

# 基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试

冯方, 田爱玲\*, 刘丙才, 冯丹青, 陈晨, 刘卫国

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, 陕西 西安 710021

**摘要** 为实现光学元件表面疵病的三维全场测量, 提出了一种数字全息显微扫描成像的检测方法。该方法基于数字全息角谱数值重建算法, 获得光学元件表面划痕的相位分布, 通过扫描拼接实现划痕的全场测量; 然后, 在数字全息显微实验装置的基础上增加二维精密扫描部件, 对于宽  $50\ \mu\text{m}$ 、深  $50\ \text{nm}$  标准划痕, 测得其宽度为  $49.2\ \mu\text{m}$ 、深度为  $48.9\ \text{nm}$ , 同时拼接获得该划痕的全场三维形貌。实验表明: 该检测方法可实现大视场划痕缺陷的全场三维测试, 其宽度和深度测量的相对误差分别为  $1.6\%$  和  $2.2\%$ 。

**关键词** 全息; 划痕检测; 数字全息; 扫描拼接; 全场测试

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0409003

## Full-Field Three-Dimensional Test for Scratch Defects Using Digital Holographic Scanning Imaging System

Feng Fang, Tian Ailing\*, Liu Bingcai, Feng Danqing, Chen Chen, Liu Weiguo

Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** To obtain three-dimensional full-field measurements of the surface defects of optical elements, a method of digital holographic microscopic scanning imaging is proposed in this study. Based on the numerical reconstruction algorithm of digital holography angle spectrum, the phase distribution of scratches on the surface of optical elements is obtained, and the whole-field measurement of scratches is obtained using the principle of scanning and splicing. Then, a two-dimensional precision scanning component is developed based on the digital holographic micro-experimental device. For the standard scratch having a width of  $50\ \mu\text{m}$  and a depth of  $50\ \text{nm}$ , we measure a width of  $49.2\ \mu\text{m}$  and a depth of  $48.9\ \text{nm}$ . Next, the full-field three-dimensional morphology of the scratch is obtained by splicing. The experimental results show that the defect panorama with larger scale can be obtained by phase stitching. The relative errors of width and depth are  $1.6\%$  and  $2.2\%$ , respectively.

**Key words** holography; scratch detection; digital holography; overlap-scanning; full field test

**OCIS codes** 090.1995; 100.3010; 110.6880; 120.4630

## 1 引言

随着光学技术的不断发展, 现代光学工业对光学元件表面质量有着越来越高的要求<sup>[1]</sup>。元件加工过程中任何不当操作都可能造成表面疵病缺陷, 疵病主要有划痕、破边、麻点、斑点<sup>[2-3]</sup>, 这些表面疵病的横向尺寸大多在微米、亚微米量级范围内, 疵病都离散随机地分布在元件表面上, 对整个光学系统的运行产生了很大影响, 因此目前已提出很多光学元

件表面疵病的检测技术。现有的测量方法有目测法<sup>[4]</sup>、散射能量分析法<sup>[5]</sup>、频谱分析法<sup>[5]</sup>、掠射法<sup>[6]</sup>和滤波成像法<sup>[7-9]</sup>等, 都被广泛应用在光学元件检测上。沈卫星<sup>[10]</sup>利用滤波成像法实现了宽度为  $20\ \mu\text{m}$  的划痕测量; 杨甬英等<sup>[11]</sup>运用暗场成像法对横向尺寸为  $10\ \mu\text{m}$  的划痕的宽度进行了准确检测; 王科等<sup>[12]</sup>利用散射法结合显微成像原理检测了尺寸在  $1\ \mu\text{m}$  左右的疵病。大多检测疵病的方法都可实现精准测量, 采用这些方法可逐步改善实验系统, 提高

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-20; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2018426C002)、陕西省教育厅重点实验室项目(17JS048)

\* E-mail: ailintian@xatu.edu.cn

测量结果的精度,达到高效、高速、高精度和无损的测量要求。但此类方法仅能测量疵病的二维结构,不能满足疵病纵向深度的检测。为能够更准确地分析不同形态、不同尺寸的缺陷,使测量结果对加工有真正指导作用,疵病的三维形貌测量尤为重要。

数字全息技术<sup>[13-15]</sup>能够根据单帧图像快速恢复物体的三维形貌。1999年,CuChe等<sup>[16]</sup>利用单张全息图通过数值重建显微物体的三维振幅及位相信息,获得了活体细胞的三维位相分布,并验证了其动态特性;2008年,冯忠耀等<sup>[17]</sup>运用数字全息技术,根据参考光入射角的变化量来确定不同区域的位置关系,测量了11 cm×19 cm石膏嘴的形貌,实现了大物体三维测量;2009年,于瀛洁等<sup>[18]</sup>通过数字全息显微术获得了分辨率板的三维形貌,并根据拼接原理实现了大视场测量;2010年,Widjaja<sup>[19]</sup>运用相干背景消去法定量研究了同轴非涅耳全息图,提高了全息图重建图像的质量;2012年,王璠璟等<sup>[20]</sup>以激光器谐振腔反射镜为被测件,将此技术应用于光学元件表面测量,进一步说明了光学元件检测方法的多元化;2015年,Verma等<sup>[21]</sup>将数字全息技术与空间滤波、中值滤波相结合,以6 line/mm的光栅和光学玻璃板为实验对象,实现了周期性和非周期性元件测试,检测出光栅表面缺陷宽度为20.1 μm,光学玻璃板划痕的缺陷宽度为6.7 μm;2017年,Ganjkhani等<sup>[22]</sup>在数字全息超分辨三维检测中引入结构光照明技术,通过测试棋盘格及六角形的光栅,实现了横向分辨率增强;2019年,Trivedi等<sup>[23]</sup>根据光学元件的折射率分布变化,运用单光束无透镜傅里叶变换数字全息技术实现了缺陷

检测。多年来,数字全息的突破和进展为光学检测领域提供了新思路,但由于疵病具有分布较广且随机的特点,且测量大口径光学元件时不能完整构建出缺陷的三维形貌,因此本文利用数字全息显微测量技术进行光学元件表面划痕的三维精确测试,并通过相位拼接原理,实现了表面划痕的全场测试。

## 2 测量原理

### 2.1 数字全息显微测量原理

数字全息技术的测量原理如下:物体经成像系统后,所成的像中包含物体信息,光波承载这些信息经平面向像面传递,数字图像传感器对携带信息的光波的波前进行记录,采用角谱法把波前再现出来,产生可观察的像。成像这一过程分两步:第一步是记录,即以干涉条纹的形式在CCD相机上存储被摄物体的光强和相位;第二步是再现,即用光的衍射原理重现被记录物体的三维形状。

图1所示为数字全息显微测量原理图,假定被记录的划痕缺陷位于 $x_0y_0$ 平面,位于 $xy$ 平面的是记录全息图的CCD光敏面,再现像位于 $x_1y_1$ 平面,CCD记录面与物平面距离为 $z_0$ ,与再现像平面的距离为 $z_1$ 。物光波波前及相干参考光波在 $xy$ 面上的复振幅分布分别为

$$\begin{cases} O(x, y) = o_0(x, y) \exp[-j\varphi_o(x, y)] \\ R(x, y) = r_0(x, y) \exp[-j\varphi_r(x, y)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $o_0(x, y)$ 和 $r_0(x, y)$ 分别表示物波和参考波的振幅分布; $\varphi_o(x, y)$ 和 $\varphi_r(x, y)$ 分别表示物波和参考波的位相分布。

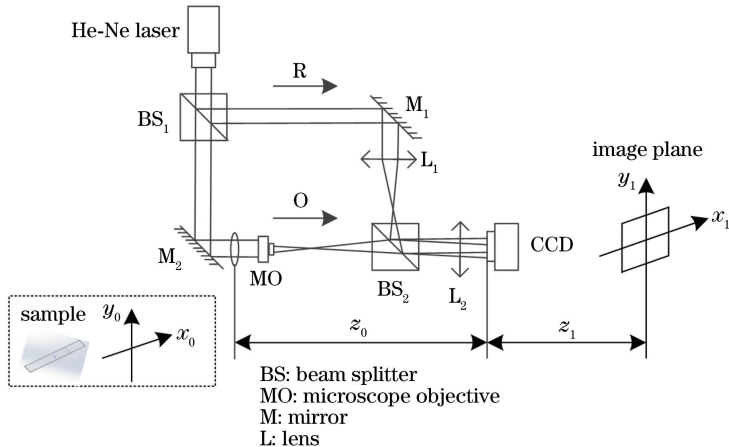


图1 数字全息显微测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of digital holographic microscope

当物光与参考光发生干涉后,在 $xy$ 面上总的光场可表示为

$$U(x, y) = O(x, y) + R(x, y), \quad (2)$$

强度分布为

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y)。 \quad (3)$$

(3)式中前两项是物光和参考光的强度分布,后两项是参考光与原始物光波的实像  $O^*(x, y)$  和虚像  $O(x, y)$  的干涉项。干涉的幅值和位置信息中包含物光的振幅和相位信息,它们分别受到参考光振幅和相位的调制。由于物光与参考光存在一定夹角,因此干涉得到的全息图经傅里叶变换后,所得的空间频谱图的各干涉像相互分离,在全息图衍射场中有 0 级和 ±1 级干涉波,通过空间滤波提取所需的正一或负一级频谱,利用角谱衍射理论对物光场进行重建。分析可知再现距离为  $z_0$ ,经再现光波  $C(x, y)$  照射后,全息图在传播距离  $z_0$  处的衍射场即为再现物光场,其复振幅分布  $u_{z_0}(x', y')$  可表示为

$$u_{z_0}(x', y') = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [I(x, y) \cdot C(x, y)] \cdot \exp [jkz_0 \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \}, \quad (4)$$

式中:  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别为二维傅里叶变换和二维傅里叶逆变换;  $(\lambda f_x, \lambda f_y)$  为像面的频域坐标。对再现像的复振幅分布  $u_{z_0}(x', y')$  进行数值化分析,可分离出再现像的相位信息,具体表达式为

$$\phi(x', y') = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[u_{z_0}(x', y')]}{\text{Re}[u_{z_0}(x', y')]} \right\}。 \quad (5)$$

### 2.2 扫描拼接原理

受到显微成像系统视场及 CCD 像面尺寸的限制,数字全息显微成像系统只能重建小区域的划痕相位。为实现划痕缺陷的三维全场测试,需要对小口径多幅相位图进行拼接,图像采集的扫描路径<sup>[24]</sup>如图 2 所示。通过精密电控平移台进行  $x$  方向和  $y$  方向的操作,沿  $x$  轴正方向逐一进行扫描,根据重叠区域要求和单次成像区域大小确定步进间距,平移台每平移一步采集一幅图像,将沿  $x$  轴正方向采集的图像依次命名为  $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}$ ; 然后沿  $y$  轴负方向进行单位步进距离平移,采集图像命名为  $A_{2n}$ ,再沿  $x$  轴负方向进行平移扫描,图像依次命名为  $A_{2n}, \dots, A_{22}, A_{21}$ ,以此类推,可得到光学元件的子孔径疵病图像。

对于扫描后的小口径全息图,利用 2.1 节的数字全息原理再现得到相位图,按照相对位置进行图像拼接。子孔径拼接原理如图 3 所示,拼接是采用干涉的方法通过平移和旋转将相邻子孔径重叠区域的参考面进行统一,最终在一个指定的参考面上对全口径波面进行恢复。

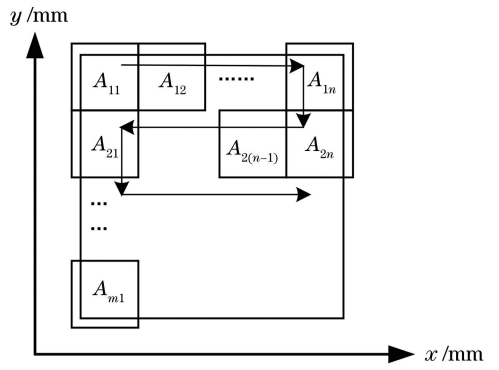


图 2 子孔径图像采集的扫描路径

Fig. 2 Scanning path for subaperture image acquisition

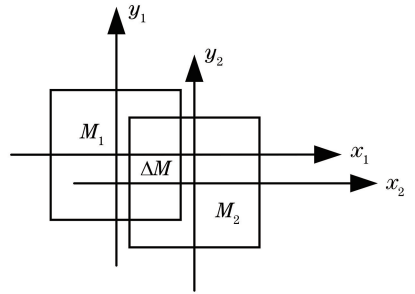


图 3 子孔径拼接原理示意图

Fig. 3 Subaperture stitching principle diagram

$M_1$  和  $M_2$  是两次子孔径检测结果,其相位值可表示为

$$M_1(x, y) = a_1x + b_1y + c_1 + M_{01}(x, y), \quad (6)$$

$$M_2(x, y) = a_2x + b_2y + c_2 + M_{02}(x, y), \quad (7)$$

式中:  $M_{0i}(x, y)$  ( $i=1, 2$ ) 为中心子孔径的系统坐标;  $a_i$  ( $i=1, 2$ ) 和  $b_i$  ( $i=1, 2$ ) 分别为拼接时子孔径沿  $x$  和  $y$  轴的倾斜量;  $c_i$  ( $i=1, 2$ ) 为拼接时子孔径沿光轴的位移量。  $\Delta M$  为  $M_1$  和  $M_2$  的重叠部分,具有和  $M_1, M_2$  一样的相位信息。根据  $\Delta M$  将(6)式和(7)式进行合并,可得到

$$\Delta M = \Delta ax + \Delta by + \Delta c, \quad (8)$$

式中:  $\Delta a, \Delta b$  为各子区的相对倾斜量;  $\Delta c$  为各子区的相对轴向位移。为求得  $\Delta a, \Delta b, \Delta c$  的精确解,需要在重叠区域取不在同一直线的三个点。为避免误差的影响,取多个点用最小二乘法拟合解得三个参量。

子孔径的划分形状在拼接技术中也起至关重要的作用,本次测量样件为矩形光学元件,矩形孔径间具有比较大的重叠面积,拼接效率较高,且矩形区域方便图像及数据处理,因此采用矩形进行子孔径拼接。在子孔径拼接顺序及路径选择上,为减少误差的累积,选用并联模式拼接,以中心子孔径为基准,将外围子孔径与中心子孔径拼接在一个平面上。设  $\Delta a, \Delta b$  和  $\Delta c$  为外围子孔径与中心子孔径在  $x, y$

方向上的相对倾斜量和相对轴向位移,假设有  $K$  个重叠区域,在某一区域的采样点数是  $N$ ,对所有在重叠区域采集的数据进行残差计算,使其平方和最小,计算式为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N [\Delta M_i(x_i, y_j) - \Delta a_i x_{ij} + \Delta b_i y_{ij} + \Delta c_i]^2 \rightarrow \text{Min}, \quad (9)$$

式中:  $\sigma^2$  为所有重叠区域采集的数据的残差值的平方和。使  $\Delta a_i, \Delta b_i, \Delta c_i$  偏导为零,求得子孔径与中心孔径的相对倾斜量与轴向平移量,进一步根据波面分布拟合物体表面的相位分布。

### 3 实 验

#### 3.1 实验装置

数字全息显微扫描成像实验装置如图 4 所示。激光器为波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器;显微物镜放大倍数为 10 倍,数值孔径为 0.25;精密电控平移台是 Thorlabs 公司的 LTS300(/M)线性移动平台,可实现的最小增移量为 100 nm;CCD 分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 。由激光器产生的激光经由伽利略扩束器、透镜  $L_1$  构成的扩束准直系统,再由分光棱镜  $BS_1$  分为两路:一路为物光光束,经衰减片  $NF_2$  调节光强后在反射镜  $M_2$  上进行转向,光线垂直入射到待测件上,再经显微物镜  $MO_2$  ( $10\times$ )后携带被测件信息到达分光棱镜  $BS_2$ ;另一路为参考光束,光线经扩束准直到达衰减片  $NF_1$ ,经显微物镜  $MO_1$  ( $10\times$ )扩展,光束照射在反射镜  $M_1$  上,形成和物光曲率半径相等的球面光。通过分光棱镜  $BS_2$  合束后,两束光发生全息干涉,由 CCD 相机记录干涉信息。通过计算机控制精密电控平移台实现划痕样品的定步距精确扫描,并采集相应全息图。

#### 3.2 划痕测试及拼接

为实现划痕缺陷的全场三维测试,首先验证数字全息显微技术检测划痕的可行性。本次实验选取横向尺寸  $50 \mu\text{m}$ 、深度 50 nm 的划痕标准板作为测量对象,先将标准版放置于测量光路中,在 CCD 靶面上可以清晰观测到干涉光所携带的划痕信息,划痕全息图如图 5(a)所示。本文采用角谱重构法实现物光场再现,利用傅里叶逆变换处理全息图,得到的空间频谱图如图 5(b)所示,然后取正一级频谱采用傅里叶逆变换重建物光场,用(6)式得到物光场的相位分布。但在图像处理过程中透射波前存在明显的起伏,其主要原因是整个光路系统中的光学元件

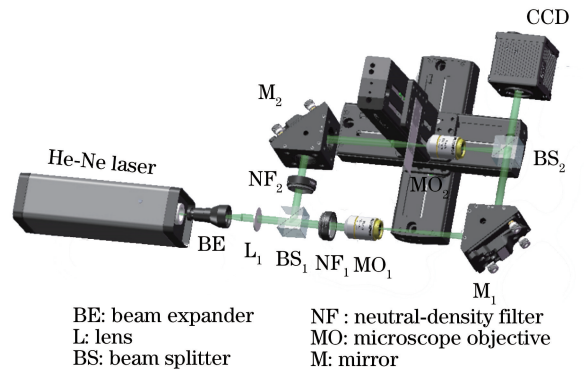


图 4 光学元件疵病数字全息检测装置

Fig. 4 Digital holographic detection device for optical component defects

在生产加工过程中存在一定程度的面形误差,导致光束在传播过程中具有波前畸变。为消除这一系统本身的相对误差,进一步采集没有被测件情况下的全息图,如图 5(c)所示,通过相同的方法进行物光场重建,得到其相位图。然后运用程序算法将两相位图相减,最终结果中消除了系统误差引起的相位畸变。图 5(d)为划痕的二维分布图,图 5(e)为划痕横向截面图,图 5(f)是数值重建后得到的三维重建图,可直观看到划痕的三维形貌,图中  $\bar{h}_1$  为被测划痕表面高度平均值,  $\bar{h}_2$  为被测划痕底面高度平均值,  $\Delta \bar{h}$  为计算所得的被测划痕深度,  $\Delta \bar{w}$  为被测所得的被测划痕宽度。

在测量划痕的实验过程中发现,波前畸变严重影响整个实验的测量精度。消除这一因素后,由于光学系统受到孔径光阑与视场光阑的限制,实验结果的分辨率受到了影响。因此进一步采用全场扫描测试,对采集的划痕子孔径进行拼接,得到划痕的长度信息。根据 2.2 节所述的扫描及拼接原理,分别沿  $x, y$  方向进行步进距离为 0.16 mm、0.17 mm 的扫描并采集图片,得到  $2 \times 2$  的划痕全息图,如图 6 所示。利用 2.1 节所述的处理方法得到的被测划痕的二维分布图如图 7 所示,拼接后的二维分布图如图 8 所示,在图 9 的三维图中能够直观看出拼接后的疵病形貌。通过对划痕子孔径的拼接,改善了成像系统中光阑的限制,划痕的高频信息可以被 CCD 接收,在一定程度上提高了成像分辨率和准确度,从而可进一步得到划痕的深度信息。

#### 3.3 实验分析

本文先运用数字全息显微技术测量单个划痕,验证此方法的可行性,然后进行子孔径的扫描及拼接实现全场测试。文中实验的划痕标准件宽



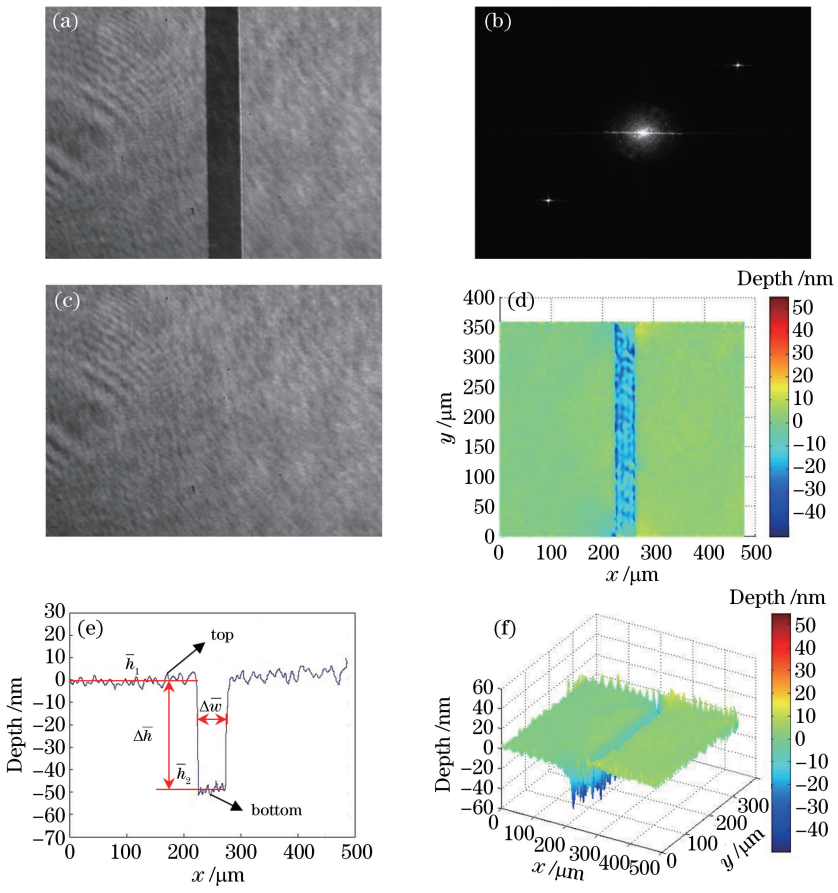


图 5 划痕测试结果图。(a)划痕全息图;(b)空间频谱图;(c)无被测件全息图;  
(d)划痕的二维图;(e)划痕横向截面图;(f)划痕的三维图

Fig. 5 Scratch test results. (a) Scratch hologram; (b) spatial spectrum; (c) hologram without measured parts;  
(d) 2D picture of scratch; (e) cross-section of scratch; (f) 3D figure of scratch

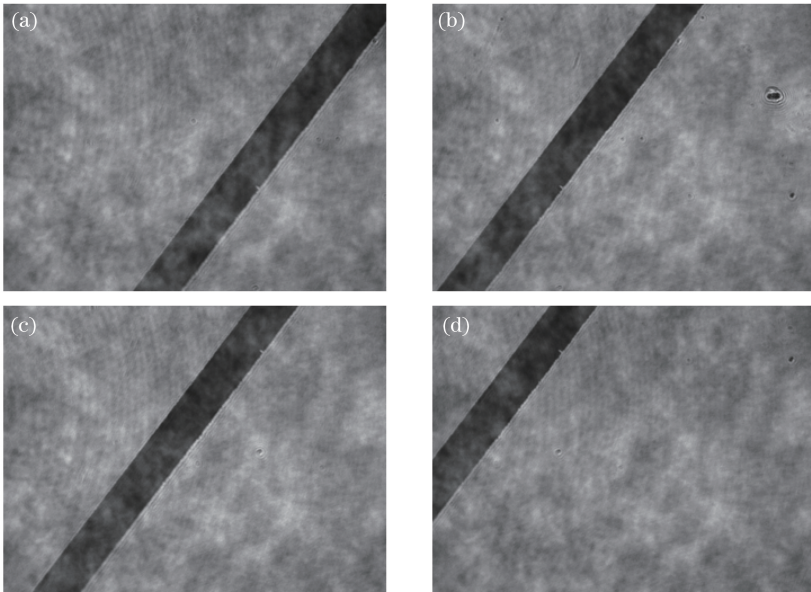


图 6 子孔径缺陷全息图。(a)子孔径 1;(b)子孔径 2;(c)子孔径 3;(d)子孔径 4

Fig. 6 Subaperture defect holograms. (a) Subaperture 1; (b) subaperture 2; (c) subaperture 3; (d) subaperture 4

50  $\mu\text{m}$ 、深 50 nm。由图 5(e) 的划痕横向截面图可知,其顶部与底部的结果因噪声影响而存在波动,通

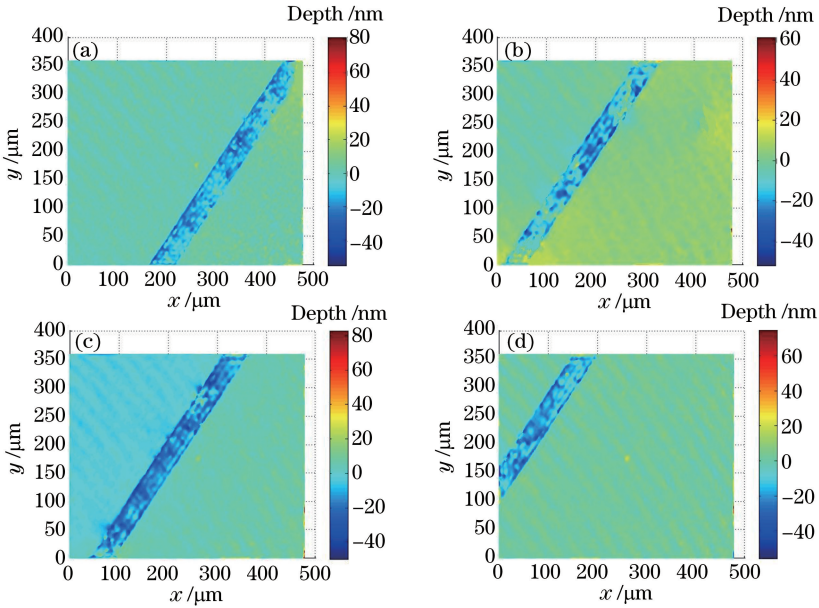


图 7 子孔径划痕深度的二维分布图。(a)子孔径 1;(b)子孔径 2;(c)子孔径 3;(d)子孔径 4

Fig. 7 2D distributions of scratch depth in subaperture. (a) Subaperture 1; (b) subaperture 2; (c) subaperture 3; (d) subaperture 4

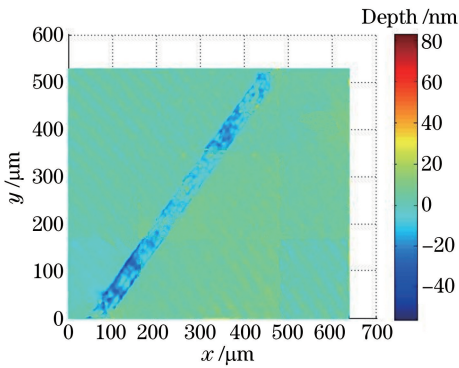


图 8 拼接后的划痕深度二维分布图

Fig. 8 2D distribution of scratch depth after splicing

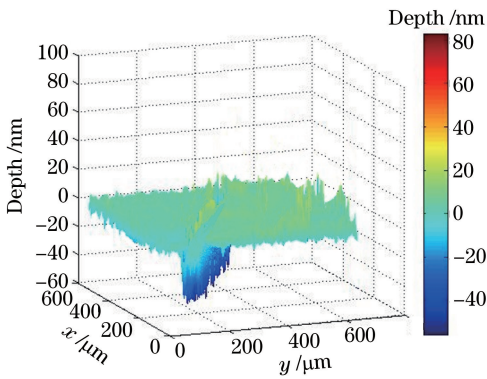


图 9 拼接后划痕的三维图

Fig. 9 3D diagram of scratch after splicing

过计算划痕宽度均值差获得实际测量宽度值为  $49.2 \mu\text{m}$ , 计算顶部与底部的划痕高度均值差获得实际测量深度值为  $48.9 \text{ nm}$ , 进一步计算系统误差,

得到宽度的相对误差是  $1.6\%$ , 深度的相对误差是  $2.2\%$ , 实验结果说明数字全息显微测量技术检测疵病的准确性。然后进一步对划痕子孔径进行拼接, 实验系统中加入精密电控平移台装置进行扫描, 通过拼接技术提升了系统的成像分辨率和测量准确度。采用并联模式扫描减少了由积累效应导致的测量误差, 但各个子孔径中存在测量误差, 引起整体拼接的误差, 因此需要在拼接顺序及算法上进一步优化。同时, 由于测量系统原器件本身存在误差, 因此可以进一步通过相移数字全息提升成像像质, 或采用空间光调制器及将更多器件加入实验系统, 实现被测件位置参数的精确控制和测量物件的数字化。

## 4 结 论

为测得光学元件表面缺陷更全面的三维信息, 本文采用数字全息显微技术测量了标准划痕的三维形貌, 通过子孔径拼接原理实现标准划痕的全场测试验证, 评价了测量精度。首先通过角谱算法得到划痕的相位二维图像, 然后采用并联模式进行相位拼接, 实现了数字全息显微视场的增大。本文实验以标准划痕板作为被测件, 进行实验验证, 测量误差在  $3\%$  以内, 表明实验方法的准确性, 进一步通过子孔径相位拼接算法实现了划痕的全场成像。本文的检测方法具有非接触测量、快速、全场三维形貌检测等特点, 能够广泛运用在高精度光学元件疵病检测领域中。

## 参 考 文 献

- [1] Gao L L, Fan Y, Chen N N, et al. A quick method of debris detecting and classifying for oversize optical element[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(27): 306-307, 312.  
高玲玲, 范勇, 陈念年, 等. 光学元件表面疵病快速检测分类方法研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(27): 306-307, 312.
- [2] Papadopoulos G Z, Kotsiou V, Gallais A, et al. Wireless medium access control under mobility and bursty traffic assumptions in WSNs [J]. Mobile Networks and Applications, 2015, 20(5): 649-660.
- [3] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Surface imperfections of optical elements: GB/T 1185-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光学零件表面疵病: GB/T 1185-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] Dai M K, Xu D Y. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. Optical Instruments, 1996, 18(3): 33-36.  
戴名奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. 光学仪器, 1996, 18(3): 33-36.
- [5] Zhang X, Yang G G, Cheng S Y, et al. Laser frequency spectrum analysis method and automatic inspection instrument of optical surface imperfection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1994, 15(4): 396-399.  
张晓, 杨国光, 程上彝, 等. 光学表面疵病的激光频谱分析法及其自动检测仪[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(4): 396-399.
- [6] Dai M K, Xu D Y. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. Optical Instruments, 1996, 18(4): 32-39.  
戴名奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状(续)[J]. 光学仪器, 1996, 18(4): 32-39.
- [7] Baker L R. Microscope image comparator[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1984, 31(6): 611-614.
- [8] Baker L R. Inspection of surface flaws by comparator microscopy[J]. Applied Optics, 1988, 27(22): 4620-4625.
- [9] Baker L R. On-machine measurement of roughness, waviness, and flaws[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1333: 248-256.
- [10] Shen W X. Surface defects of the optical elements measured by the coherent filter imaging system[J]. Optical Technique, 2000, 26(4): 361-362, 365.  
沈卫星. 相干滤波成像系统测量光学元件表面疵病[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 361-362, 365.
- [11] Yang Y Y, Lu C H, Liang J, et al. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038.  
杨雨英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.
- [12] Wang K, Liu C L. Detection technology research of spherical optical element surface defect disease[J]. Optical Instruments, 2013, 35(2): 7-10, 14.  
王科, 刘缠牢. 球面光学元件表面疵病检测技术研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(2): 7-10, 14.
- [13] Girnyk V I, Kostyukevych S O, Shepeliavii P Ye, et al. Multilevel computer-generated holograms for reconstructing 3-D images in combined optical-digital security devices [J]. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics, 2002, 5(1): 106-114.
- [14] Wang H Y, Wang G J, Zhao J, et al. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1670-1675.  
王华英, 王广俊, 赵洁, 等. 数字全息显微系统的成像分辨率分析[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1670-1675.
- [15] Ma L H, Wang H, Jin H Z, et al. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0309002.  
马利红, 王辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0309002.
- [16] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [J]. Applied Optics, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [17] Feng Z Y, Jia F, Zhou J H, et al. Three-dimensional surface shape measurement of big objects by image splicing in digital holography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 2017-2021.  
冯忠耀, 贾昉, 周景会, 等. 数字全息中利用图像拼接测量大物体的三维形貌[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2017-2021.
- [18] Yu Y J, Chen G, Dai C X, et al. Application of

- phase stitching technique on digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2975-2979.
- 于瀛洁, 陈刚, 戴翠霞, 等. 相位拼接技术在数字全息中的应用[J]. *光子学报*, 2009, 38(11): 2975-2979.
- [19] Widjaja J. Objective evaluation of images reconstructed from digital in-line Fresnel holograms by using coherent background elimination[J]. *Optik*, 2010, 121(9): 853-859.
- [20] Wang F J, Xiao W, Pan F, et al. Digital holographic detection of surface of optic component [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 79-83.
- 王璠璟, 肖文, 潘锋, 等. 光学元件表面的数字全息检测[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(1): 79-83.
- [21] Verma S, Sarma S S, Dhar R, et al. Scratch enhancement and measurement in periodic and non-periodic optical elements using digital holography[J]. *Optik*, 2015, 126(21): 3283-3287.
- [22] Ganjkhani Y, Charsooghi M A, Akhlaghi E A, et al. Super-resolved Mirau digital holography by structured illumination[J]. *Optics Communications*, 2017, 404: 110-117.
- [23] Trivedi V, Joglekar M, Mahajan S, et al. Digital holographic imaging of refractive index distributions for defect detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 439-446.
- [24] Chen C, Wang H J, Wang D S, et al. Surface defect detection of optical components based on sparse matrix[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0404007.
- 陈晨, 王红军, 王大森, 等. 基于稀疏矩阵的光学元件表面疵病检测[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0404007.