

基于双波长数字全息微光学元件三维成像方法

王羽佳^{1,2} 江竹青^{1,2} 王 喆^{1,2} 程国锋^{1,2} 伍江涛^{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 提出了利用双波长数字全息实现对微光学元件刻划凹槽的三维成像。由两个不同波长的激光记录所得到的两幅数字全息图分别通过数值再现得到其对应波长的包裹相位图, 再通过双波长解包裹得到等效波长的相位图, 由该相位图重构出被测物体的三维形貌。通过数值模拟验证了双波长数字全息方法的可行性, 并通过搭建双波长数字全息实验系统, 利用 632.8 nm 和 671 nm 两个波长的激光对微光学元件刻划凹槽进行了三维成像, 得到的刻划凹槽平均深度为 7.1 μm , 其结果与表面轮廓测量仪获得的三维形貌和凹槽深度都具有较好的一致性, 证明了双波长数字全息三维成像结果的有效性。

关键词 全息术; 双波长数字全息; 相衬成像; 三维成像

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s109005

Three-Dimensional Imaging for Micro-Optical Component by Using Dual-Wavelength Digital Holography

Wang Yujia^{1,2} Jiang Zhuqing^{1,2} Wang Zhe^{1,2} Cheng Guofeng^{1,2} Wu Jiangtao^{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 The three-dimensional (3D) profiles of a plate with many micro grooves is obtained by using dual-wavelength digital holography. Two individual phase images are obtained by using two different wavelengths, respectively, and the phase image for beat wavelength is obtained after dual-wavelength phase unwrapping. Then the 3D profiles can be obtained through the phase image of the beat wavelength. This method is demonstrated by both numerical simulation and experiment. In the experiment, two lasers of the different wavelengths 632.8 nm and 671 nm are used to obtain a larger beat wavelength. The object is a plate with many micro grooves. The result shows that the average depth of the groove is 7.1 μm . This is in good agreement with the result given by the profilometer. It demonstrates that the 3D imaging result by using dual-wavelength digital holography is effective.

Key words holography; dual-wavelength digital holography; phase-contrast imaging; 3D imaging

OCIS codes 090.1995; 110.1650; 110.3175

1 引 言

随着精细加工技术等方向的发展, 物体的三维形貌测量与成像越来越受到人们的关注。数字全息术以 CCD 为记录介质, 记录数字化的全息图, 通过计算机数值模拟光学的衍射过程实现物光波再现, 再结合图像处理技术消除像差、噪声等因素的影响

以提取高质量的相位图, 从而实现对物体的三维成像^[1~3]。由于计算获取的相位分布都折叠在 $(-\pi, +\pi]$ 之间, 成为包裹相位图, 因此必须通过相位解包裹的方法恢复到真实相位值。然而当前的数值解包裹算法都存在一定的问题, 很难实现对结构复杂或表面梯度很大的物体的测量。双波长数字全息的

收稿日期: 2011-08-02; **收到修改稿日期**: 2011-08-25

基金项目: 北京市教委科研计划项目(KM200910005033 和 KZ200910005001)资助课题。

作者简介: 王羽佳(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: wangyujia@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 江竹青(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事光信息处理方面的研究。

E-mail: zhuqiang@bjut.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040130140M)

核心是双波长解包裹,其方法是用两个不同波长的激光进行记录,分别计算得到每个波长对应的相位图,再求得两者的相位差即得到等效波长的相位图^[4]。此方法得到的是真实的相位分布,从而避免了数值解包裹算法引入的误差。而且对于结构复杂或表面梯度很大的物体,双波长解包裹依然能够得到精确的相位分布^[5]。双波长数字全息可以实现对物体的表面形貌或形变以及纯相位型物体的结构和折射率分布的精确测量,并得到逼真的三维图像。在物体形貌测量和形变分析、生物医学检测、三维动态测量等领域具有广阔的应用前景^[6~10]。

2 工作原理

2.1 数字全息图的记录和再现

离轴菲涅耳全息图的记录如图 1 所示, xy 为物平面, $\xi\eta$ 为全息图平面,坐标原点分别位于物平面中心和 CCD 平面中心,记录距离为 d 。设 CCD 参数为:像元尺寸 $\Delta\xi, \Delta\eta$, 像元数 N_x, N_y 。

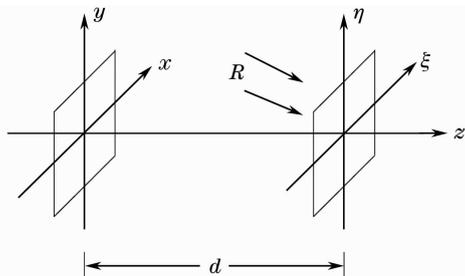


图 1 离轴全息的记录示意图

Fig. 1 Schematic for recording off-axis hologram

根据菲涅耳衍射公式,在近轴近似的条件下,忽略常数相位因子,到达 CCD 平面的物光场分布为

$$U(\xi, \eta) = \iint_{\infty} O(x, y) \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]\right\} dx dy, \quad (1)$$

式中 $O(x, y)$ 为原物光波场分布。全息图平面上干涉光强分布为

$$I(\xi, \eta) = |U + R|^2 = |U|^2 + |R|^2 + RU^* + R^*U, \quad (2)$$

式中 $R(x, y)$ 为参考光波场分布。

根据角谱理论,在离全息图平面距离为 z_i 的像平面 $x_i y_i$ 上再现光场频谱为

$$G(f_x, f_y) = G_0(f_x, f_y) \cdot G_B(f_x, f_y), \quad (3)$$

由此可得再现光场复振幅分布为

$$U_i(x_i, y_i) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[C \cdot I] \cdot G_B\}. \quad (4)$$

2.2 双波长相位解包裹理论分析

由于数字全息图再现的复振幅光场中解调相位

信息是通过计算反正切函数得到的,故所得的相位分布都折叠在 $(-\pi, +\pi]$ 之间,而实际往往超过了此范围,从包裹相位恢复实际相位的过程称为相位解包裹。由此可见,相位解包裹是实现数字全息三维重构中的一个重要环节。为了克服数值解包裹算法对结构复杂或表面梯度很大的物体失效缺点,可以用大于物体深度的波长来记录全息图,直接获得展开的相位。但由于实际情况中没有如此波长的激光器,故可用双波长数字全息术^[11~13]。

双波长解包裹方法是用两个不同波长的激光 λ_1 和 λ_2 进行记录,分别计算得到每个波长对应的相位图。设 h 为相对光程,对于 λ_1 记录的全息图,通过数值再现得到的相位分布 φ_1 可以表示为

$$\varphi_1 = \frac{2\pi h}{\lambda_1}, \quad (5)$$

对于 λ_2 记录的全息图,通过数值再现得到的相位分布 φ_2 可以表示为

$$\varphi_2 = \frac{2\pi h}{\lambda_2}, \quad (6)$$

求得两者的相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi h \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{2\pi h}{\Lambda}, \quad (7)$$

式中 $\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 。

求得的相位差即相当于用等效波长 Λ 获取的相位。因此只要选取合适的 λ_1 和 λ_2 ,通过双波长解包裹就能得到展开的正确相位^[13~16]。

2.3 双波长数字全息数值模拟

下面的数值模拟采用的两个波长分别是 500 nm 和 550 nm,可以计算得到其等效波长为 $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| = 5.5 \mu\text{m}$ 。模拟的物体是透明四级阶梯,4 个阶梯的高度分别为 0.145, 0.290, 0.435 和 0.580 μm ,并假设其折射率为 2。模拟结果如图 2 所示,其中图 2(a) 是 500 nm 波长再现得到的包裹相位图,图 2(b) 是 550 nm 波长再现得到的包裹相位图,两包裹相位图相减并补偿 2π 得到等效波长的相位图见图 2(c)。最后由等效波长的相位图根据(8)式重构出的三维形貌图见图 2(g),

$$H = \frac{\varphi\Lambda}{2\pi n}. \quad (8)$$

其中图 2(d) 是采用最小二乘法对 500 nm 波长再现得到的包裹相位图进行数值解包裹的结果,图 2(e) 是图 2(c) 的三维立体显示,图 2(f) 是图 2(d) 的三维立体显示。由模拟结果可以看出双波长解包裹可以精确恢复出真实的相位值,并且能够由此重构出物

体形貌分布,而数值解包裹算法对于此物体则完全失效。由此可见,双波长数字全息是一种有效的三

维成像方法,而且对结构复杂或表面梯度很大的物体依然有效。

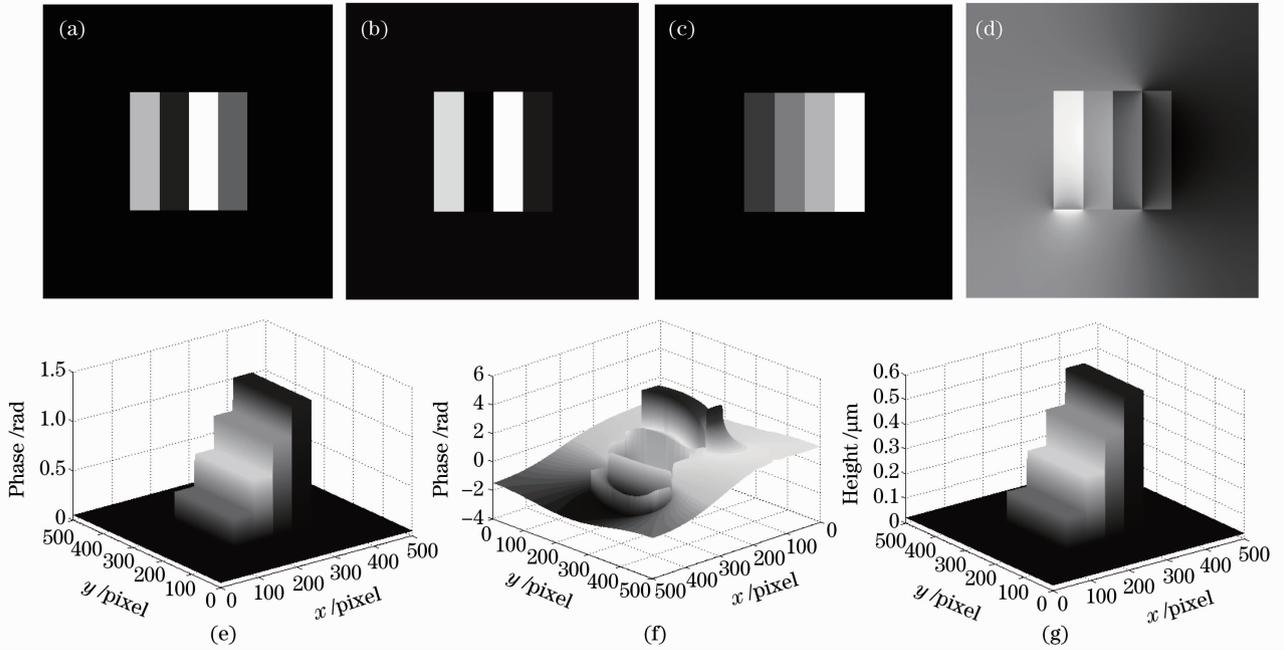


图2 双波长数字全息数值模拟。(a) 500 nm 波长得到的相位图;(b) 550 nm 波长得到的相位图;(c)等效波长的相位图;(d)数值解包裹后的相位图;(e)等效波长的相位立体图;(f)数值解包裹后的相位立体图;(g)模拟物体的三维重构图
Fig.2 Simulation of dual-wavelength digital holography. (a) Phase image for $\lambda_1 = 500$ nm; (b) phase image for $\lambda_2 = 550$ nm; (c) phase image for beat wavelength; (d) unwrapped phase image after using numerical unwrapping method; (e) 3D distribution of the phase image for beat wavelength; (f) 3D distribution of the phase image after using numerical unwrapping method; (g) 3D reconstruction profile of the object

3 实验研究

3.1 实验装置

实验中采用透射式离轴数字全息系统,两个用于记录的激光器波长分别为 632.8 nm 和 671 nm,计算得到其等效波长为 $11.12 \mu\text{m}$ 。所用 CCD 的分辨率为 $1316 \text{ pixel} \times 1035 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ 。实验装置示意图如图 3 所示。

激光器发出的激光经偏振分束棱镜(PBS)分为两束光,分别经过扩束准直系统(BE)后成为平面光,其中一束通过被测物体成为物光,另一束作为参考光。之后两束光经非偏振分束棱镜(BS)后成一个较小的角度在 CCD 靶面干涉并被记录。第一个半波片($\lambda/2$)的作用是配合偏振分束棱镜调节物光和参考光的光强比,第二个半波片是调节物光的偏振方向以保证两束光能够干涉。对于此实验系统,所需要的两幅数字全息图须分两次进行记录。

3.2 实验结果与对比

利用上述装置对一个微光学元件进行了三维成像,该元件是在聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA)板上密

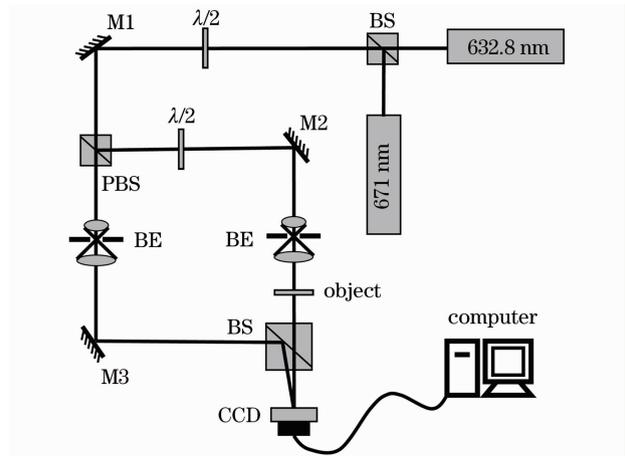


图3 双波长数字全息三维成像装置示意图
Fig.3 Dual-wavelength digital holography setup

集刻划的凹槽,材料的折射率 $n=1.5$ 。已知凹槽的深度要远远大于两个记录的波长,所以由单个波长恢复的相位必然是包裹相位。对于透射式双波长数字全息,只要最大光程(折射率与厚度的乘积)小于所用两个波长的等效波长,既可以得到没有包裹的相位图^[16~20],又由于物体的相位和厚度仅存在一个

比例差,所以相位分布反映的就是物体的形貌信息,从而重构出物体的三维形貌^[11]。

在得到两个波长分别记录的全息图后,采用角谱再现算法,由(4)式分别计算得到其复振幅分布,再提取出两幅包裹相位图如图4(a)和(b)所示,经双波长解包裹后得到等效波长的相位图如图4(c)所示,最后根据(8)式重构出的凹槽三维形貌如

图4(d)所示,可以得到凹槽的平均深度为 $7.1\ \mu\text{m}$ 。

为了验证双波长数字全息所得结果的有效性,本文还利用商业化的表面轮廓测量仪对同一个微光学元件进行了比对检测,得到凹槽的平均深度为 $7.4\ \mu\text{m}$,实验结果如图5所示。可见两种方法在三维形貌和凹槽深度上都取得了较好的一致性,证明了双波长数字全息三维成像结果的有效性。

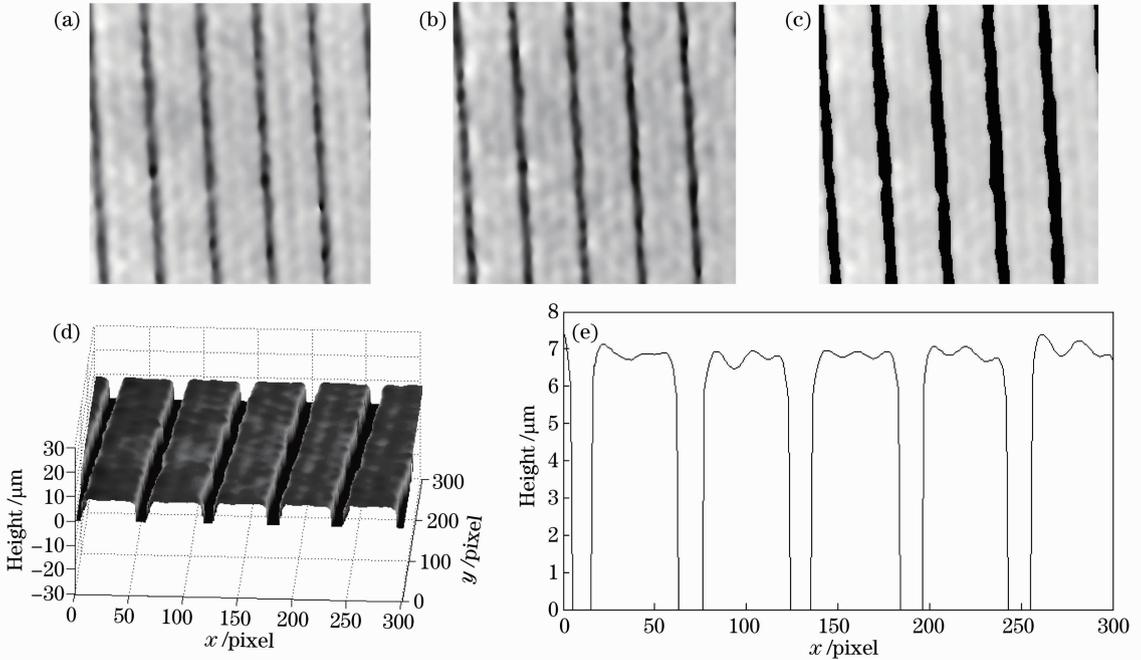


图4 双波长数字全息实验结果。(a) 632.8 nm 波长得到的相位图;(b) 671 nm 波长得到的相位图;(c) 等效波长的相位图;(d) 微光学元件的三维重构图;(e) 微光学元件三维重构图的剖面图

Fig. 4 Experimental results of dual-wavelength digital holography. (a) Phase image for $\lambda_1 = 632.8\ \text{nm}$; (b) phase image for $\lambda_2 = 671\ \text{nm}$; (c) phase image for beat wavelength; (d) 3D reconstruction profile of the micro-optical component; (e) the cross-sectional view of the 3D reconstruction profile

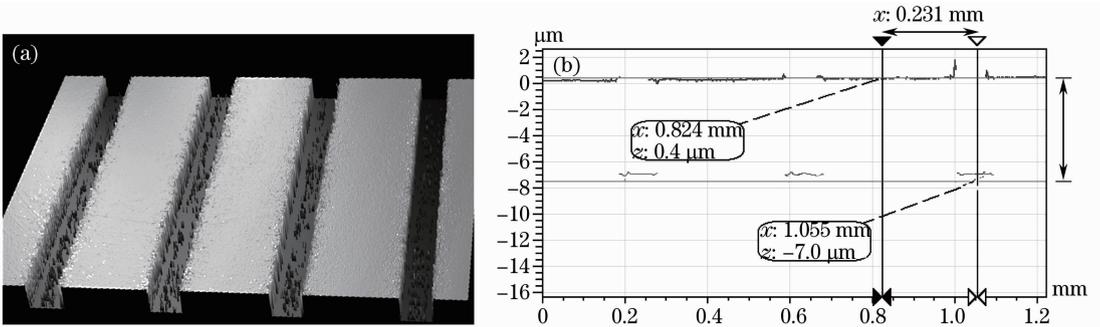


图5 表面轮廓测量仪检测结果。(a) 微光学元件的三维形貌图;(b) 微光学元件三维形貌图的剖面图

Fig. 5 Measurement results using the profilometer. (a) 3D profile of the micro-optical component; (b) the cross-sectional view of the 3D profile

4 结 论

数值模拟结果显示双波长数字全息得到的相位图消除了包裹相位,能够精确地反映出物体的三维

形貌,避免了数值解包裹算法引入的误差。同时对双波长数字全息和表面轮廓测量仪对微光学元件刻划凹槽的三维成像结果,表明了双波长数字全息

三维成像的可行性和成像结果的有效性。由此可见,双波长数字全息三维成像方法在微光学元件检测领域具有广阔的应用前景,是一种快速高效的三维成像方法。

参 考 文 献

- 1 T. Colomb, S. Krivec, H. Hutter *et al.*. Digital holographic reflectometry[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3719~3731
- 2 P. K. Upputuri, N. K. Mohan, M. P. Kothiyal. Measurement of discontinuous surfaces using multiple-wavelength interferometry[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(7): 073603
- 3 K. M. Hagen, R. Schodel, F. Pollinger *et al.*. Multi-wavelength interferometry for length measurements using diode lasers[J]. *Meas. Sci. Rev.*, 2009, **9**(1): 16~26
- 4 A. Khmaladze, M. Kim, C. Min Lo, Phase imaging of cells by simultaneous dual-wavelength reflection digital holography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 10900~10911
- 5 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 465~470
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭 等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 465~470
- 6 J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7231~7242
- 7 T. Hansel, R. Grunwald, K. Reimann *et al.*. Deformation measurements of high-speed MEMS with combined two-wavelength single-pulse digital holography and single phase reconstruction using subpicosecond pulses [J]. *Quantum Electron.*, **15**(5): 1351~1358
- 8 J. Gass, A. Dakoff, M. K. Kim. Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1141~1143
- 9 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
- 10 A. Asundi, W. Zhou. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(23): 5416~5420
- 11 S. Shin, Younghun Yu, Three-dimensional information and refractive index measurement using a dual-wavelength digital holographic microscope[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, **13**(2): 173~177
- 12 J. C. Wyant. Testing aspherics using two-wavelength holography[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(9): 2113~2118
- 13 K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(9): 1755~1762
- 14 Y. Takaki, H. Kawai, H. Ohzu. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(23): 5416~5420
- 15 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
- 16 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
- 17 P. Ferraro, L. Miccio, S. Grilli *et al.*. Quantitative phase microscopy of microstructures with extended measurement range and correction of chromatic aberrations by multiwavelength digital holography[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14591~14600
- 18 H. Cho, D. Kim, Y. Yu *et al.*. Tilt aberration compensation using interference patterns in digital holography[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, **13**(4): 451~455
- 19 S. De Nicola, A. Finizio, G. Pierattini *et al.*. Recovering correct phase information in multiwavelength digital holographic microscopy by compensation for chromatic aberrations[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2706~2708
- 20 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