

基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测

王云新^{1,2} 王大勇^{1,2*} 赵洁^{1,2} 李艳^{1,2} 万玉红^{1,2}

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100124
²北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)

摘要 针对微光学元件的三维面形检测,提出了利用数字全息显微(DHM)方法实现全视场、非接触式和非破坏性的快速三维定量相衬成像。首先构建了无透镜傅里叶变换数字全息装置,通过对获取的全息图进行单次快速傅里叶逆变换实现数值再现,然后采用两步相位相减法校正相位畸变,利用最小二乘法获得解包裹相位图,进而给出测试样本的面形信息。实验中,对微透镜阵列进行了形貌检测,得到其口径和浮雕深度分别为 1.595 mm 和 2.424 μm ,这与采用白光干涉仪获得的结果具有较好的一致性,表明无透镜傅里叶变换数字全息显微术应用于微光学元件面形检测是可行和有效的。

关键词 全息术;无透镜傅里叶变换全息;相衬成像;三维成像;微光学元件

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412003

3D Profile Measurement for Micro-Optical Component by Using Digital Holographic Microscopy

Wang Yunxin^{1,2} Wang Dayong^{1,2} Zhao Jie^{1,2} Li Yan^{1,2} Wan Yuhong^{1,2}

(¹College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
²Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Digital holographic microscopy (DHM) is proposed for the three-dimensional (3D) profile measurement of the micro-optical components, which is characterized by its non-invasion, non-contact, high-speed, and full-wave field scheme. Firstly, the configuration of lensless Fourier-transform DHM is designed and built. The complex amplitude of the full-wave field is reconstructed by a single inverse fast Fourier transform only. The phase aberration is corrected by the two-step phase subtraction method, and the unwrapped phase information is extracted by using the least-squares phase-unwrapping algorithm. Then the profile information of the sample can be obtained. In the experiments, the profile of the micro-lens arrays is measured by the proposed configuration, and the results show that the caliber and relief depth are 1.595 mm and 2.424 μm respectively. These are in good agreement with the results given by the white-light interferometer. It demonstrates that the lensless Fourier-transform DHM is feasible and effective for the 3D profile measurement of the micro-optical components.

Key words holography; lensless Fourier-transform holography; phase-contrast imaging; 3D imaging; micro-optical component

OCIS codes 120.6650; 090.1995; 110.3175

1 引言

随着微电子技术和光通信技术的快速发展,微加工工艺和微光学元件得到了广泛应用。在微光学元件使用过程中,其面形误差、表面粗糙度等技术参数将直接影响微纳光学元件以及整个光学成像系统

的性能,因此定量检测微纳元件的三维面形信息成为微光学元件和微纳系统发展中的重要技术问题^[1,2]。对于微表面的高精度检测,机械探针式测量方法是开发较早、研究最充分的一种表面轮廓测量方法,该方法为接触式测量,其空间分辨率受限于

收稿日期: 2010-07-21; **收到修改稿日期**: 2010-12-6

基金项目: 国家自然科学基金(61077004)、北京市教育委员会科技发展计划重点项目、北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ200910005001)、服务北京创新人才、团队建设项目和北京工业大学博士科研启动基金项目资助课题。

作者简介: 王云新(1981—),女,博士,讲师,主要从事光学信息处理和数字显微测量等方面的研究。

E-mail: yxwang@bjut.edu.cn

* **通联系人**。E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

微探针的外形尺寸,并且探针划过被测表面时容易造成损伤。在此基础上发展了光学探针式测量方法,它将聚集光束作为探针,利用干涉原理通过测量光程差来检测表面形貌,然而以探针方式获得的数据为点数据,必须配合高准确度的扫描机构才能达到全域测量的目的^[3,4]。随着微纳元件微型化的日益加剧,为了进一步提高检测精度,近年来学者专家相继提出了激光扫描共聚焦显微术、扫描隧道显微术和原子力显微镜等多种显微成像技术,然而与光学探针法类似,这些显微术均需要精确的扫描装置,导致系统结构十分复杂。扫描隧道显微镜要求样品相对表面比较光滑,并且只适用于样品为导体或半导体的情况,无法检测绝缘体表面的面形特征。虽然原子力显微镜弥补了隧道显微镜的不足,且分辨率可达亚纳米级,但其观测范围一般在 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 量级,不能满足微纳元件的视场需求^[5~7]。

由于光学干涉法具有非接触、精度高和响应速度快等优点,在表面形貌测量领域受到了极大的关注,相继提出了马赫-曾德尔干涉、Mirau 显微干涉和外差干涉^[8~10]等方法,这些方法具有各自的特点和应用环境,但多数系统结构较为复杂。数字全息方法是近年来发展的一种新型全息干涉技术,它利用电荷耦合器件(CCD)代替传统的全息材料记录全息图,并用计算机数值模拟光学的衍射过程,从而再现原始物光场的波前分布,实现了全息的记录、存储、传输和再现全过程的数字化^[11,12],具有全视场、

非接触和无损伤的独特优势,它的出现为微纳元件的三维面形检测提供了一种新方法,是目前最有发展潜力的微纳结构检测方法之一。国外学者已经开展了相关研究,并取得了一定的成果,T. Colomb 等^[13]利用双波长数字全息对微镜这种微电力机械系统(MEMS)元件进行了动态监测,Hao 等^[14]则将预放大数字全息应用到衍射光学元件的形貌检测中,Kemper 等^[15]结合部分相干光源采用相移数字全息对镀金硅片的微纳元件进行了表面形貌测量。与其他记录光路相比,无透镜傅里叶变换数字全息系统能够充分利用 CCD 的有限带宽,且实验装置简单紧凑,便于实用化。为此本文采用无透镜傅里叶变换数字全息方法获取透射式微光学元件的面形分布,利用数值计算方法进行数字全息图再现,并通过相位畸变矫正和相位解包裹等过程获得微光学元件的定量振幅和相位信息,进而依据相位与轴向深度之间的关系得到微光学元件的定量三维面形信息。

2 工作原理

2.1 无透镜傅里叶变换数字全息图的记录和再现

无透镜傅里叶变换数字全息图的记录光路如图 1 所示, x_0-y_0 为待记录物体所在平面, $x-y$ 为全息图平面,即 CCD 所在平面。参考点光源与物体位于同一平面上^[16],其位置坐标为 $\delta(x_r, y_r)$ 。根据菲涅耳衍射公式,在傍轴近似的条件下,忽略常数相位因子,到达 CCD 平面的物光波复振幅分布为

$$U(x, y) = \exp\left[j \frac{k}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} O(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{k}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z_0}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0 = \exp\left[j \frac{k}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \mathcal{F}\left\{O(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{k}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right]\right\}_{f_x = \frac{x}{\lambda z_0}, f_y = \frac{y}{\lambda z_0}}, \quad (1)$$

式中 $O(x_0, y_0)$ 为待记录样品的复振幅分布, z_0 为全息图记录距离, $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换运算。

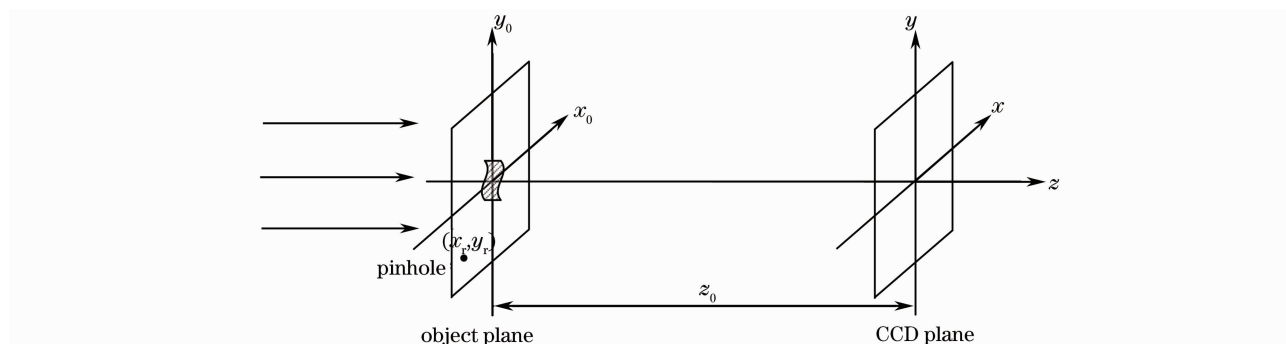


图 1 无透镜傅里叶变换全息图记录示意图

Fig. 1 Schematic of the lensless Fourier-transform hologram recording

参考点光源发出的球面波作为参考光,在 CCD 平面上的光场分布为

$$R(x,y) = \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-\frac{jk}{z_0}(xx_r + yy_r)\right], \quad (2)$$

CCD 采集到的全息图是物光和参考光干涉所形成的光场强度分布:

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

将全息图在计算机中进行数值处理,即可实现全息图的数值再现。由(3)式可知全息图再现结果将包含 3 部分:1)前两项形成的零级像,位于坐标原点;2)和 3)由(3)式的第三和第四项形成的原始像

和共轭像,相对坐标原点对称偏置。合理安排实验条件,可使这三项相互分离。现仅分析产生原始像的项,即(3)式的第三项。由(1),(2)式可得:

$$U(x,y)R^*(x,y) = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda z_0}(xx_r + yy_r)\right] \times \mathcal{F}\left\{O(x_0,y_0)\exp\left[j\frac{k}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right]\right\}_{f_x=\frac{x}{\lambda z_0}, f_y=\frac{y}{\lambda z_0}}. \quad (4)$$

可见,全息图记录到的信息是物体与一个二次相位因子乘积的频谱再乘上一次线性相位因子,其中的一次线性相位因子只引起再现像的平移。因此,无透镜傅里叶变换数字全息的再现过程只需直接对全息图做一次傅里叶逆变换,则再现的复振幅分布为

$$U_3(x',y') = \int\int_{-\infty}^{\infty} U(x,y)R^*(x,y)\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda z_0}(x'x + y'y)\right] dx dy = (\lambda d)^2 O(x' - x_r, y' - y_r) \exp\left\{j\frac{k}{2z_0}[(x' - x_r)^2 + (y' - y_r)^2]\right\}, \quad (5)$$

这里,重建像面的采样间隔 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 分别有如下关系:

$$\begin{cases} \Delta x' = \frac{\lambda z_0}{N\Delta x} \\ \Delta y' = \frac{\lambda z_0}{M\Delta y} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 λ 为照明光波长, (N, M) 和 $(\Delta x, \Delta y)$ 分别为 CCD 在竖直和水平方向的像素数和像素尺寸^[17]。

2.2 全息图处理过程

振幅再现结果是中心在 (x_r, y_r) 的准确原物体分布,但其相位分布存在二次相位畸变。除此之外,还有其他一些可能会引起相位畸变的因素,例如衍射计算傅里叶变换时全息图孔径引入的相位分布、参考光的偏置量引入的线性相位分布、系统中的光污染等。因此,要实现准确的物体三维面形成像,需要对相位畸变予以校正。二次相位畸变与全息图记录距离和参考光的偏置密切相关,校正该相位畸变通常需要精确测量这些参数,但在实验中很难做到精确测量。为此本文采用两步相位相减法来校正上述相位畸变^[18]。保持实验条件不变,去掉物体再记录一幅全息图进行再现, $U'_3(x', y')$ 表示此时再现得到的原始像的复振幅,则

$$U'_3(x',y') = (\lambda d)^2 \exp\left\{j\frac{k}{2z_0}[(x' - x_r)^2 + (y' - y_r)^2]\right\}. \quad (7)$$

由于其振幅再现结果为均匀分布,且其相位与待测样品的相位畸变相同,因此分别得到 $U_3(x', y')$ 和 $U'_3(x', y')$ 的相位后再相减,即可得到去除相位畸变的物光波相位信息。当物体的轴向光学厚度超过一个波长,则对应的相位改变会大于 2π ,由于三角函数算法的周期性,用反正切求得的辐角被限制在 $(0, 2\pi)$ 之间,因此不能得到真实的轴向光学厚度,此时得到的相位分布称为包裹相位图像,需要进行相位解包裹还原出真实的相位分布。本文利用最小二乘法^[19]来获得物体的解包裹相位图像 $\phi(x', y')$ 。当单位振幅平行光垂直入射照明待测物体时,透过光波的相位信息与待测样本的厚度信息 $Z(x', y')$ 的对应关系如下^[14]:

$$Z(x',y') = \frac{\lambda\phi(x',y')}{2\pi(n_1 - n_a)}, \quad (8)$$

式中 n_1 为待测样品的折射率, n_a 为介质折射率,通常该介质为空气($n_a = 1$)。这样,利用(7)式就可以获得物体的三维面形数据。

3 实验研究

3.1 实验装置

构建无透镜傅里叶变换数字全息实验装置,其光路结构如图 2 所示。其中激光器采用 He-Ne 激光器,其波长为 632.8 nm,功率为 60 mW; CCD 的像素数为 4016 pixel × 2672 pixel,像素尺寸为 9 μm × 9 μm。从激光器发出的光由偏振分束镜 PBS 分成两束光波,两束光波均经过扩束滤波系统(BE),其中一束光波通过被测微光学元件作为物光波,物体前方的光阑用来限制照射到物体上的光斑尺寸。另一束光波通过 25× 显微物镜(MO)和 15 μm 的精密针孔产生点光源作为参考光,实验中调节光路使点光源和待测样品到 CCD 平面的距离相同,使物光与参考光共面。对于不同尺度的检测物体,系统要求的共面程度不同,就本文的微光学元件检测而言,根据实验经验共面误差在 1 mm 以内可以获得较理想的结果。此外,半波片(λ/2)与偏振分束镜配合使用,可调节物光和参考光的光强比以提高全息图质量。

3.2 实验结果与对比

利用无透镜傅里叶变换数字全息实验装置对微透镜阵列的面形进行检测,首先采集一张全息图,再

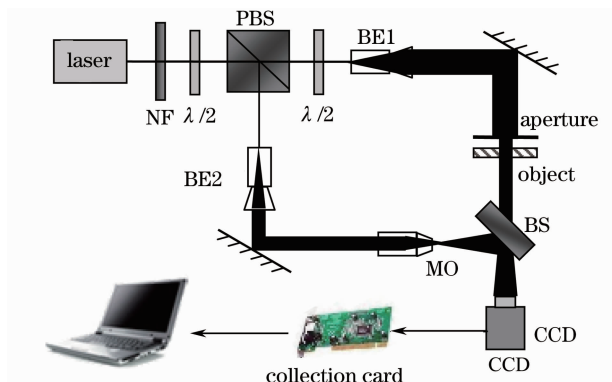


图 2 实验光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical configuration

现后截取取出正一级像,其相位分布如图 3(a)所示;然后去掉微透镜阵列再采集一幅全息图,再现后截取取出正一级像,其相位分布如图 3(b)所示。图 3(a),(b)相减以消除相位畸变,结果如图 3(c)所示。采用最小二乘相位解包裹法处理,获得的解包裹相位像和三维相位分布分别如图 3(d),(e)所示。微透镜阵列的两个关键参数是口径 D 和浮雕深度 H ,它们直接决定了小数值孔径下微透镜的焦距 f 。为了获取这两个参数,分析图 3(d)横截线上的相位信息,其相位分布如图 3(f)所示。实验中,照射到微光学元件上的物光光斑直径约为 2 mm,记录距离约为

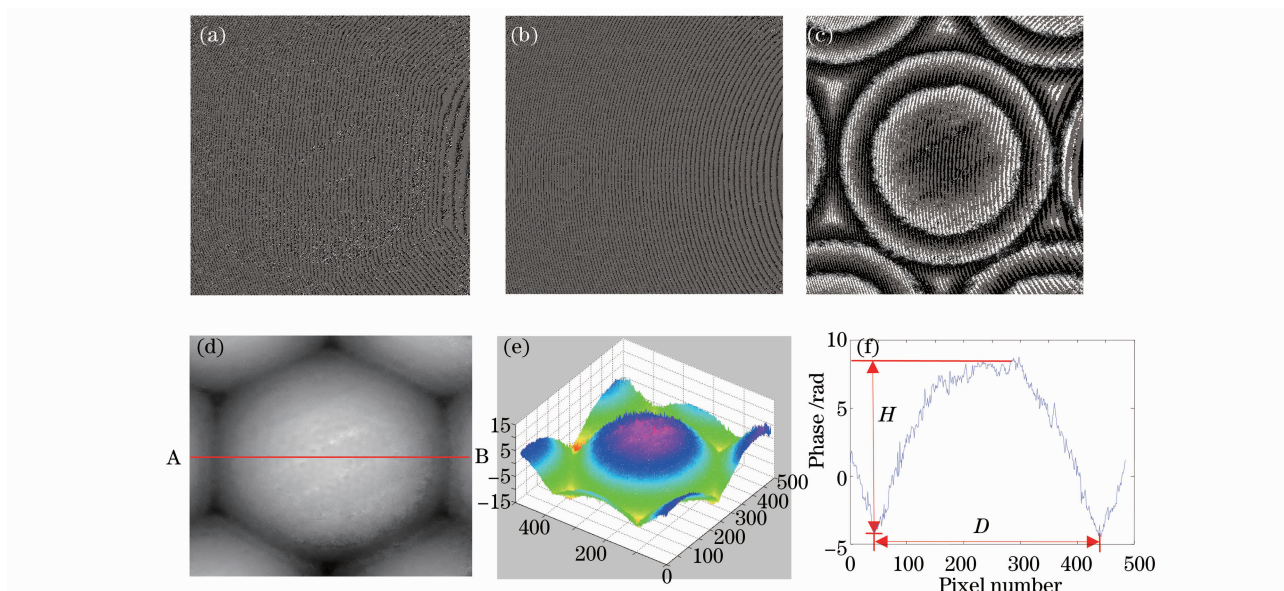


图 3 利用无透镜傅里叶变换数字全息装置检测微透镜阵列的三维面形。(a)样品再现结果的相位像,(b)样品不存在时再现结果的相位像,(c)畸变校正后的包裹相位像,(d)相位解包裹的相位像,(e)三维相位分布,(f),(d)中 AB 横截线上的相位分布

Fig. 3 3D profile measurement result of the micro-lens array using the configuration of lensless Fourier transform digital holography. (a) Phase image of the reconstruction result for the sample, (b) phase image of the reconstruction result without the sample, (c) wrapped phase image after the aberration compensation, (d) unwrapped 2D phase image, (e) unwrapped 3D phase distribution, (f) phase distribution along the line AB in the Fig. 3 (d)

15.5 cm,由(6)式计算可得实验装置获得的重建像面的采样间隔 Δx_i 和 Δy_i 均为 $4.079 \mu\text{m}$,由图 3(f)可知,口径 D 所占像素数为 391,可得 $D = \Delta x' \times 391 = 1.595 \text{ mm}$ 。浮雕深度 H 所占相位宽度为 12.037 rad ,由(7)式可得 $H = 2.424 \mu\text{m}$ 。另外,需要指出,该系统可实现的横向分辨率为^[20]

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\left(\frac{2z_0}{L_{\text{CCD}}}\right)^2 + 1}, \quad (9)$$

式中 L_{CCD} 为 CCD 的幅面尺寸。代入相应参数的值,可得横向分辨率为 $4.09 \mu\text{m}$,该分辨率对于要成像的物体是足够的。

为了验证无透镜傅里叶变换数字全息装置检测

结果的有效性,本文还利用商业化的白光干涉仪对同一个微透镜阵列进行了比对检测,实验结果如图 4 所示。将无透镜傅里叶变换数字全息和白光干涉仪两种方法的检测结果进行对比,结果如表 1 所示,如果以白光干涉仪测量结果为参考基准,无透镜傅里叶变换数字全息装置检测的口径 D 和浮雕深度 H 的误差分别为 1.6% 和 2.7% ,可见两种方法取得了很好的一致性,且无透镜傅里叶变换数字全息为全视场检测,检测时间约为 5 s ,这包括了图像采集和数据数理的时间,而白光干涉仪由于采用扫描方式速度较慢,耗时大约为 3 min 。

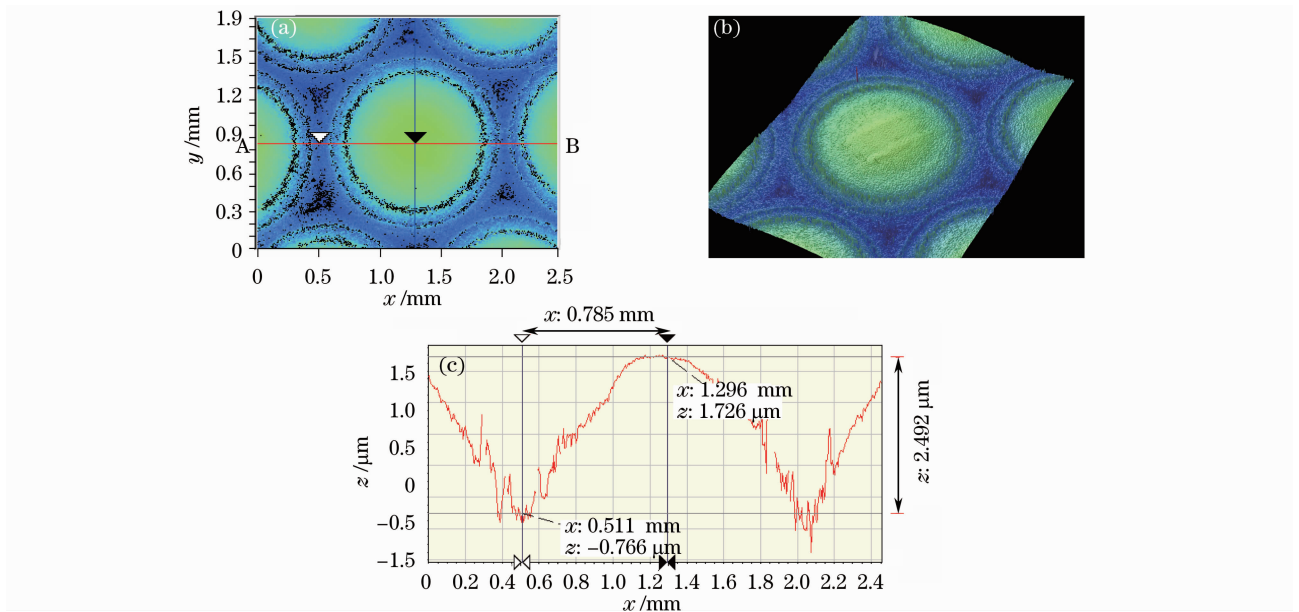


图 4 利用白光干涉仪检测微透镜阵列的三维面形。(a)二维面形,(b)三维面形,(c)(a)中 AB 横截线上的面形分布

Fig. 4 3D profile measurement result of micro-lens array using white-light interferometer. (a) 2D profile image, (b) 3D profile image, (c) profile distribution along the line AB in Fig. 4 (a)

表 1 两种检测方法的实验结果对比

Table 1 Comparison of the experimental results by two methods

Methods	D / mm	$H / \mu\text{m}$
Digital holography	1.595	2.424
White-light interferometer	1.570	2.492

4 结 论

针对微光学元件的三维面形检测,构建了无透镜傅里叶变换数字全息装置,通过对全息图进行单次傅里叶逆变换实现数值再现,利用两步相位相减法校正相位畸变,结合最小二乘法进行相位解包裹,实现了微透镜阵列的三维面形特征检测。同时利用白光干涉仪对微透镜阵列的面形进行了检测和比

对,验证了无透镜傅里叶变换数字全息显微方法的可行性和有效性。综上所述,无透镜傅里叶变换数字全息方法为微光学元件的三维面形检测提供了一种全视场、无损的快速定量检测方法,通过进一步数据精度的分析和多种样品的实验研究,该方法有望用于微纳元件的前期加工、优化和后续的质量评估。

参 考 文 献

- 1 L. Xu, X. Peng, A. Asundi *et al.*. Hybrid holographic microscope for interferometric measurement of microstructures [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(11): 2533~2539
- 2 L. Miccio, A. Finizio, S. Grilli *et al.*. Tunable liquid microlens arrays in electrode-less configuration and their accurate characterization by interference microscopy [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2487~2499
- 3 K. J. Stout, L. Blunt. Nanometres to micrometres: three-dimensional surface measurement in bio-engineering [J]. *Surface*

- and Coatings Technology, 1995, **71**(2): 69~81
- 4 C. Aktouf, B. Pannetier, P. Lemaitre-Auger *et al.*. On-line testing of embedded systems using optical probes: system modeling and probing technology[C]. Proceeding of the Eighth IEEE International On-Line Testing Workshop, 2002: 191
 - 5 S. Yoshida, S. Tanaka, M. Hirata *et al.*. Optical biopsy of GI lesions by reflectance-type laser-scanning confocal microscopy[J]. *Gastrointestinal Endoscopy*, 2007, **66**(1): 144~149
 - 6 L. Jason, A. Robert. Detailed studies of molecular conductance using atomic resolution scanning tunneling microscopy[J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(3): 390~397
 - 7 Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara *et al.*. Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of the electronic local density of states of graphite surfaces near monoatomic step edges[J]. *Phys. Rev.*, 2006, **73**(8): 085421-1~8
 - 8 Gui Min, Kuang Dengfeng, Fang Zhiliang. Measurement of surface topography of transmission phase grating based on phase measure method[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(10): 1337~1341
桂 敏, 匡登峰, 方志良. 基于相位测量法测量透射式相位光栅的表面形貌[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(10): 1337~1341
 - 9 Jiao Guohua, Li Yulin, Hu Baowen. Mirau phase-shifting interferometer for profile measurement of microlenses array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1924~1927
焦国华, 李育林, 胡宝文. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1924~1927
 - 10 Liu Jianping, Liang Liping, Jin Shilong *et al.*. Testing large curvature surface of optical element with spatial carrier heterodyne interferometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 110~113
刘贱平, 梁丽萍, 金世龙 等. 大曲率光学零件面形的空间载频外差干涉术检测[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 110~113
 - 11 T. Colomb, E. Cuche, F. Charrière *et al.*. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 851~863
 - 12 Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei *et al.*. Correction of nonparaxial and misfocus aberrations in digital lensless Fourier transform holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1457~1462
姜宏振, 赵建林, 邸江磊 等. 数字无透镜傅里叶变换全息术中非傍轴及离焦像差的校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1457~1462
 - 13 J. KRhn, T. Colomb, F. Montfort *et al.*. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy for MEMS characterization [C]. *SPIE*, 2007, **6716**: 671608-1~10
 - 14 Y. Hao, A. Asundi. Comparison of digital holographic microscope and confocal microscope methods for characterization of micro-optical diffractive components[C]. *SPIE*, 2008, **7155**: 71550B-1~10
 - 15 B. Kemper, S. Sturwald, C. Remmersmanna *et al.*. Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces[J]. *Opt. & Lasers in Enging.*, 2008, **46**(7): 499~507
 - 16 Yuan Caojin, Zhai Hongchen, Wang Xiaolei *et al.*. Lensless digital holography with short-coherence light source for three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2): 176~179
 - 17 M. M. Hossain, C. Shakher. Temperature measurement in laminar free convective flow using digital olography[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(10): 1869~1877
 - 18 P. Ferraro, S. D. Nicola, A. Finizio *et al.*. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(11): 1938~1946
 - 19 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3323~3327
张亦卓, 王大勇, 赵 洁 等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3323~3327
 - 20 Fan Qi, Zhano Jianlin, Xiang Qiang *et al.*. Methods of improving resolution of digital holographic microscopy [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2): 226~230
范 琦, 赵建林, 向 强 等. 改善数字全息显微术分辨率的几种方法 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(2): 226~230