

文章编号 1004-924X(2017)03-0576-08

数字全息术用于光学元件表面缺陷形貌测量

陈 竹, 姜宏振*, 刘 旭, 陈 波

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:利用像面数字全息显微术对光学元件表面缺陷的三维形貌测量进行了理论及实验研究。设计并搭建了相应光路系统记录全息图,采用角谱算法数值重建物光场,通过相位修正消除了系统误差引入的波前畸变,获得了经过待测光学元件表面缺陷调制的物光相位分布,并根据建立的相位分布与表面缺陷面形的关系模型计算得到缺陷三维形貌。实验以多个划痕和麻点等常见表面缺陷作为测量对象,分别获得了它们的三维形貌,以其中一条实际宽度为 $35\ \mu\text{m}$ 、深度为 $270\ \text{nm}$ 的划痕为例,测量得到该划痕的宽度为 $35.21\ \mu\text{m}$,平均深度为 $267.6\ \text{nm}$,与真实值相比,横向测量误差为 0.6% ,纵向测量误差为 0.9% 。实验结果证实该测量方法是有效、可靠的,能够准确测量光学元件表面缺陷的三维形貌,因而有助于判断光学元件损伤程度以及分析缺陷对系统波前的影响,对保障高功率激光装置的安全正常运行有重要意义。

关键词:数字全息显微术;三维形貌测量;光学元件;表面缺陷;相位修正

中图分类号:O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0576

Measurement of surface defects of optical elements using digital holography

CHEN Zhu, JIANG Hong-zhen*, LIU Xu, CHEN Bo

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: jianghz2003@sina.com

Abstract: In order to measure the three-dimensional microstructure of surface defects on optical components, a novel measuring system based on digital image-plane holographic microscopy (DIPHM) was proposed and experimentally designed. The optical path of the system was built to record digital holograms, which comprised phase information of object light. The object light wavefront was reconstructed by the angular spectrum algorithm, and the wavefront distortion attributed to the system errors was eliminated via phase correction. Therefore the phase distribution of the object light modulated by the surface defects was obtained. By deducing the relationship between the object light wavefront and the surface topography, the 3D microstructure of the surface defects was determined. Furthermore, some optics with scratches and pits were measured as samples. For one scratch with width of $35.00\ \mu\text{m}$ and depth of $270.0\ \text{nm}$, the measuring results were as follows: the width is $35.21\ \mu\text{m}$ and the depth of $267.6\ \text{nm}$, thereby the transverse and vertical errors are 0.6% and 0.9% respectively. The results indicate that this measuring method can determine the 3D microstructure of surface defects on optics feasibly and accurately. In addition, it is helpful to judge the damage degree of the optical component and analysis the influence of surface defects, thus of great significance to ensure the laser system security running.

Key words: digital holographic microscopy; three-dimensional microstructure measurement; optical component; surface defects; phase correction

收稿日期:2016-09-20;修订日期:2016-11-17.

基金项目:国家科技重大专项课题(No. 2013XXX)

1 引言

由于加工工艺及运行环境的限制,光学元件多存在诸如划痕、麻点等类型的表面缺陷。在光路系统中,这些缺陷对光束造成不同程度的散射,破坏光场均匀性,降低光束质量^[1-2]。尤其在高功率激光装置中,光束能量相当高,若光束的近场均匀性差,进入终端光学系统后会对光学组件构成极大的损伤风险,危害系统的安全正常运行^[3-4]。因此,需要定量检测元件表面缺陷的形貌结构,以便于准确判断光学元件的损伤程度以及分析缺陷对系统波前的影响。

常见的光学元件表面缺陷具有尺寸小、分布稀疏以及易被破坏的特点,因此要求检测方法具有高分辨率、高效以及无损等特点。现有的检测方法,如暗场成像法^[5-6],虽然满足此要求,但仅能测量缺陷的二维结构,缺乏对纵向深度的检测能力,不能完整构建出缺陷的三维形貌,因此难以准确分析不同形态、不同尺寸的缺陷对光场的影响^[7-8]。常用的三维形貌结构检测仪有原子力显微镜(AFM)^[9-10]以及基于白光干涉法的光学轮廓仪等。AFM具有原子量级的分辨率,但逐点扫描的测量方式降低了其检测效率,而且最大扫描距离仅有数十微米,难以检测出缺陷的完整形貌。白光干涉法^[11-12]具有亚微米量级的横向和纳米量级的纵向分辨率,但是在测量过程中需通过多步机械移相来记录多帧图像,繁琐的操作使其检测效率也较低,不能满足光学元件表面缺陷的快速检测需求。

数字全息术采用数字图像传感器(如 CCD、CMOS 相机)代替传统光学全息中的记录干板,数字记录携带物体信息的物光波与参考光波的干涉条纹,从而记录物光波的复振幅信息,再通过计

$$u_d(x', y') = F^{-1} \{ F[I(x, y) \cdot C(x, y)] \cdot \exp[jkd \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \}, \quad (2)$$

式中: F 和 F^{-1} 分别表示二维正逆傅里叶变换, (f_x, f_y) 为频域坐标。

对数值化的再现像复振幅分布 $u_d(x', y')$ 进行分析,可以分离出其相位信息:

$$\Phi(x', y') = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[u_d(x', y')]}{\text{Re}[u_d(x', y')]} \right\}. \quad (3)$$

计算机数值模拟全息图的衍射再现过程,提取出物场的振幅和相位信息,实现物场的三维重构。数字全息是一种非接触检测方法,不会对光学元件造成损伤;同时它还具有全场测量、检测效率高的优点,所以能够实现光学元件表面缺陷的快速在线检测^[13-15]。

为实现光学元件表面缺陷微结构的三维形貌测量,本文提出了一种基于像面数字全息显微术的测量方法。通过修正相位获得了消除系统误差后重建物光场的相位分布,然后建立相位分布与光学元件表面缺陷面形的关系模型,并计算得到缺陷形貌。

2 光学元件表面缺陷三维形貌的检测原理

2.1 数字全息的记录与再现

设波长为 λ 的物光 $O(x, y)$ 与自同一激光器发出的参考光 $R(x, y)$ 在一套离轴光路中干涉,利用 CCD 记录下干涉条纹,条纹的强度分布为:

$$I(x, y) = |R + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^*, \quad (1)$$

式中:前两项对应全息图衍射场中的 0 级波;后两项分别对应 +1 级和 -1 级波,代表原始物光波的虚像 $O(x, y)$ 和实像 $O^*(x, y)$ 与参考光波的干涉结果。由于采用离轴全息,物参光存在一定夹角,所以全息图经傅里叶变换得到的空间频谱图中,各干涉项的位置相互分离。通过合适的空间滤波提取出所需的 -1 级频谱,进而利用基于角谱衍射理论的重构方法重建物光场。假设再现距离为 d ,使用再现光波 $C(x, y)$ 照射全息图,在传播距离 d 处的衍射光场,即再现物光场的复振幅分布 $u_d(x', y')$ 可表示为:

2.2 像面数字全息显微术的成像分辨率

成像分辨率是数字全息显微系统测量应用中的一个重要参数,这里对预放大和未预放大两类数字全息显微术以及像面数字全息显微术的成像分辨率进行了对比分析。通常预放大数字全息显微系统在被测物体与记录器件之间加入显微物镜

等成像元件,以此记录放大的物光场。其成像分辨率取决于两个因素,一是显微物镜所允许通过的频率成分,即显微物镜的分辨率。它由显微物镜的数值孔径 NA 及照明光波长 λ 决定,而 $NA = \sin \theta$,其中 θ 表示物平面中心对显微物镜张开的半角,由此显微物镜的分辨率为:

$$\Delta \xi = 0.61 \frac{\lambda}{\sin \theta}. \quad (4)$$

二是记录器件的成像分辨率。它表征记录器件所能记录到的物体精细结构,可表示为:

$$\Delta x_0 = \frac{\lambda}{2M} \cdot \sqrt{\left(\frac{2d}{N_x \Delta x}\right)^2 + 1}, \quad (5)$$

式中: M 是显微物镜成像的放大倍率, N_x 和 Δx 分别为记录器件靶面的像素数和单个像素的尺寸,记录距离 d 表示记录器件靶面与系统所成像之间的距离。综上可知,系统的成像分辨率由显微物镜和记录器件两者中成像分辨率较低者决定^[16]。

像面数字全息显微系统在预放大数字全息显微系统上做了优化,它将记录器件置于系统像面上,使得记录距离 $d=0$ 。比较式(4)和式(5),由于 M 远大于 $\sin \theta$,所以记录器件的成像分辨率明显优于显微物镜的分辨率,因此在照明光波长一定的情况下,像面数字全息显微系统的成像分辨率由显微物镜的分辨率 $\Delta \xi$ 给出。

与预放大数字全息显微系统相比,无预放大数字全息显微系统是指在被测物体和记录器件之间没有任何附加的放大成像元件的全息记录系统。由成像理论可知,该系统的成像分辨率由记录系统的数值孔径决定。考虑到记录器件(如 CCD)通常为矩形孔径,无预放大数字全息显微系统的成像分辨率可表示为:

$$\Delta \delta'_x = 0.5 \frac{\lambda}{\sin \theta'}, \quad (6)$$

式中: θ' 表示物平面中心对记录器件靶面的半角。

图 1 比较了像面数字全息显微系统与无预放大数字全息显微系统的数值孔径。图中 d_0 和 d_i 分别表示物距与像距,且 $d_i = M \cdot d_0$, R 和 R' 分别表示显微物镜与记录器件靶面的孔径尺寸。在固定待测物体与记录器件之间距离的情况下,显微物镜的数值孔径 $\sin \theta = 1/\sqrt{1+(d_0/R)^2}$,记录器件的

数值孔径 $\sin \theta' = 1/\sqrt{1+(M \cdot d_0/R')^2}$ 。由于记录器件的靶面尺寸通常仅有数毫米,而放大倍数多在十倍以上,因此显微物镜的数值孔径大于记录器件的数值孔径,也就是说相对于无预放大数字全息显微系统,像面数字全息显微系统所能记录的物体信息更多,提高了再现像分辨率。同时它还克服了一般的预放大数字全息显微系统不能实时观察待测样品、不能完整记录物体边缘信息等缺点^[17]。

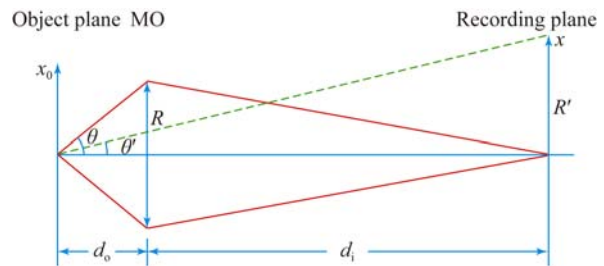


图 1 像面数字全息显微系统与无预放大数字全息显微系统的数值孔径示意图

Fig. 1 Schematic of numerical apertures of digital holographic microscopic systems with image-plane and without pre-magnification

2.3 光学元件表面缺陷三维重建数学模型

为了重建缺陷的三维形貌,还需建立起相位与缺陷形貌的关系模型。考虑到常见的光学元件表面缺陷的宽度在数微米至数百微米的范围内,而深度通常在亚微米量级,因而具有较大的宽深比,可近似认为记录平面接收到的物光场为光线直线通过待测光学元件后的出射光场。基于此假设,一束平面光波经缺陷光学元件调制后的出射波前如图 2 所示,由此可知待测光学元件后表面物光场的相位 $\Phi(x', y')$ 与元件表面缺陷形貌 $Z(x', y')$ 具有对应关系,即:

$$\Phi(x', y') = \frac{2\pi}{\lambda} \int [n(x', y', z') - n_0] Z(x', y') dz', \quad (7)$$

其中: $n(x', y', z')$ 为光学元件折射率, n_0 为空气折射率。通常光学元件的内部折射率可视为均匀分布,即 $n(x', y', z') = n$ 。表面缺陷形貌 $Z(x', y')$ 可表示为:

$$Z(x', y') = \frac{\lambda}{2\pi(n - n_0)} \Phi(x', y'). \quad (8)$$

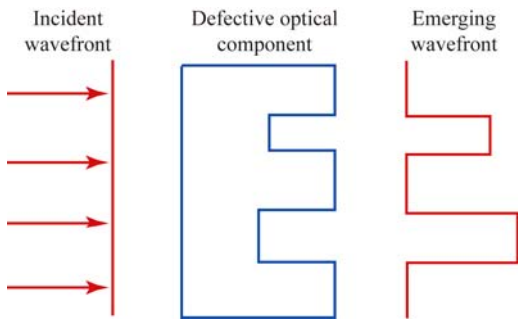


图 2 光学元件表面缺陷对物光调制过程示意图

Fig. 2 Scheme of object light modulated by surface defects

3 实验结果及分析

3.1 实验装置

如图 3 所示,实验使用基于马赫曾德尔干涉仪的透射式离轴数字全息光路系统。波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器发出的线偏振光经过分光棱镜 BS₁ 分为两路激光:一路作为物光,经衰减片 NF₁ 调节光强后进入由显微物镜 MO₁ (10×)、孔径光阑 AS₁、透镜 L₁ 构成的扩束准直系统,调制成为一束扩宽的平面光,再经反射镜 M₁ 反射后,垂直入射到待测光学元件表面。携带了样品信息的透射光通过显微物镜 MO₃ (10×) 后成为球面光;另一支路作为参考光,同样经过强度调节以及扩束准直后,被 10 倍显微物镜 MO₄ 扩展为与物光等曲率半径的球面光,以此补偿物光球面相位因子引入的相位畸变。调节分光棱镜 BS₂ 的角度,使物参光合束之后存在一定夹角,达到频谱分离的目的。最后两路光束经分光棱镜合为一路,在 CCD 靶面发生干涉,CCD 记录下干涉条纹。本实验使用 8 位黑白型 CCD 相机,其分辨率是 1 616 pixel×1 216 pixel,像素尺寸为 4.4 μm×4.4 μm。

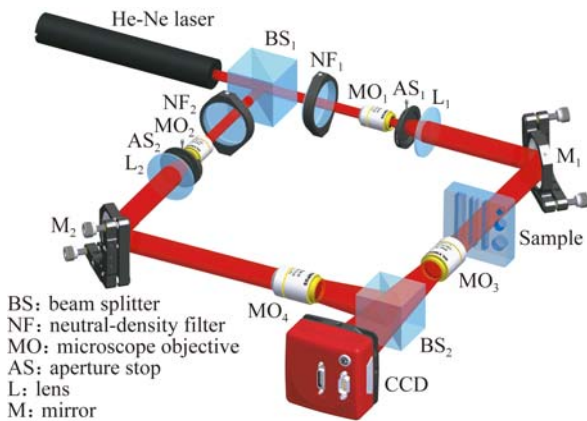


图 3 光学元件表面缺陷形貌测量装置

Fig. 3 Experimental setup for microstructure measurement of surface defects on optical component

3.2 划痕型表面缺陷的三维形貌测量

为检验该方法的测量准确性,本实验采用人工设计的表面疵病标准板^[18]作为样品,测量其表面上各类缺陷的三维形貌。表面疵病标准板选用折射率分布均匀的标准熔石英材料作为基板,应用反应离子束刻蚀法在基板表面加工出具有不同形态、不同尺寸的表面缺陷。这些加工缺陷多为麻点和划痕,横向尺寸在几微米到几十微米之间,纵向尺寸在亚微米量级,包含了常见的光学元件表面缺陷类型。图 4 为划痕和麻点形貌的简略示意图。在波长为 632.8 nm 的光照下,表面疵病标准板的折射率为 1.458 0。

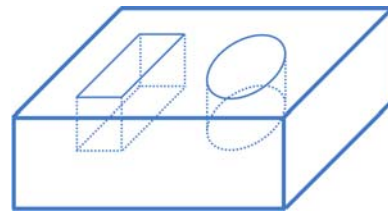


图 4 表面疵病标准板的划痕和麻点三维形貌示意图

Fig. 4 Three-dimensional microstructures of scratches and pits on calibration plate

选取疵病标准板上宽度为 35 μm、深度为 270 nm 的表面划痕作为测量对象。将它置于物光支路中(非空腔状态),物光波受到待测划痕调制后,经显微物镜将划痕清晰成像在 CCD 靶面上,并与参考光波干涉,通过 CCD 记录下含有划痕信息的干涉条纹。图 5(a)为该状态下记录的全息图,图 5(b)是图 5(a)在缺陷位置处的放大图,从中可以看出划痕对干涉条纹的调制。物光场再现方法采用基于衍射角谱理论的角谱重构法,首先对全息图进行傅里叶逆变换,获得空间频谱,然后提取表征物体实像的负一级频谱,进行傅里叶逆变换以数值重建物光场,最后根据式(3)得到物光场的相位分布,如图 5(c)所示。图 5(d)是 5(c)截线处的相位图。从图 5(c)和 5(d)中可以看出,平面光波透过待测疵病标准板后的透射波前具有明显起伏。考虑到疵病标准板的折射率及厚度分布均匀,根据 2.3 节的理论分析可知,其非缺陷处透射波前不应具有明显起伏。产生这一差异的主要因素是组成光路系统的各元件在生产加工中本身带有一定程度的面形误差,因而在光束传播过程中引入了波前畸变。这种由系统带来的误差必然对测量准确性产生影响,为此本实验在未置入待测样品(空腔状态)的情况下对系统的相位误差进行测量,在此条件下拍摄一幅全息图(图 6(a)),用同样的方

法重建物光场的相位分布,即为系统本身引入的相对相位误差,结果如图 6(c)所示,图 6(d)是

6(c)虚线处的相位,直观给出了系统误差对物光波前影响的严重程度。

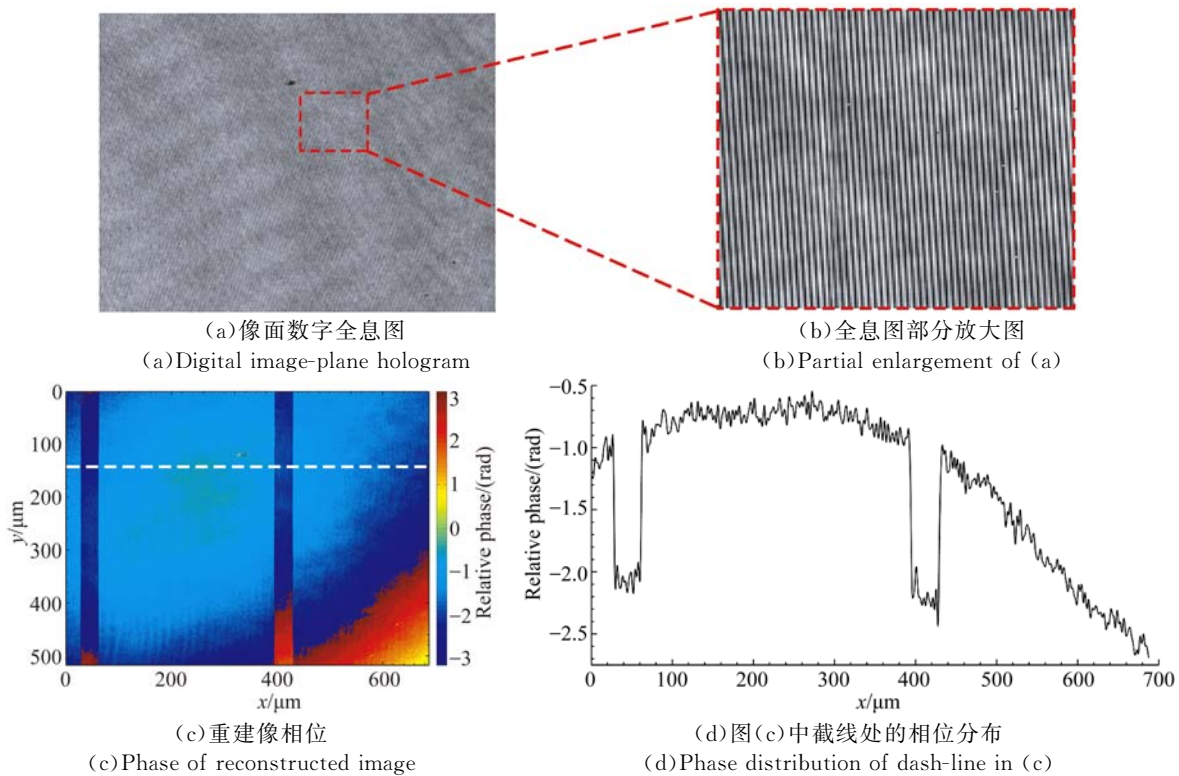


图 5 非空腔条件下物场相位的重建结果
Fig. 5 Reconstruction of object light field with sample in measurement

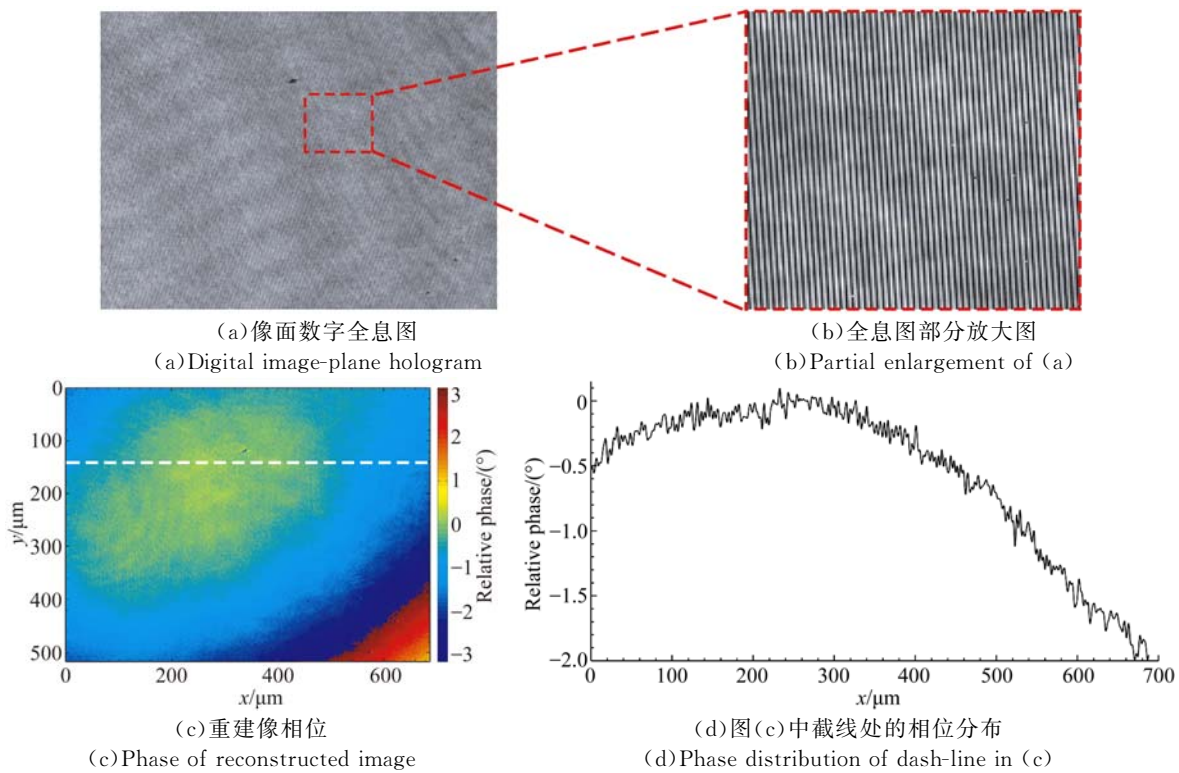


图 6 空腔条件下物场相位的重建结果
Fig. 6 Reconstruction of object light field without sample in measurement

将两种条件下获得的相位进行点除,即可消除系统误差引入的相位畸变,获得仅含有待测缺陷相位调制信息的重建物场相位分布,如图 7(a)所示。比较图 7(b)与图 5(d)可以发现,系统误差得到了有效修正。通过式(8)计算得到光学元件表面各位置的深度分布,如图 7(c)所示。图 7(e)是数值重建的缺陷三维形貌结构,方便直观感受光学元件表面的损伤程度。测量得到划痕宽度为 $35.21 \mu\text{m}$,平均深度为 267.6 nm ,与设计值相比,横向测量误差为 0.6% ,纵向测量误差为 0.9% ,说明该方法具有较高的测量准确性。

3.3 麻点型表面缺陷的三维形貌测量

为了检验本实验方法对各类常见表面缺陷三

维形貌测量的普遍适用性,本文以标称直径为 $45 \mu\text{m}$ 、深度为 270 nm 的麻点型表面缺陷作为测量对象,重建其三维形貌结构。获得麻点的深度及重建结果分别如图 8(a)和 8(c)所示,图 8(b)是麻点中心位置处截线的深度分布。该麻点的测量结果为直径 $45.32 \mu\text{m}$,平均深度 265.9 nm ,横向和纵向的测量误差分别为 0.7% 和 1.5% 。需要说明的是,麻点的重建形貌有微小的锯齿状起伏(见图 8(b)),超过了样品本身的粗糙度,产生这一结果的原因是杂散光导致的噪声频谱混杂于所提取的一级频谱之中。采取合适的频谱滤波算法可以滤除部分噪声,提高测量准确性,将误差控制在 1% 以内。

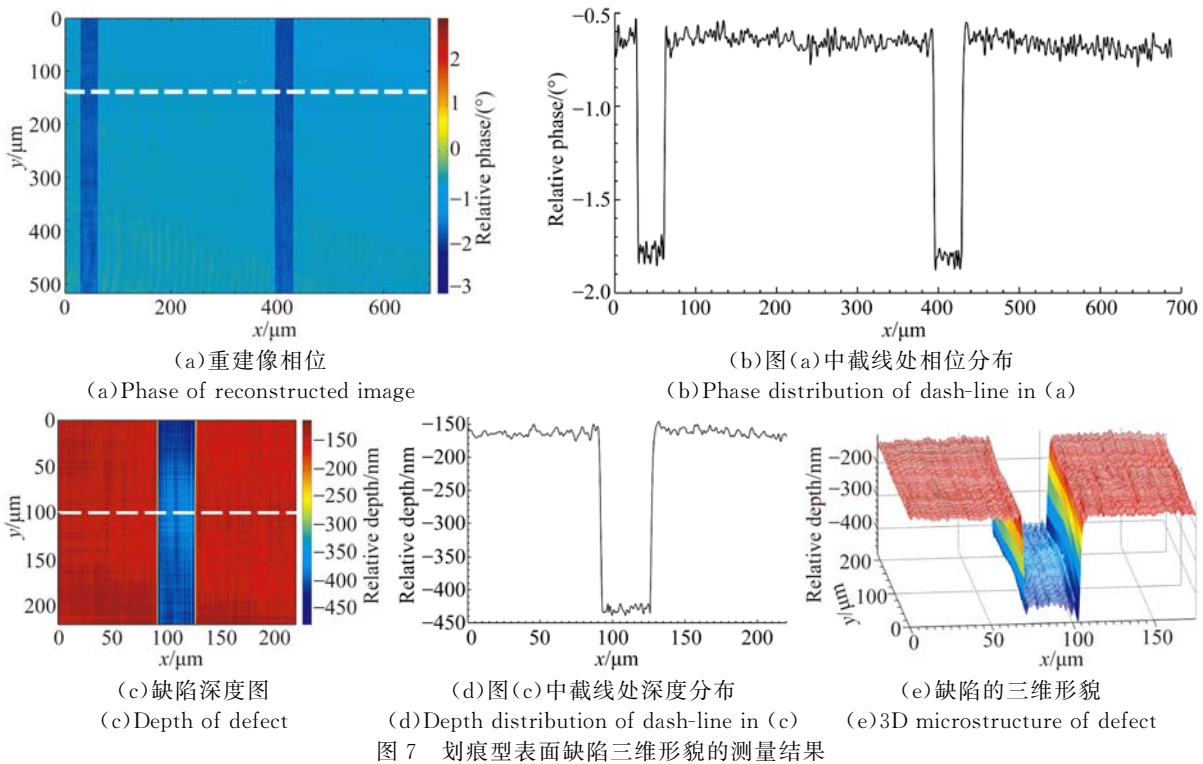


Fig. 7 Measuring results of 3D microstructure of scratch-type defects

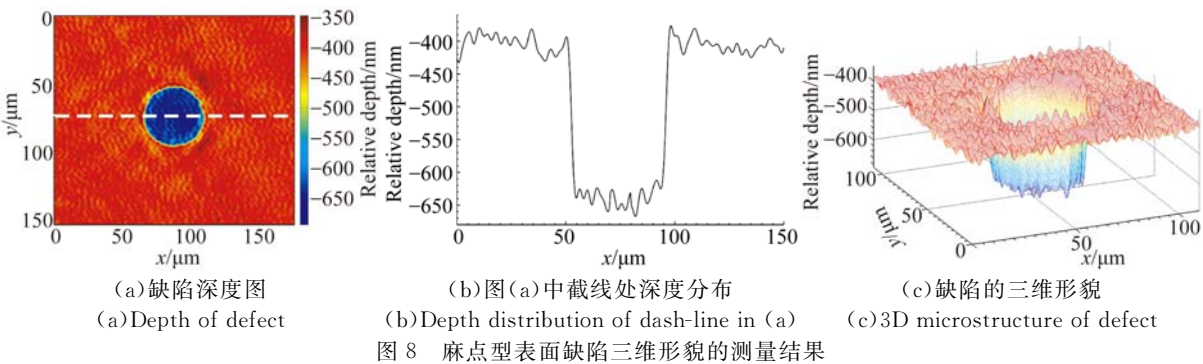


Fig. 8 Measurement of 3D microstructure of pit-type defects

值得注意的是,除了系统误差及杂散光噪声的影响,限制测量准确度的另一个因素是系统的成像分辨率。虽然像面数字全息可以提高系统的成像分辨率;但实际上由于受到成像系统中孔径光阑和视场光阑的限制,物体的部分高频信息依然不能被 CCD 接收到,因此一定程度上限制了成像分辨率的进一步提高,测量准确度也随之受限。对于此问题,结合合成孔径技术,并采用扫描物体的方式,能够减少高频信息的丢失,从而更进一步提高测量准确性。

4 结 论

为获取光学元件表面缺陷的三维形貌,本文

提出了一种基于像面数字全息显微技术的测量方法。利用角谱重建算法再现获得记录待测光学元件表面缺陷信息的光场分布,并依据波前与缺陷面形之间的关系数值构建出缺陷的三维形貌。通过测量空腔状态下的物光场,标定系统误差,修正相位畸变,提高了测量准确性。测量结果表明,该方法的横向和纵向测量误差均能够控制在 1% 以内,测量结果准确有效。相比于目前常用的光学元件表面缺陷检测手段,本方法具有高效无损、操作方便等优点,能够实现光学元件表面缺陷三维形貌的有效测量,满足高功率激光装置中光学元件性能的检测需求。

参考文献:

- [1] FOURNIER J, GRURA P, NÉAUPORT J, *et al.*. Temperature dependence of luminescence for different surface flaws in high purity silica glass [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(1):1-10.
- [2] DEMOS S G, STAGGS M, MINOSHIMA K, *et al.*. Characterization of laser induced damage sites in optical components [J]. *Optics Express*, 2002, 10(25): 1444-1450.
- [3] LIAO Z M, RAYMOND B, GAYLORD J, *et al.*. Damage modeling and statistical analysis of optics damage performance in MJ-class laser systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23):28845-28856.
- [4] 周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴, 等. 光学元件“缺陷”对助推放大级光束质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(3): 326-330.
- [5] ZHOU L D, SU J Q, LIU L Q, *et al.*. Effects on beam quality of booster stage induced by “defects” on optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3): 326-330. (in Chinese)
- [6] CAO P, YANG Y Y, LI C, *et al.*. Alignment methods for micron-scale surface defects automatic evaluation of large-aperture fine optics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 041102.
- [7] 任寰, 姜宏振, 刘旭, 等. 划痕型缺陷对光场质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 092011.
- [8] REN H, JIANG H ZH, LIU X, *et al.*. Influence of scratch defects on quality of beam field [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 092011. (in Chinese)
- [9] 章春来, 王治国, 刘春明, 等. 横向划痕对光场调制的近场模拟[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 084207.
- [10] ZHANG CH L, WANG ZH G, LIU CH M, *et al.*. Near-field modulation of lateral cracks [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 084207. (in Chinese)
- [11] FUKUI K, NAMAI Y, IWASAWA Y. Imaging of surface oxygen atoms and their defect structures on CeO₂ (111) by noncontact atomic force microscopy [J]. *Applied Surface Science*, 2002, 188(3-4): 252-256.
- [12] KITAMURA S, IWATSUKI M. Observation of reconstructed structure on the silicon (111) surface using ultrahigh vacuum noncontact atomic force microscopy [J]. *Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, 2015, 74(1): 129. e1-129. e6.
- [13] DECK L, DE GEOOT P. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(31): 7334-7338.
- [14] 张以谟, 井文才, 张红霞, 等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6): 560-565.
- [15] ZHANG Y M, JING W C, ZHANG H X, *et al.*. Computerized white light scanning interferometer and the application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 560-565. (in Chinese)
- [16] 杨德兴, 许增奇, 姜宏振, 等. 利用数字全息干涉术测量电路板的连续弯曲形变[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1789-1795.

- YANG D X, XU Z Q, JIANG H ZH, *et al.*. Measurement of continuous bending deformation for circuit boards by digital holographic interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1789-1795. (in Chinese)
- [14] 王璠璟, 肖文, 潘锋, 等. 光学元件表面的数字全息在线检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1182-1187.
- WANG F J, XIAO W, PAN F, *et al.*. Digital holographic on-line detection of optic component surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1182-1187. (in Chinese)
- [15] 朱越, 刘文耀, 刘方超, 等. 用数字全息术检测轮胎气泡缺陷[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1099-1104.
- ZHU Y, LIU W Y, LIU F CH, *et al.*. Inspection of air bubble defect in tires by digital holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1099-1104. (in Chinese)
- [16] 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.
- 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. (in Chinese)
- [17] 宋修法, 廖薇, 于梦杰, 等. 像面数字全息显微系统的成像分辨率及成像特点[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(5): 1010-1017.
- SONG X F, LIAO W, YU M J, *et al.*. Resolution and characteristics of an image-plane digital holographic microscopic system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(5): 1010-1017. (in Chinese)
- [18] 刘旭, 任寰, 柴立群, 等. 光学元件表面疵病标准板系统设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s116005.
- LIU X, REN H, CHAI L Q, *et al.*. Calibration plate design for surface defect inspecting system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s116005. (in Chinese)

作者简介:



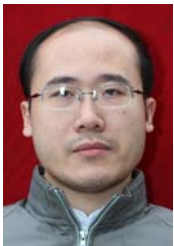
陈竹(1990—),男,四川遂宁人,2014年于电子科技大学获得学士学位,主要从事数字全息术在光学元件检测方面的应用研究。E-mail: chenzhuorg@163.com

导师简介:



陈波(1967—),男,四川绵阳人,学士,研究员,1989年于清华大学获得学士学位,主要从事精密光学检测的研究。E-mail: chenbo518@163.com

通讯作者:



姜宏振(1984—),男,山东淄博人,博士,助理研究员,2012年于西北工业大学获得博士学位,主要从事数字全息及光学检测方面的研究。E-mail: jianghz2003@sina.com