

引用格式: QIU Xiaotian, TIAN Ailing, WANG Dasen, et al. Fluorescence Microscopic Stereo Imaging Method to Measure the Depth of Subsurface Damage of Optical Components[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1112005

邱啸天,田爱玲,王大森,等. 荧光显微立体成像测量光学元件亚表面损伤深度[J]. 光子学报,2021,50(11):1112005

荧光显微立体成像测量光学元件亚表面损伤深度

邱啸天¹, 田爱玲¹, 王大森², 朱学亮¹, 刘丙才¹, 王红军¹

(1 西安工业大学 光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021)

(2 内蒙古金属材料研究所, 浙江 宁波 315103)

摘要: 光学元件亚表面损伤直接影响光学系统激光损伤阈值, 损伤深度是衡量亚表面损伤的关键参数之一, 目前尚无成熟的快速定量测量方法。基于荧光显微立体成像技术提出一种损伤深度测量方法。首先, 在光学元件加工过程中利用量子点对亚表面损伤进行标记; 当激光束以一定角度入射光学元件表面时, 标记量子点会受激产生荧光; 通过荧光相机对损伤层纵向分布的荧光信号进行显微立体成像, 根据成像原理和结构参数计算荧光分布深度, 实现光学元件亚表面损伤深度的快速定量测量。通过光学胶和甩胶工艺制备了系列标准件, 并开展对比验证测量实验, 结果表明所提方法针对损伤深度 55~75 μm , 测量相对误差小于 8%。

关键词: 光学元件; 亚表面损伤; 立体成像; 荧光显微; 量子点

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215011.1112005

Fluorescence Microscopic Stereo Imaging Method to Measure the Depth of Subsurface Damage of Optical Components

QIU Xiaotian¹, TIAN Ailing¹, WANG Dasen², ZHU Xueliang¹, LIU Bingcai¹,
WANG Hongjun¹

(1 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

(2 Inner Mongolia Metal Material Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315103, China)

Abstract: Subsurface damage of optical components directly affects the laser damage threshold of optical systems, and the damage depth is one of the key parameters for measuring subsurface damage, for which there is no mature and rapid quantitative measurement method. A damage depth measurement method based on fluorescence microscopy stereoscopic imaging is proposed. First, during the processing of optical components, quantum dots are used to mark the subsurface damage; when the laser beam is incident on the surface of the optical component at a certain angle, the marked quantum dots are excited to generate fluorescence; the fluorescence signal of the longitudinal distribution of the damage layer is imaged microscopically by a fluorescence camera, and the fluorescence distribution depth is calculated according to the imaging principle and structural parameters to achieve rapid quantitative measurement of the subsurface damage depth of the optical component. A series of standard parts are prepared by optical glue and glue dumping process, and comparative verification measurement experiments are carried out, and the results show that the proposed method can measure the damage depth of 55~75 μm with a relative error of

基金项目: 国家自然科学基金(No.JCKY2018426C002), 陕西省科技厅项目基金(No.2019JM-373)

第一作者: 邱啸天(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测技术。Email: damocles00@foxmail.com

导师(通讯作者): 田爱玲(1964—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学检测技术。Email: ailintian@xatuedu.cn

收稿日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-07-15

<http://www.photon.ac.cn>

less than 8%.

Key words: Optical components; Subsurface damage; Stereo imaging; Fluorescent microscopy; Quantum dots

OCIS Codes: 120.6660; 160.4670; 110.2970; 270.5570; 260.2510

0 引言

随着高能激光装置、极紫外光刻装置等的不断发展,对光学元件的抗激光损伤性能要求越来越高。光学元件在经过切割、研磨、抛光等加工工序后,虽然表面质量良好,但在亚表面层依然不可避免地存在裂纹等损伤,这些损伤分布在抛光表面下几微米到几十微米深度间,在高功率激光的辐照下会吸收激光能量导致局部材料高温进而毁坏元件。如何定量测量光学元件亚表面损伤深度,为去除亚表面损伤层提供关键参数,成为光学检测领域研究的重点。

目前,光学元件的亚表面损伤深度检测方法可分为破坏性检测和非破坏性检测。破坏性检测方法会对被测光学元件造成不可逆的破坏性损伤,导致光学元件失效或报废,且检测效率低下,不可重复,因此,非破坏性检测方法越来越成为研究的主流方向。对于亚表面损伤的深度的测量,早期的研究通过表面粗糙度^[1]和磨料尺寸^[2]估算亚表面损伤分布,但该方法误差太大,且对不同的光学材料和加工工艺需要建立不同的模型,不具有一般性;现有的非破坏性检测方法全内反射法^[3,4]和X射线衍射法^[5],检测装置结构复杂,对被检测元件的材料有所限制,而且是估测亚表面损伤深度分布范围;为实现定量测量亚表面损伤的深度,出现了荧光共聚焦层析扫描^[6-8]的测量方式,如浙江大学张健浦等^[9,10]通过荧光共聚焦显微镜层析扫描熔融石英样品,对亚表面损伤进行三维重建,以此获取亚表面损伤深度信息;针对荧光共聚焦检测荧光信号强度弱的问题,北卡罗来纳大学的 WILLIAMS W B^[11-13]、哈尔滨工业大学王洪祥和侯晶等^[14-15]提出,利用量子点标记光学元件的亚表面损伤,再通过共聚焦显微镜层析扫描,根据荧光信号的强度变化实现损伤深度的测量,但依然受限于共聚焦层析扫描的速度,无法实现快速测量。

为实现光学元件亚表面损伤深度的快速定量测量,本文提出一种荧光显微立体成像测量方法,该方法利用量子点增强亚表面荧光信号,通过对纵向分布的荧光信号一次显微成像,实现光学元件亚表面损伤深度的快速定量测量。

1 荧光显微立体成像测量原理

熔石英玻璃等光学元件在研磨、抛光加工过程中不可避免地会产生亚表面损伤,即在表面下几微米到几十微米处存在裂纹、空洞等缺陷,并且嵌埋有抛光粉等杂质,在激光的辐照下会产生局部光场增强的荧光现象。但元件自身受激辐射的荧光信号强度非常微弱,难以实现成像测量,且产生的荧光特性与元件材料和加工材料有关,不具备通用性。本文采用量子点标记亚表面损伤,增强荧光信号,通过特定波长激光束激发,结合显微立体成像测量原理实现亚表面损伤深度快速定量测量。图1为测量原理图,激光器发出的激光束经光束整形组件 L_1 入射被测元件,激发亚表面层量子点形成线状分布的荧光散射信号,散射光经显微成像组件 L_2 成像在荧光相机光敏面,通过对采集的图片进行数据处理可以得到荧光信号在垂直方向上投影的长度,即亚表面损伤深度。

图1中点 O 为激光光轴与成像光轴在被测件表面的交点,即荧光检测的参考点,点 O' 为激光激发元件亚表面量子点产生的荧光信号的末端, O 和 O' 在相机光敏面所成像点分别为 P 、 P' ; AO 和 AO' 分别为 OO' 在纵向和横向的投影。 h 为荧光信号的纵向分布深度, X 为荧光像 PP' 对应的实际长度, a 、 b 分别为点 O 的物距和像距, α 为激光入射方向与成像系统光轴的夹角。

根据图1中相似三角形 $\triangle CAO' \sim \triangle CPP'$ 得

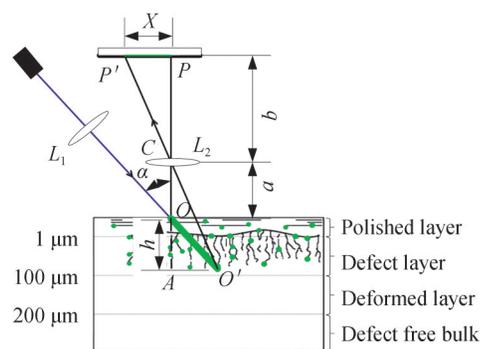


图1 立体荧光成像测量原理示意

Fig. 1 Principle of stereo fluorescence imaging detection

$$\frac{PP'}{AO'} = \frac{CP}{CA} \quad (1)$$

式中, $PP' = X$, $AO' = h \tan\alpha$, $CP = b$, $CA = a + h$ 。

整理后可得

$$h = \frac{aX}{b \tan\alpha - X} \quad (2)$$

2 亚表面损伤深度测量系统构建

根据荧光显微立体成像测量原理构建亚表面损伤深度测量系统。首先,根据实验所用量子点的吸收和激发波长对激光器进行选型,在此基础上设计光束整形系统,对直径为毫米级的激光光束进行汇聚整形,并对成像系统器件进行选型,完成深度测量系统的搭建。

2.1 激光器选型

实验所用的 CdSe/ZnS 核壳结构量子点吸收波长和发射波长如图 2。结合量子点的吸收效率和激发波长的中心,可以确定量子点的吸收波长在 450 nm 以下效果较好,为尽量避免干扰量子点发射的荧光,采用 LWVL405 型激光器作为激发光源,波长为 405 nm,束腰直径约为 2 mm。

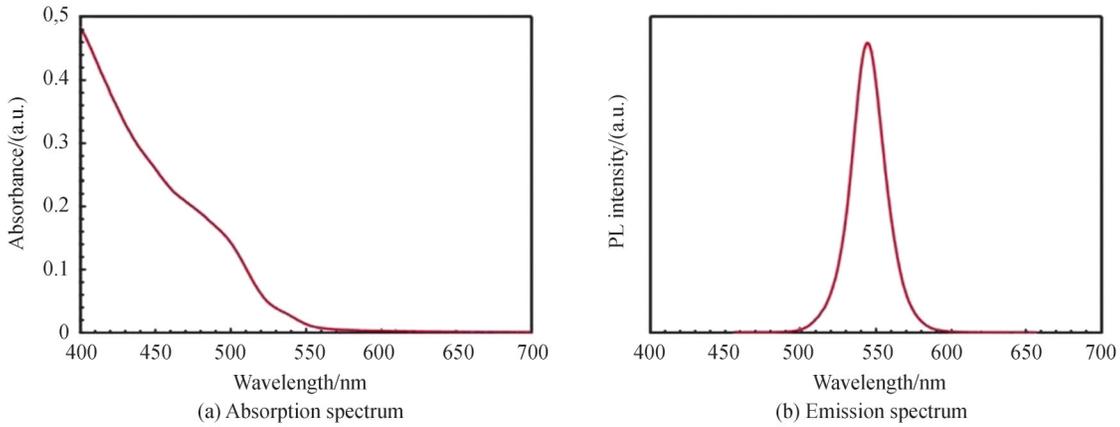


图 2 CdSe/ZnS 量子点吸收光谱和发射光谱

Fig. 2 Absorbance and PL intensity of CdSe/ZnS quantum dots

2.2 光束整形系统设计

激光器发出的激光束直径约为 2 mm,而光学元件亚表面损伤深度在微米量级,因此需要设计光束整形系统,减小入射激光束直径。本文所设计的光束整形系统如图 3,激光器自身体积较大不便于系统搭建,采用光纤耦合器将激光耦合进入光纤跳线,便于调整激光出射姿态。激光器发射的激光束直径 $D_1 = 2$ mm,经光线耦合器进入光纤跳线,从光纤端点出射的激光近似为点光源,经光纤输出准直镜进行第一次准直整形,出射的准直光束直径为 D_2 ;准直后的光束经显微镜进行二次整形,根据式(3)计算聚焦点后工作长度为 W_D 处的光束直径 D_3 。

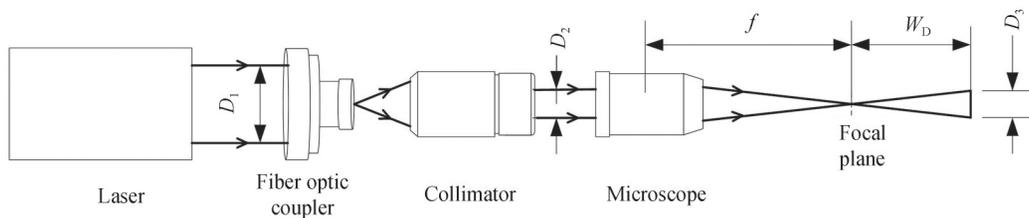


图 3 激光整形系统示意

Fig. 3 Laser shaping system

$$D_3 = \frac{W_D}{f} \times D_2 \quad (3)$$

式中, f 为聚焦物镜的焦距, W_D 为测量长度。

激光整形的目的在于激发光学元件亚表面层内的量子点形成线状分布的荧光信号, 所以将 $W_D = 100 \mu\text{m}$, 采用焦距 $f = 20 \text{ mm}$ 的聚焦物镜, $D_2 = 1.1 \text{ mm}$, 代入式(3)可得 $D_3 = 5.5 \mu\text{m}$, 即在聚焦点后 $100 \mu\text{m}$ 工作距离内的激光光束直径小于 $5.5 \mu\text{m}$ 。

2.3 成像系统器件选型

显微成像系统主要包括荧光相机、窄带滤光片、转接套筒和显微成像物镜。由于量子点在被测光学元件亚表面层的分布较少, 荧光强度较低, 普通的工业相机很难捕捉到亚表面层荧光信号, 而增大曝光时间, 随之而来的噪声信号也同样会被放大, 甚至淹没实验所需的荧光信号, 因此选用灵敏度较高的荧光相机, 对微弱信号成像的同时可以有效抑制长曝光带来的噪声信号。实验采用 SINICO XK-DS630 型荧光相机, 分辨率为 3072×2048 ; 为了尽可能减少环境光和样品及其他设备对入射激光的反射或散射信号, 在相机前端加装窄带滤光片, 根据图 2(b) 所示, 实验选用的量子点荧光的中心波长为 544 nm , 半峰宽为 25 nm , 因此选用中心波长为 543 nm , 带宽为 20 nm , 透过率大于 96% , 截止深度为 OD6 的窄带滤光片; 成像物镜选用 10 倍长工作距显微物镜, 避免激光整形光路与成像光路相互遮挡, 并通过标准转接套筒连接相机和成像物镜, 在保证成像距离的基础上可以有效减少环境光的干扰和光轴匹配的问题。

2.4 深度测量系统搭建

荧光显微立体成像测量系统实物如图 4。激光整形系统位置确定, 整形后的激光以 45° 入射, 成像系统架设在移动导轨上, 可以更换不同型号的荧光相机和不同倍率的显微物镜, 并进行调节, 调节激光整形系统和显微成像系统的高度使激光入射光轴与成像系统主光轴位于同一平面内且相交于一点, 固定二维移动平台的位置, 使该交点位于被测元件表面, 即测量的参考点, 在测量过程中, 通过调整二维平台对被测元件不同点位进行检测。

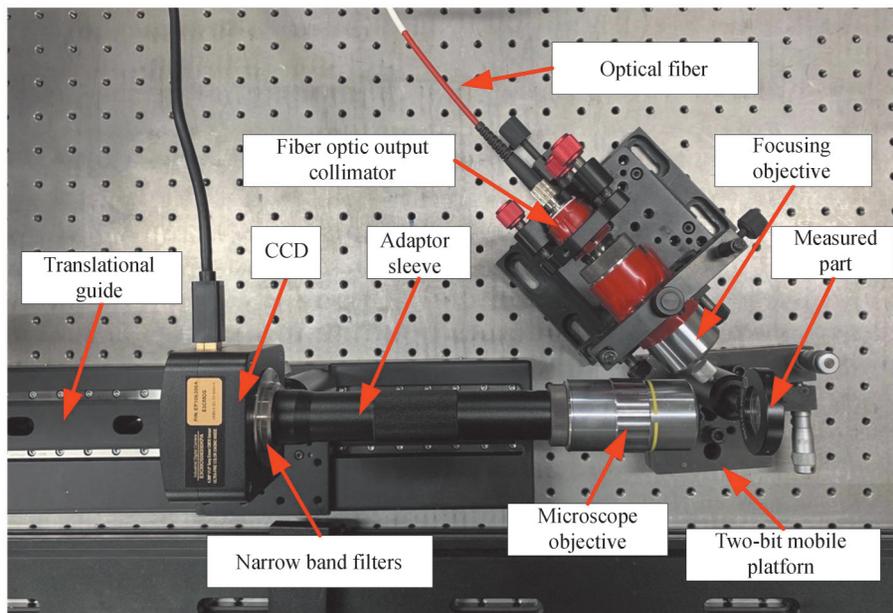


图 4 荧光显微立体成像测量系统实物

Fig. 4 Fluorescence microscopic stereo imaging measurement system

3 对比验证实验与分析

3.1 标准件制备

通过制备亚表面损伤深度不同的标准件验证测量系统的有效性。考虑到在研磨抛光加工光学元件的过程中影响亚表面损伤形成与发展的因素很多, 即使是同一批加工样品, 各点的损伤分布与损伤深度也有

较大的差异,无法实现亚表面损伤深度的精确控制;而光学胶常温下呈液态,固化后在指定波段内的光透过率大于90%,同时可以根据所用基底的折射率选择性能相近的型号,而且通过匀胶机等设备进行旋涂,膜层厚度误差可以控制在1 μm 以内。所以本文采用在玻璃基底表面旋涂光学胶的方式制备标准件。

选用尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的表面抛光熔石英玻璃作为基底,选用NOA65型光学胶,折射率为1.52与基底相近,粘度为1 200 cps。制备流程如图5。

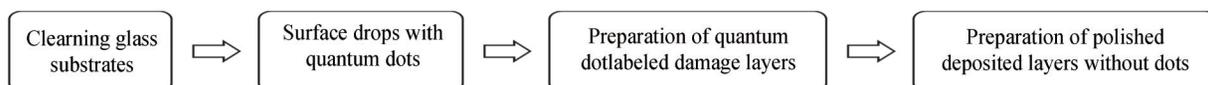


图5 标准件制备流程

Fig. 5 Flow of standard sample preparation

第一步,利用无水乙醇将基底在超声波清洗机中清洗20 min,去除熔石英玻璃基底表面附着的污染物,模拟抛光光学元件无损层,如图6(a);第二步,将稀释后的量子点溶液滴加在基底表面,静置2 min,等待量子点溶液的溶剂挥发,在基底表面残留量子点,模拟量子点渗入亚表面损伤末端,如图6(b);第三步,在胶中混入少量量子点溶液,通过匀胶机将其均匀旋涂在基底表面,在紫外灯下静置2 min,使光学胶完全固化,模拟量子点在光学元件亚表面损伤层内的离散分布,如图6(c);第四步,在固化后的光学胶表面继续旋涂一层不足1 μm 的膜层,模拟光学元件表面抛光沉积层,如图6(d)。

采用上述流程制备5组标准件,损伤层厚度分别为55 μm 、60 μm 、65 μm 、70 μm 、75 μm 。

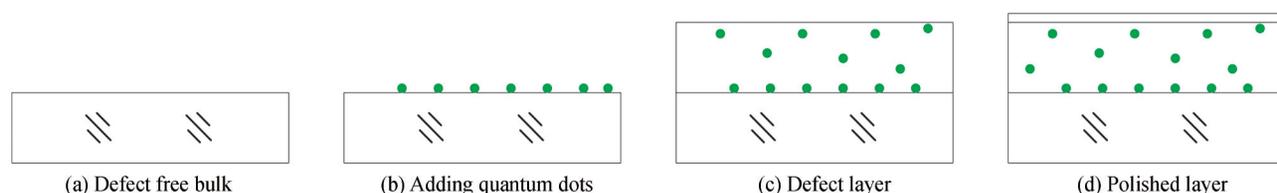


图6 样品制备流程示意

Fig. 6 Sample production process

3.2 系统标定

根据立体视觉原理,结构参数 a 、 b 、 α 用于测量应用的具体数值需要通过标定获取,由于设计的荧光显微立体成像测量系统所针对的测量对象为亚表面损伤深度,所以可以采用一维标定方法。

分析式(2)可得, X 远小于 $b \tan \alpha$,所以式(2)可以近似为

$$h = \frac{aX}{b \tan \alpha} \quad (4)$$

式中, $X = mx$, m 表示荧光相机像元尺寸, x 表示荧光像长度所占像素数。

所以,式(4)可表示为

$$h = \frac{am}{b \tan \alpha} x \quad (5)$$

令 $k = \frac{am}{b \tan \alpha}$,可得

$$h = kx \quad (6)$$

式中, k 为比例系数,由结构参数 a 、 b 、 α 和荧光相机的像元尺寸 m 决定,需要通过标定确定具体数值。

式(6)表明在本文的测量系统中,亚表面损伤深度 h 与荧光像长度所占像素数 x 呈一一对应的线性变化关系,所以可通过多组数据对拟合实现标定比例系数 k 。

通过沿深度方向平移的电控平移导轨步进5 μm 提供不同的 h 值;在导轨上固定平板,保证随着深度的变化,倾斜入射的激光可以在平板不同位置形成光斑,初始位置位于图1点 O 处;光斑通过成像系统成像,中心点相对于初始位置的偏移量即 x 。通过多组 h 与 x 的数据对的拟合标定比例系数 k 。

拟合结果如图7,图中离散点表示移动导轨步进运动时在不同深度位置处激光光斑中心点相对于初始位置的像素偏移量。由于激光倾斜入射,形成的光斑不是理想的圆形,同时受到激光器光强分布及平板表面质量的影响,光斑中心的提取有一定的误差,因此对数据点的分布产生了一定的影响。通过对离散数据点的拟合,得到图中拟合直线段,由此得到式(5)中的比例系数 $k=0.045$ 。

标定比例系数 k 后,通过立体荧光成像检测系统检测被测件亚表面荧光信号,将荧光像长度所占像素数 x 带入式(5)即可实现定量测量被测件亚表面损伤深度 h 。

3.3 亚表面荧光深度测量

为尽量减少环境光对实验的干扰,对光学元件进行暗场显微成像,图像采集流程如图8。

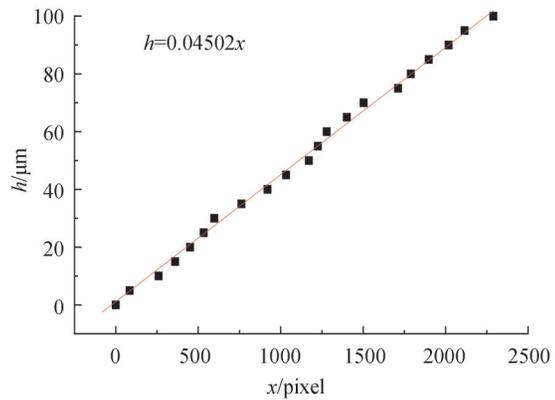


图7 标定数据及拟合结果
Fig. 7 Calibration data and fitting results

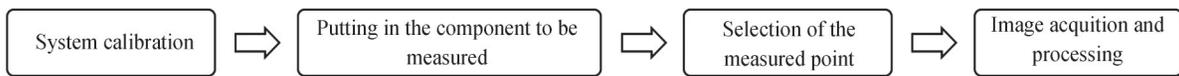


图8 图像采集流程
Fig. 8 Flow of image acquisition

通过荧光显微立体测量系统对5组亚表面损伤深度不同的样品进行暗场成像测量。利用该方法可以通过单张图片反映被测件亚表面层不同深度处的荧光信号;由于成像视场较大,黑色背景下点状的荧光信号人眼观测较为模糊,所以对测量图像作反转处理,并截取处理结果。如图9,图中标记的 x 表示荧光像长度所占像素数,单位为像素(pixel),根据式(5)计算所得 h 为对应的荧光分布深度,即亚表面损伤深度(Depth of Subsurface Damage, DSSD)。从图9中可以看出,样品亚表面层的荧光采集信号并不连续,而是呈现出离散点状分布,但整体呈现线状分布,与预想结果一致。

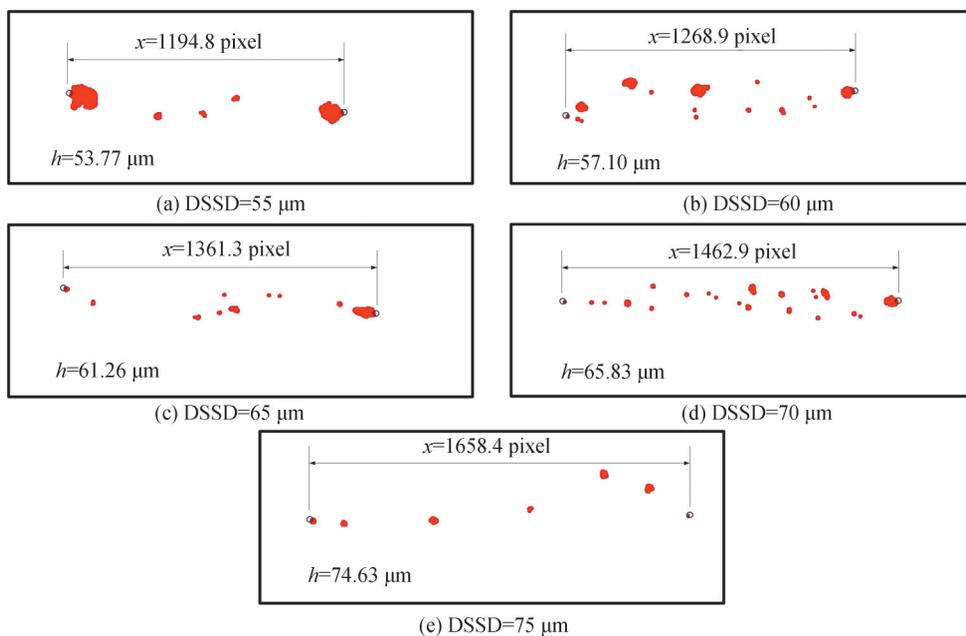


图9 亚表面损伤深度不同的被测件测量结果
Fig. 9 Measurement results of measured parts with different depths of SSD

3.4 数据对比分析

对每个被测件随机选取6个点位进行测量,测量结果如图10(a)、10为测量平均值与参考值的对比以及平均误差分布,图10(c)为每个被测件测量结果的最大相对误差。

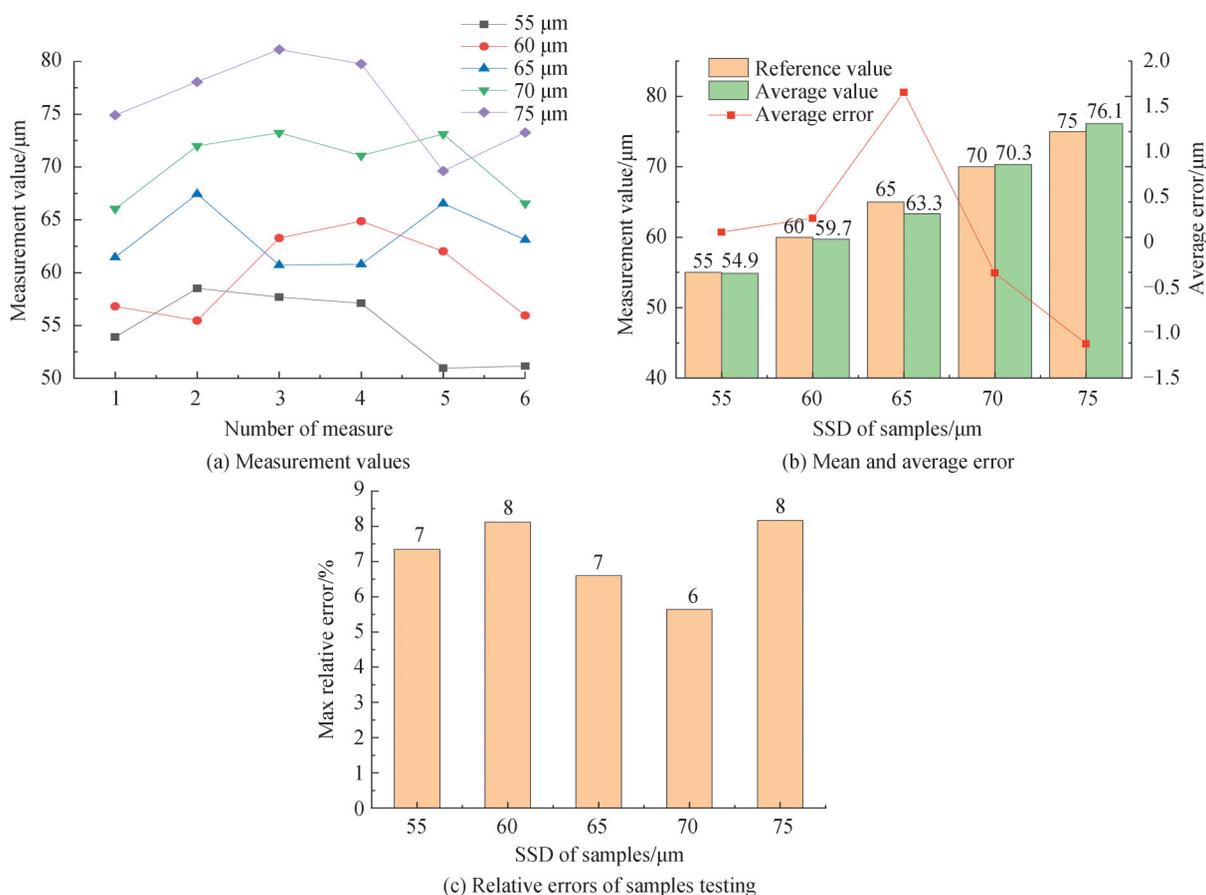


图10 测量值及测量相对误差
Fig. 10 Measured values and relative errors of samples

从图10(a)中可以看出,同一被测件多点测量结果波动幅度较大;从图10(b)可知,每个被测件测量结果的平均值与参考值基本一致,误差绝对值小于 $2\mu\text{m}$;从图10(c)中可以看出,对于亚表面损伤深度在 $55\sim 75\mu\text{m}$ 的标准件,荧光显微立体成像测量的相对误差在8%以内。

从图10(a)可知,在被测件的某些点位测量结果出现大幅度的跌落现象,如损伤深度为 $55\mu\text{m}$ 的被测件的测量点5和测量点2;损伤深度为 $60\mu\text{m}$ 的被测件的1点、2点和6点;损伤深度为 $65\mu\text{m}$ 的被测件的3点、4点;损伤深度为 $70\mu\text{m}$ 的被测件的1点、6点;损伤深度为 $75\mu\text{m}$ 的被测件的5点,测量值明显小于标准件参考值;而测量值大于参考值的测量位点,测量值分布曲线较为平缓。推测原因为标准件在制备过程中,通过在基底表面滴加量子点标定了最大损伤深度层,但量子点在损伤层内的分布是随机的,有些区域量子点的纵向分布小于损伤深度,因此出现测量曲线大幅度跌落的现象;此外,用于激发亚表面量子点的激光光束在不同深度层的直径不同,也会对测量结果产生影响。

在通过荧光显微立体成像测量系统进行图像采集与处理过程中可能对测量结果产生影响的因素包括:环境光、系统震动、图像处理算法等。通过对图9所示各测量点重复测量,测试立体荧光成像系统测量过程中环境光、系统震动和图像处理算法对系统测量重复性的影响,测量结果如图11,其中图11(a)为各标准件重复测量结果,图11(b)为各标准件重复测量值的极差和重复性误差。

从图11(a)和图11(b)测量极差中可以看出,对各测量点的重复测量结果波动较小,最大极差为 $2.12\mu\text{m}$ 。在通过对同一测量位点重复测量验证系统的重复性的实验中,单点重复测量的最大误差在 $2\mu\text{m}$ 左右,而激光束用于测量的直径小于 $5.5\mu\text{m}$,重复测量误差与光束半径基本一致,因此推测影响该系统重复性的主要

因素可能为激光光束的直径。从图 11(b)所示单点重复性误差结果可以看出立体荧光成像系统的重复性误差在 1.5% 以下,表明该系统具有良好的稳定性。

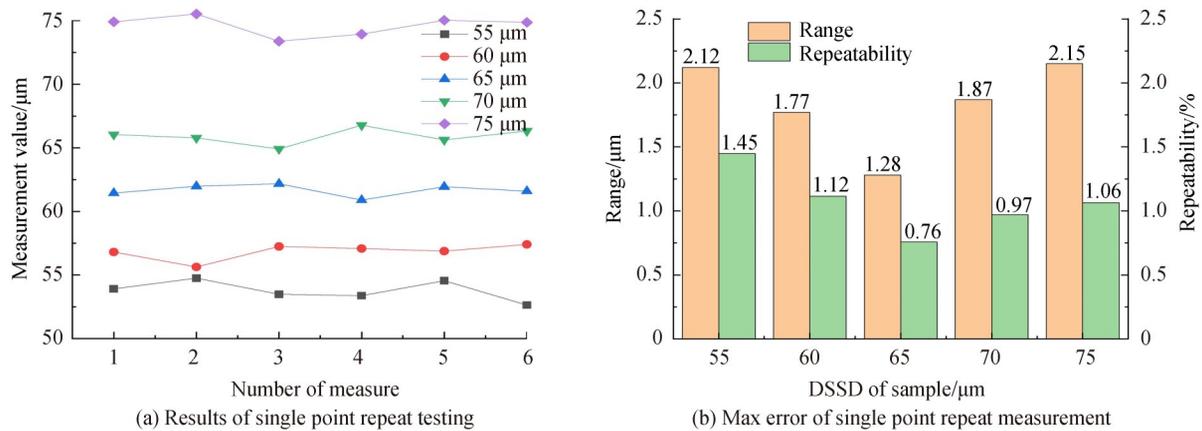


图 11 单点重复性测量

Fig. 11 Single point repeatability testing

4 结论

针对光学元件亚表面损伤深度测量问题,提出一种荧光显微立体成像测量方法,以量子点为探针,通过荧光显微一次成像快速测量亚表面损伤深度,并利用该方法测量特殊制备的系列标准件,测量结果表明:荧光显微立体成像系统测量亚表面损伤深度 55~75 μm ,测量相对误差小于 8%,系统重复性误差小于 1.5%,验证了荧光显微立体成像测量系统的可行性,具有良好的测量精度和稳定性。因此,该测量方法可用于光学元件超精密研磨和抛光过程的检测或工艺控制,为降低光学元件亚表面损伤提供关键参数,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] EDWARDS D F, HED P P. Optical glass fabrication technology. 1: Fine grinding mechanism using bound diamond abrasives[J]. Applied Optics, 1987, 26(21): 4670-4676.
- [2] MILLER P E, SURATWALA T I, WONG L L, et al. The distribution of subsurface damage in fused silica[C]. SPIE, 2005, 5991: 1-25.
- [3] WANG Hualin. Study of the position of subsurface damage depth based on total internal reflection method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
王华林. 基于全内反射法测量亚表面损伤深度位置的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [4] DENG Yan, XU Qiao, CHAI Liqun, et al. Total internal reflection microscopy: a subsurface defects identification technique in optically transparent components[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(6): 835-840.
邓燕, 许乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 835-840.
- [5] CAO Funian, BU Junpeng, WU Rangyuan, et al. Quantitative measurement of subsurface damage layer thickness in polished SI-GaAs wafers by X-Ray rocking curve FWHM[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(8): 635-638.
曹福年, 卜俊鹏, 吴让元, 等. X 射线回摆曲线定量检测 SI-GaAs 抛光晶片的亚表面损伤层厚度[J]. 半导体学报, 1998, 19(8): 635-638.
- [6] LIU Hongjie, WANG Fengrui, GENG Feng, et al. Nondestructive detection of optics subsurface defects by fluorescence image technique[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 50-59.
刘红婕, 王凤蕊, 耿峰, 等. 荧光成像技术无损探测光学元件亚表面缺陷[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 50-59.
- [7] JIANG Zhengdeng. Research and application of subsurface damage techniques based on fluorescence microscopy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
蒋正东. 基于荧光显微法的亚表面损伤技术的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [8] 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.
- [9] ZHANG Jianpu, SUN Huanyu, WANG Shiling, et al. Three-dimension reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 141-151.
张健浦, 孙焕宇, 王狮凌, 等. 熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 141-151.

- [10] ZHANG Jianpu. Research on key technologies of subsurface/body defect detection of fused quartz optical elements[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2020.
张健浦. 熔石英光学元件亚表面/体缺陷检测关键技术研究[D]. 浙江:浙江大学, 2020.
- [11] WILLIAMS W B, MULLANY B A, PARKER W C, et al. Using quantum dots to evaluate subsurface damage depths and formation mechanisms in glass[J]. The International Academy for Production Engineering Annals–Manufacturing Technology, 2010,59(1): 569–572.
- [12] WILLIAMS W B, MULLANY B A, PARKER W C, et al. Using quantum dots to tag subsurface damage in lapped and polished glass samples[J]. Applied Optics, 2009,48(27): 5155–5163.
- [13] WILLIAMS W B. A novel fluorescence based method of assessing subsurface damage in optical materials[D]. Carolina: The University of North Carolina, 2009.
- [14] WANG H, HOU J, WANG J, et al. Experimental investigation of subsurface damage depth of lapped optics by fluorescent method[J]. Journal of Central South University, 2018,25(7): 1678–1689.
- [15] HOU Jing, WANG Hongxiang, WANG Chu, et al. Nondestructive fluorescence detection method for subsurface damage depth of optics [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018,50(7): 17–22.
侯晶, 王洪祥, 王储, 等. 光学元件亚表面损伤深度的无损荧光检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018,50(7): 17–22.