

基于双波长数字全息术的微光学元件折射率分布及面形测量

邓丽军¹ 杨 勇^{1*} 石炳川¹ 马忠洪¹ 盖 琦² 翟宏琛¹

(¹南开大学现代光学研究所教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

²天津理工大学中环信息学院, 天津 300380

摘要 提出了一种测量微光学元件的折射率分布及面形的方法。该方法基于双波长数字全息术,将微光学元件浸入折射率匹配液降低通过微光学元件的透射光波频率,获取微光学元件在两个不同波长照明光波下的数字全息图,并根据两个波长下的相位分布,计算出微光学元件的折射率分布,利用得到的折射率分布获取微光学元件的面形。理论分析及实验结果证明了所提方法的可行性。

关键词 全息;双波长数字全息术;微光学元件;折射率匹配液;折射率分布;面形

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0312006

Refractive Index Distribution and Surface Profile Measurement of Micro-Optics Based on Dual Wavelength Digital Holography

Deng Lijun¹ Yang Yong¹ Shi Bingchuan¹ Ma Zhonghong¹ Ge Qi² Zhai Hongchen¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology,

Education of Ministry, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China

Abstract A method based on dual wavelength digital holography is proposed to measure the refractive index distribution and surface profile of micro-optics elements. Micro-optics elements are immersed in refractive index matching liquid to reduce the frequency of transmission light. The digital holograms of micro-optics elements are obtained under illumination of two different wavelengths, the refractive index distribution of micro-optics elements can be obtained according to phase distribution under two wavelengths. Surface profile of micro-optics elements can be calculated based on the refractive index distribution. Theoretical analysis and optical experimental results are performed to demonstrate its validity.

Key words holography; dual wavelength digital holography; micro-optical elements; refractive index matching liquid; refractive index distribution; surface profile

OCIS codes 090.1995; 110.6880; 110.0180; 100.3010; 100.5088

1 引言

数字全息术具有非接触、精度高和检测实时性等特点,在生物医学^[1-2]、材料科学^[3-4]、微机电系

统^[5-8]等方面得到了广泛的应用。在利用数字全息术检测透射式微光学元件的面形分布时,必须要预先知道微光学元件的折射率分布才能获取其面形分

收稿日期: 2013-11-12; 收到修改稿日期: 2013-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(61227010)、中央高校基本科研业务费专项资金(NKU65012161)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCYBJC01400)

作者简介: 邓丽军(1985—),男,博士研究生,主要从事数字全息术方面的研究。E-mail: jxlijdeng2008@163.com

导师简介: 翟宏琛(1944—),男,博士,教授,主要从事数字全息、飞秒级超快瞬态过程探测等方面的研究。

E-mail: zhai@nankai.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

布^[9-11]。一般情况下,微光学元件的折射率分布是无法预知的。

双波长数字全息术由于可以在有效波长范围内避免使用单一波长时所面临的相位解包裹问题,而且适用于表面结构起伏变化很大的被测样品的优点,因此得到了广泛的应用^[12-16]。Kühn 等^[10]利用双波长数字全息对微电子机械系统(MEMS)元件的形貌变化进行了测量。王羽佳等^[11-12]对双波长数字全息相位解包裹的方法进行了研究,Min 等^[16]利用彩色光电记录器件并结合角分复用技术,实现了单帧采集双波长数字全息图。

针对上述问题,本文提出了一种基于双波长数字全息术的获取微光学元件折射率分布及面形的方法。通过将微光学元件浸入折射率匹配液中降低透过微光学元件的物光波频率并采用双波长数字全息术,获取微光学元件的折射率分布,进而依据相位分布与面形之间的关系得到微光学元件的定量面形分布。

2 原 理

当单位振幅的平面光波照明被测样品时,透射物光波波前相位分布 $\varphi(x, y)$ 可以表示为^[9]

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_s(x, y) - n_o] z(x, y), \quad (1)$$

式中 $n_s(x, y)$ 为被测样品的折射率分布, n_o 为被测样品所处周围介质的折射率分布,通常为常数, $z(x, y)$ 为被测样品的面形分布, λ 为照明光波的波长。从(1)式可以看出,为获得被测样品的面形分布,必须要预先知道被测样品的折射率分布。

利用双波长数字全息术,获得在两个波长下的透射物光波波前相位分布:

$$\varphi_1(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_1} [n_s(x, y) - n_o] z(x, y), \quad (2)$$

$$\varphi_2(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_2} [n_s(x, y) - n_o] z(x, y), \quad (3)$$

式中 φ_1, φ_2 为两个照明波长下的透射物光波波前相位分布, λ_1, λ_2 为两个照明被测样品的光波波长。结合(2)、(3)式,即可得到被测样品的折射率分布

$$n_s(x, y) = \frac{n_o + n_o \frac{\lambda_1 \varphi_1}{\lambda_2 \varphi_2}}{\frac{\lambda_1 \varphi_1}{\lambda_2 \varphi_2} - 1}. \quad (4)$$

在获取被测样品的折射率分布后,依据(2)式,即可得到被测样品的面形分布为

$$z(x, y) = \frac{\lambda_1 \varphi_1}{2\pi [n_s(x, y) - n_o]}. \quad (5)$$

3 实 验

在图 1 的实验装置中, He-Ne 激光器与激光二极管(LD)发出的光被分束镜(BS₁)分成两束,一束经过扩束、准直后通过显微物镜(MO)后形成参考光波,另一束经过扩束、准直后照射到被测样品后通过 MO 将被测样品放大成像至电荷耦合器件(CCD)感光面上,作为物光波。参考光波与物光波在 CCD 的感光面干涉形成像面全息图。与其他记录光路相比,像面数字全息记录系统能够充分利用 CCD 的空间带宽积,提高数字全息再现像的分辨率^[3,7]。实验中使用的 He-Ne 激光器与 LD 的输出波长分别为 0.6328 μm 与 0.66 μm; 被测样品为正方形口径的微透镜阵列; CCD 的型号为 MINTON-MTV-1881EX, 其像素尺度为 8.3 μm × 8.3 μm, 总像素数为 768 pixel(H) × 576 pixel(V)。

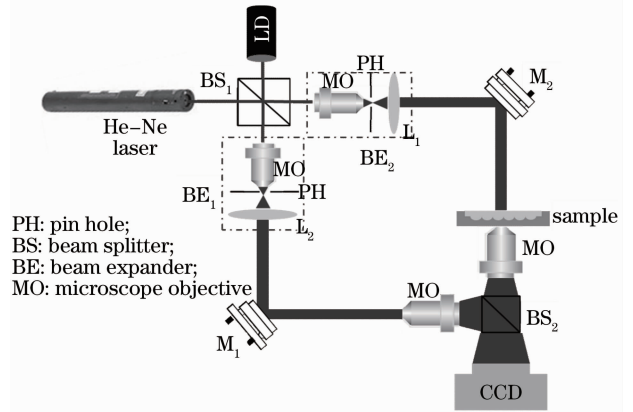


图 1 实验光路图

Fig.1 Experimental set up

实验中获取到的像面数字全息图如图 2 所示。从图中可以看出,由于微透镜阵列的表面面形变化很大,造成干涉条纹过密,以至于超过 CCD 探测器的分辨率而不满足采样定理。物光波的空间频率为

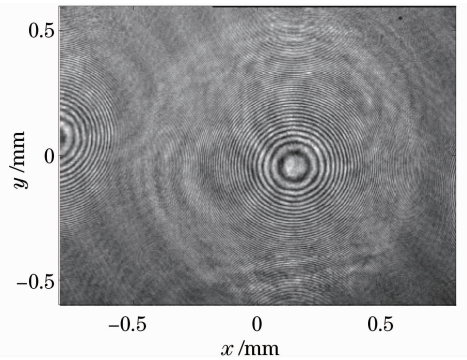


图 2 未使用折射率匹配液的微透镜阵列的像面全息图

Fig.2 Image-plane hologram of micro-lens without refractive index matching liquid

$$(f_x, f_y) = \left(\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right). \quad (6)$$

式中 f_x, f_y 为透射物光波的空间频率在 x, y 上的分量。

结合(1)式和(6)式可以看出,要降低透射物光波的空间频率可以通过改变被测样品所处周围介质的折射率来实现。为此,将微透镜阵列浸入到折射率为 $n_0=1.467$ 的折射率匹配液体中,降低透射物光波的频率。

当微透镜阵列浸入到折射率匹配液后,获取到

的双波长数字全息图如图 3 所示。从图中可以看出,通过采用折射率匹配液的方法,CCD 能够很好地记录下干涉条纹。

对获得的像面数字全息图,采用频谱滤波及参考平面相减的方法^[3,9,17-18],得到在消除相位畸变后,微透镜阵列在双波长下的包裹相位分布,如图 4(a)、(b)所示。采用最小二乘相位解包裹法对图 4(a)、(b)的包裹相位进行解包裹操作,获得微透镜阵列在双波长下的相位分布,如图 4(c)、(d)所示。

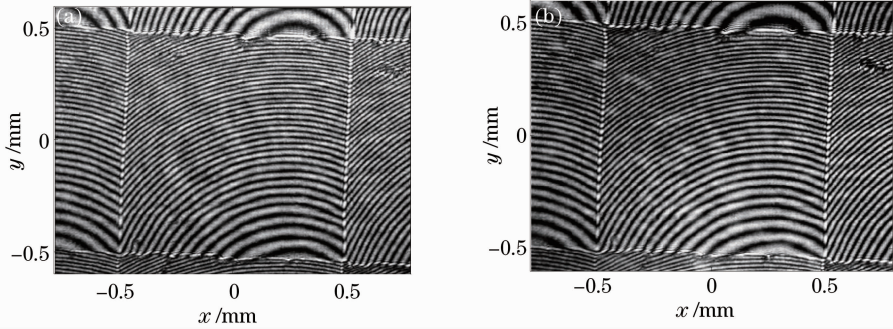


图 3 微透镜阵列的双波长像面数字全息图。(a) $0.6328 \mu\text{m}$; (b) $0.66 \mu\text{m}$

Fig. 3 Image-plane digital holograms of micro-lens array by dual wavelength. (a) $0.6328 \mu\text{m}$; (b) $0.66 \mu\text{m}$

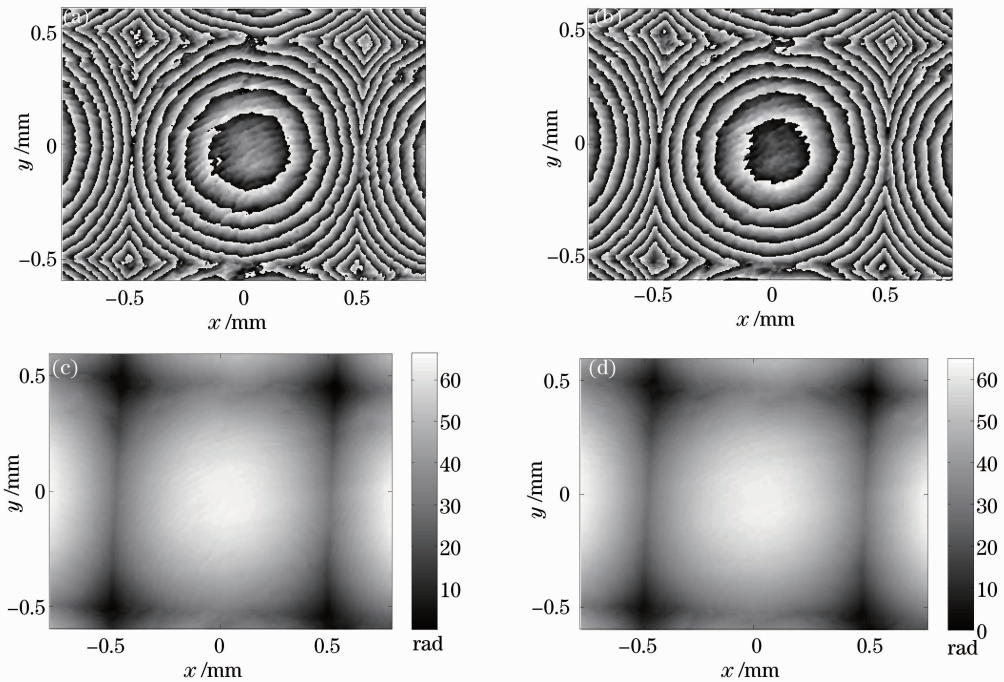


图 4 微透镜阵列的实验结果。(a)波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 与(b) $0.66 \mu\text{m}$ 下的包裹相位图;(c)波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 与(d) $0.66 \mu\text{m}$ 下的相位图

Fig. 4 Experimental results of micro-lens array. (a) Wrapped phase image for $0.6328 \mu\text{m}$ and $0.66 \mu\text{m}$; (c) unwrapped phase image for $0.6328 \mu\text{m}$ and $0.66 \mu\text{m}$

利用微透镜阵列在两个不同波长下的相位分布,结合(5)式,获取微透镜阵列的折射率分布,如图5所示,进而获取微透镜阵列的面形分布如图6所示。从图6(a)、(b)可以看出,微透镜阵列中单个透镜的口径大小为 1.0098 mm,矢高约为 158.7 μm 。

为比较所提方法的有效性,利用 Veeco NT9100 轮廓仪对图6(a)中虚线和实线所指的两个部分进行了对比检测,实验结果分别如图7(a)、(b)所示,可见两种方法取得了很好的一致性。此外,数字全息为全视场检测,而轮廓仪由于采用探针式机械扫描方式对被测样品进行检测,因此速度较慢。

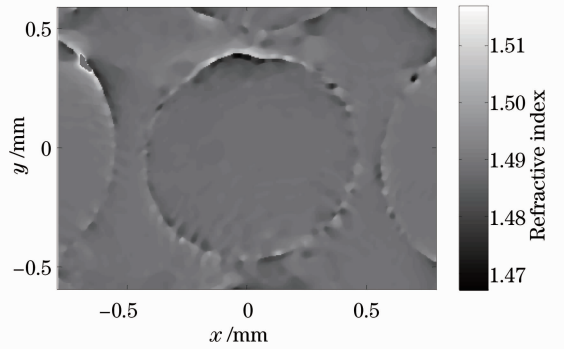


图5 微透镜阵列的折射率分布

Fig. 5 Refractive index distribution of micro-lens array

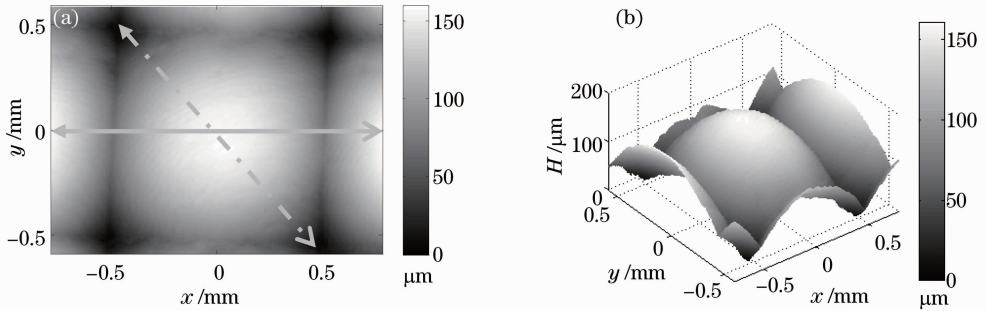


图6 微透镜阵列的面形分布

Fig. 6 Surface profile distribution of micro-lens array

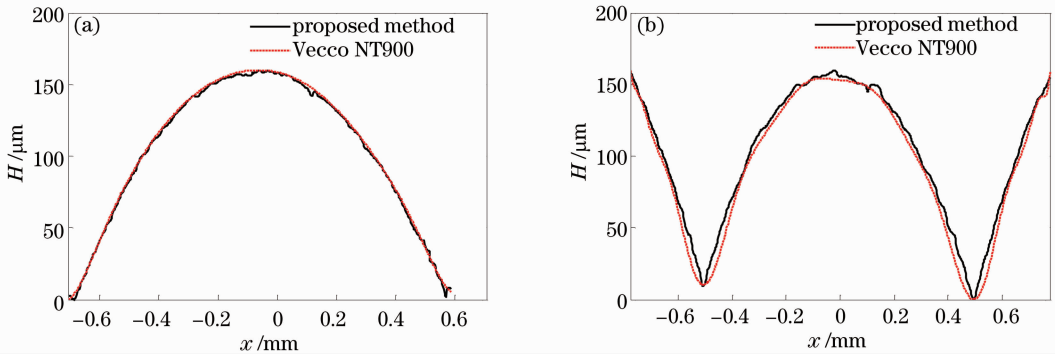


图7 两种检测方法的实验结果对比

Fig. 7 Comparison of experimental results by proposed method and Veeco NT900

4 结 论

为实现对微光学元件的数字全息检测,提出了一种基于双波长数字全息术的获取微光学元件折射率分布和面形的方法。将微光学元件浸入折射率匹配液中降低透过微光学元件的光波频率,获取微光学元件在两个不同波长照明光波下的相位分布并通过数值计算得到微光学元件的折射率分布,依据折射率分布与面形之间的对应关系获取其面形分布。综上所述,双波长数字全息术能够实现微光学元件的快速、无损检测,该方法可以广泛地应用于微光学

元件的加工、检测及质量评估。

参 考 文 献

- 1 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzheng, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy [J]. Chinese J 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.
- 2 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan, *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2906-2911. 赵 洁, 王大勇, 李 艳, 等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2906-

- 2911.
- 3 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 Eng*, 2008, 46(7): 499–507.
 - 4 Hao Yan, Asundi Anand. Comparison of digital holographic microscope and confocal microscope methods for characterization of micro-optical diffractive components[C]. SPIE, 2008, 7155: 71550B.
 - 5 Zhang Yancao, Fan Qi. Effects of non-synchronous sampling on reconstructed image of digital hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1209002.
张延曹, 范琦. 数字全息图的非同步采样对再现像的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1209002.
 - 6 Su Linglong, Ma Lihong, Wang Hui, *et al.*. Three-dimensional refractive index quantitative measurement for optical fiber by digital holographic tomography [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1008002.
苏玲珑, 马利红, 王辉, 等. 基于数字全息显微断层成像的光纤折射率三维定量测量[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008002.
 - 7 Ma Lihong, Wang Hui, Li Yong, *et al.*. Effect of system parameters on the reconstructed image quality in digital holographic microscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 300–307.
马利红, 王辉, 李勇, 等. 数字全息显微系统结构参量对再现像质的影响[J]. *光子学报*, 2011, 40(2): 300–307.
 - 8 Ding Hang, Hu Cuiying, Weng Jiawen, *et al.*. Phase-shifting digital holographic microscopy in reflection configuration [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1209001.
丁航, 胡翠英, 翁嘉文, 等. 相移式反射数字全息显微成像术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1209001.
 - 9 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412003.
王云新, 王大勇, 赵洁, 等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412003.
 - 10 Kühn Jonas, Colomb Tristan, Montfort Frederic, *et al.*. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy for MEMS characterization [C]. SPIE, 2007, 6716: 671608.
 - 11 Wang Yujia, Jiang Zhuqing, Wang Zhe, *et al.*. Three-dimensional imaging for micro-optical component by using dual-wavelength digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s109005.
王羽佳, 江竹青, 王喆, 等. 基于双波长数字全息的微光学元件三维成像方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s109005.
 - 12 Wang Yujia, Jiang Zhuqing, Gao Zhirui, *et al.*. Investigation on phase unwrapping in dual-wavelength digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1009001.
王羽佳, 江竹青, 高志瑞, 等. 双波长数字全息相位解包裹方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1009001.
 - 13 D G Abdelsalam, Magnusson Robert, Kim Daesuk, *et al.*. Single-shot, dual-wavelength digital holography based on polarizing separation [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(19): 3360–3368.
 - 14 P RyleJames, Li Dayan, T Sheridan John, *et al.*. Dual wavelength digital holographic Laplacian reconstruction [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3018–3020.
 - 15 Fu Yu, Pedrini Giancarlo, Hennelly Bryan M, *et al.*. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2009, 47(5): 552–557.
 - 16 Min Junwei, Yao Baoli, Gao Peng, *et al.*. Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(2): 191–196.
 - 17 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(13): 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.
 - 18 Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei, *et al.*. Correction of non-paraxial 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旁轴及离焦像差的校正[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1457–1462.

栏目编辑：何卓铭