *In situ* monitoring of surface postprocessing in large-aperture fused silica optics with optical coherence tomography[J]. Applied Optics, 2008, 47(25): 4569-4573.
- [38] Bashkansky M, Iii D L, Pujari V, *et al.* Subsurface detection and characterization of Hertzian cracks in Si₃N₄ balls using optical coherence tomography[J]. NDT & E International, 2001, 34(8): 547-555.