

双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌

曾雅楠 汪 飞 雷 海 胡晓东 胡小唐

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 为了扩大传统双波长数字全息显微技术在实时微结构表面形貌测试中的有效测量视场,提高实时响应速度并降低噪声,将传统双波长数字全息术和数字显微像面全息术相结合,提出了一种双波长数字显微像面全息方法。该方法在记录像面全息图后,无需进行衍射重构,直接在全息面提取相位和强度信息达到测量样本形貌的目的。基于该方法对微米级高度的台阶结构进行三维形貌测试,同时对比了传统双波长数字全息显微系统和机械探针轮廓仪的微台阶测试结果。从三者的对比分析中可知,双波长数字显微像面全息的这种测试技术是有效可行的,且具有单曝光、全视场,响应速度快以及噪声较低的特点,对于阶跃高度达到微米级的微器件形貌测试尤为适用。

关键词 全息; 双波长数字全息; 数字显微像面全息; 形貌测量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1009001

Surface Profile Measurement of Microstructures Based on Dual-Wavelength Digital Microscopic Image-Plane Holography

Zeng Yanan Wang Fei Lei Hai Hu Xiaodong Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract To enlarge the effective field of view, speed up the response time and reduce the noise of the real-time surface profile measurement of microstructures by traditional dual-wavelength digital holographic microscopy, a technique named dual-wavelength digital microscopic image-plane holography is developed. It is a combination of digital microscopic image-plane holography and the traditional dual-wavelength digital holographic microscopy. The phase and amplitude can be directly extracted from the hologram plane to yield the surface profile of microstructure without calculation of the diffraction after recording the image-plane hologram. A microstep with several micrometers in height is tested by the dual-wavelength digital image-plane holographic microscope, the traditional digital holographic microscope and the stylus profilometer. As can be seen from the comparison of the testing results, the dual-wavelength digital microscopic image-plane holography is feasible with the characteristics of single-exposure, completely full-field, short response time and low noises. It is especially suitable for the real-time surface profile measurement of microstructures with step height in the micrometer range.

Key words holography; dual-wavelength digital holography; digital microscopic image-plane holography; profile measurement

OCIS codes 090.1995; 090.2880; 090.5694; 180.3170

1 引 言

数字全息显微技术是数字全息技术和光学显微技术的综合,具有非接触、高分辨率等优点,不仅横向分辨率可达到微米/亚微米量级,而且纵向测量分辨率能够达到亚纳米量级,完全满足微结构表面形

貌测量的要求。然而由于再现技术受到相位解调的限制^[1],所以采用单一波长光源的反射式数字全息显微系统对于高度阶跃变化的结构存在突变高度与波长大小相关的测量限制。为了突破该测量限制条件,一般采用双波长或多波长数字全息显微技术^[2]。

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(51075297, 61223008)

作者简介: 曾雅楠(1988—),女,博士研究生,主要从事数字全息显微方面的研究。E-mail: ynzeng@tju.edu.cn

导师简介: 胡晓东(1974—),男,博士,教授,主要从事微纳检测方面的研究。E-mail: xdhu@tju.edu.cn(通信联系人)

双波长数字全息^[3]是用两个不同波长的激光进行测量记录,分别计算得到每个波长对应的相位图,再计算两者的相位差从而得到等效波长的相位图。由于等效波长较大,因此可以满足微结构突变高度较大时的准确测量,在微结构形貌检测^[4]、生物细胞形貌测量^[5-6]、折射率检测^[7]、微机电系统(MEMS)器件动态测试^[8]以及振动测试^[9-10]等领域得到广泛的应用。

但是数字全息显微术固有的问题诸如全息面边缘衍射导致的重构强度与相位的误差^[11-12],重构算法中多次傅里叶变换较为耗时^[13],衍射计算容易引入噪声^[14]等并没有得到很好的解决。

数字显微像面全息术^[15]能够在重构距离为零的成像面即 CCD 记录的全息面提取相位及强度信息,达到测量目的。本文将双波长数字全息显微技术与数字显微像面全息术相结合,提出一种双波长数字显微像面全息的测量方法。搭建了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的离轴反射式实验系统,对微米级高度的台阶结构进行单曝光实时形貌测试,并通过与传统数字全息显微系统和机械探针轮廓仪的测试结果进行对比,证明本测量方法是有效可行的。

2 工作原理

双波长数字全息图是由两束不同波长 λ_1, λ_2 的物光 O_1, O_2 和参考光 R_1, R_2 分别进行干涉,在全息面即 CCD 面上形成的干涉图。CCD 上记录的全息干涉图样可以表示为

$$I_H(x, y) = |R_1|^2 + |O_1|^2 + |R_2|^2 + |O_2|^2 + R_1 O_1^* + R_1^* O_1 + R_2 O_2^* + R_2^* O_2, \quad (1)$$

式中 I_H 为全息图的强度, x, y 为全息面的坐标, $*$ 表示复共轭。其中前四项是零级衍射项,后四项是物光 O_i (虚像)或者 O_i^* (实像)和参考光 R_i 的干涉项。在全息图的频谱图上,零级衍射项占据频谱的中心位置,而由于参考光的入射角度不同,(1)式中的后四项在全息图的频谱图上是相互不重叠的,因此可以将此四项用频谱滤波的方法提取出来。

由于本文采用的是双波长数字显微像面全息的方法,CCD 靶面记录的是物体的聚焦像,因此再现的像距为零。再现像不需要空间传播即无需通过衍射计算得到像面的信息,直接提取信息即可。所以在得到分离的 $R_1 O_1^*$, $R_1^* O_1$, $R_2 O_2^*$ 和 $R_2^* O_2$ 频谱后,通过逆傅里叶变换,模拟参考光并利用数字掩模矫正物镜^[16-17]等光学元件引入的误差,即可获得包含有被测样本相位信息的物光 O_1 和 O_2 。再现像面上

光场复振幅的数字化表示为

$$u_i(x, y) = \Gamma_i(x, y) R_i(x, y) [R_i^*(x, y) O_i(x, y)], \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2$, $\Gamma_i(x, y)$ 为畸变校正因子。再现像面上的光场强度和相位分布分别为

$$I_i(x, y) = u_i(x, y) u_i^*(x, y), \quad (3)$$

$$\phi_i(x, y) = \arctan \left[\frac{\text{Im } u_i(x, y)}{\text{Re } u_i(x, y)} \right], \quad (4)$$

合成相位是两个波长相位之差为

$$\Phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) = 2\pi \frac{l_{\text{OPD}}}{\lambda_1} - 2\pi \frac{l_{\text{OPD}}}{\lambda_2} = 2\pi l_{\text{OPD}} \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) = 2\pi \frac{l_{\text{OPD}}}{\Lambda}, \quad (5)$$

式中 l_{OPD} 表示反射的光程差, Λ 为合成波长,则有

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_2 - \lambda_1|}, \quad (6)$$

被测样本的相对高度为

$$h(x, y) = \frac{\Phi(x, y) \Lambda}{4\pi}, \quad (7)$$

这种合成波长一般要比原来两个各自的波长大很多,可以满足具有较大阶跃高度或深度样本的测量。实验中,利用 λ_1 和 λ_2 两个波长的激光同时记录像面全息图,并同时提取各自相位信息进行相减,保证单曝光,并能达到实时测量的目的。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验采用 Mach-Zehnder 反射式实验系统,两个用于记录的激光器分别为 640 nm 的高能红光半导体激光器(CrystaLaser, CL640-050-S)和可调谐半导体激光器(波长可调范围为 639~697 nm),选取波长为 690 nm,因此 $\lambda_1 = 640$ nm, $\lambda_2 = 690$ nm。根据(6)式计算可得两个波长的合成波长是 8.832 μm 。CCD(PX-2M30-L, Imperx),有效像素为 1008 pixel \times 1028 pixel,像素尺寸为 7.4 μm 。显微物镜放大倍率为 50,数值孔径为 0.42。实验装置如图 1 所示。

laser1 和 laser2 发出的激光通过衰减器,偏振分光棱镜(PBS)和半波片(HWP)调节光强和偏振态,同时进入光路后两束光透过显微物镜(MO)照射物体,物体反射的物光通过显微物镜成的像聚焦在 CCD 面被 CCD 接收,与两束参考光分别干涉成像面全息图。倾斜参考臂上反射镜 M3 和 M5 调节干涉条纹空间载频保证两波长的干涉项在频谱上不会重叠。

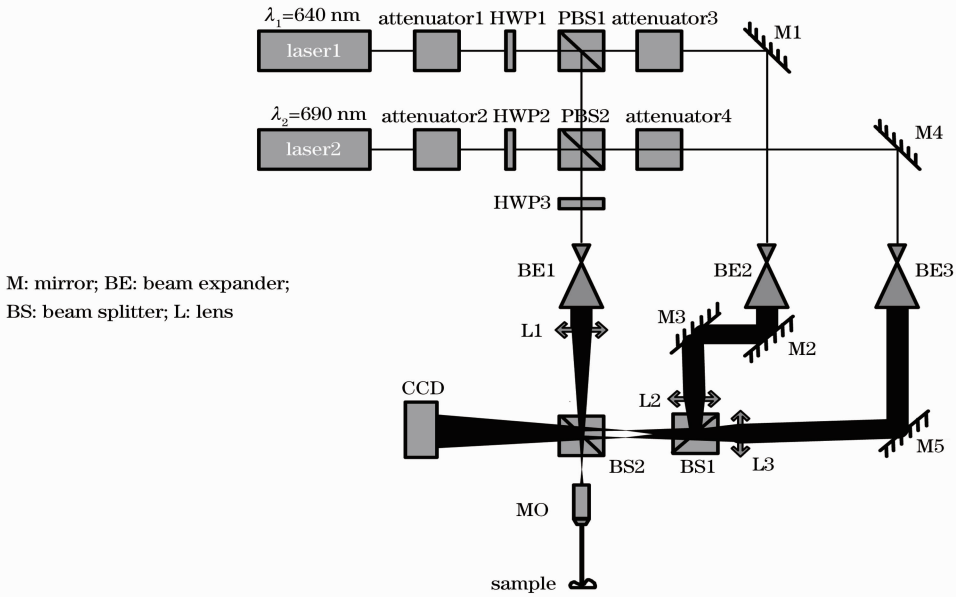


图 1 双波长数字显微像面全息系统装置图

Fig. 1 Dual-wavelength digital microscopic image-plane holography setup

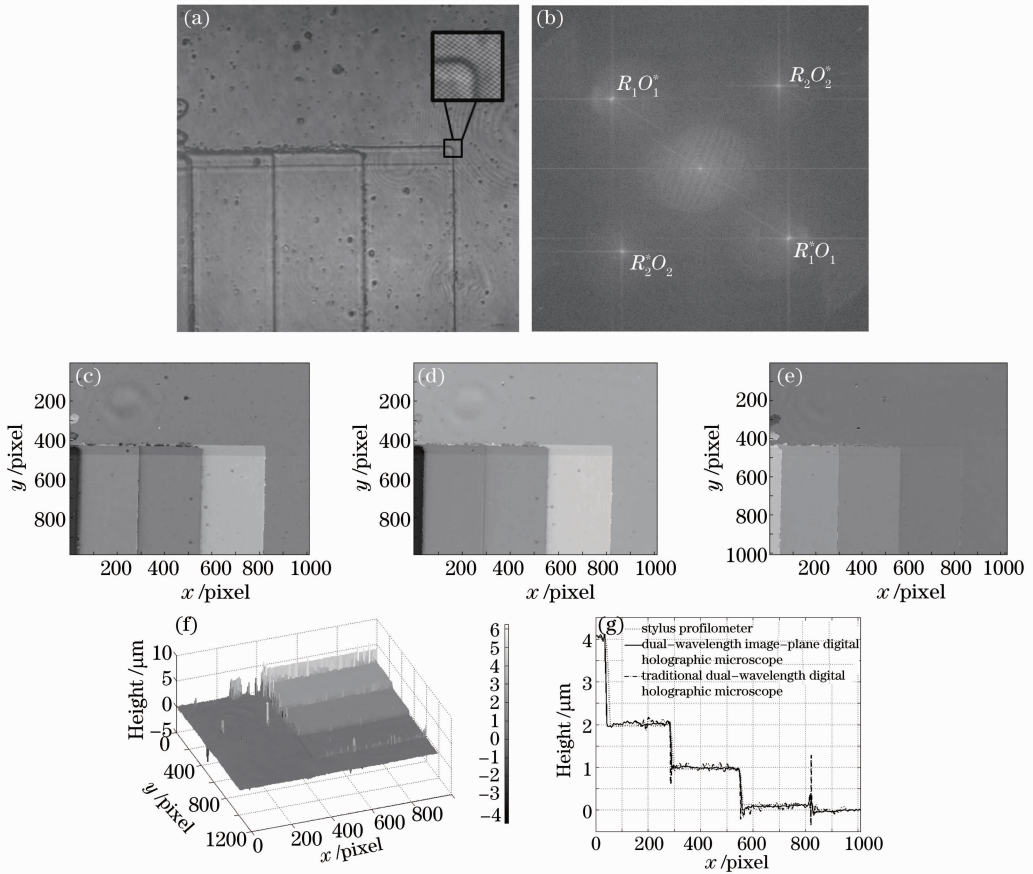


图 2 微台阶实验结果图。(a)数字显微像面全息图；(b)频谱图；(c) 640 nm 波长的包裹相位图；(d) 690 nm 波长的包裹相位图；(e)合成波长的相位图；(f)合成波长的高度立体图；(g)三种方法得到的微台阶平均高度图

Fig. 2 Experimental results of microstep. (a) Digital microscopic image-plane hologram; (b) frequency spectrum; (c) phase image of 640 nm; (d) phase image of 690 nm; (e) phase image of dual-wavelength; (f) three-dimensional image of the microstep; (g) average heights of microstep measured by three methods

3.2 实验结果

利用上述装置对微台阶进行了形貌测量。实验结果如图 2 所示。

图 2(a)为双波长数字显微像面全息图,样本台阶聚焦于全息图上。右上角的小图是对干涉条纹的放大。可以看出两波长光的干涉条纹方向是相互垂直的。图 2(b)为像面全息图的频谱图,两波长光的干涉项互不重叠,为滤波提取干涉项提供了条件。两波长的包裹相位图如图 2(c)、(d)所示。经过对两包裹相位进行相减得到合成波长的包裹相位图,通过解包裹及校正畸变后,合成波长的相位见图 2(e)。根据(7)式得到台阶的高度如图 2(f)所示。此外该微台阶经过机械探针轮廓仪(KLA-Tencor, P-16+/P-6, 1 mg)以及传统双波长数字全息显微测试系统(重构距离 75 mm, 菲涅耳算法重构)的测试,所得结果均在图 2(g)中表示出。本文测试系统测得的台阶高度(求取台阶面的均值高度)从左至右分别 4.0597, 2.0358, 1.0106, 0.1095 μm , 轮廓仪的测量结果为 4.0235, 2.0103, 0.9967, 0.0995 μm , 本文方法与其测试结果基本符合,证明

本文测试方法是有效可行的。

3.3 实验对比分析

为了证明本文方法相对于传统数字全息显微术有更大视场、响应速度较快以及噪声较低的优势,分别针对视场、响应速度、噪声问题进行了对比。

3.3.1 视场

由于传统双波长数字全息显微需要从全画面到像面的进行衍射计算,从而导致 CCD 的边框在像面上产生衍射效应,表现为再现像的强度和相位图边缘出现强烈的高低起伏现象,这部分在表面形貌重构时是无效的。而且边框的衍射效应对再现像内部也将产生轻微的影响。而本文测试方法不需要进行衍射计算,因此避免了 CCD 的边框衍射效应,可以真正做到全视场测量。视场范围能够至少提高 14%。图 3 显示的就是相同台阶用传统数字全息显微法和数字显微像面全息法测量的强度对比图。可以看出图 3(b)的边缘相对于图 3(a)是平整的,仍可视作为有效视场。传统数字全息显微所用重构方法是菲涅耳衍射法。

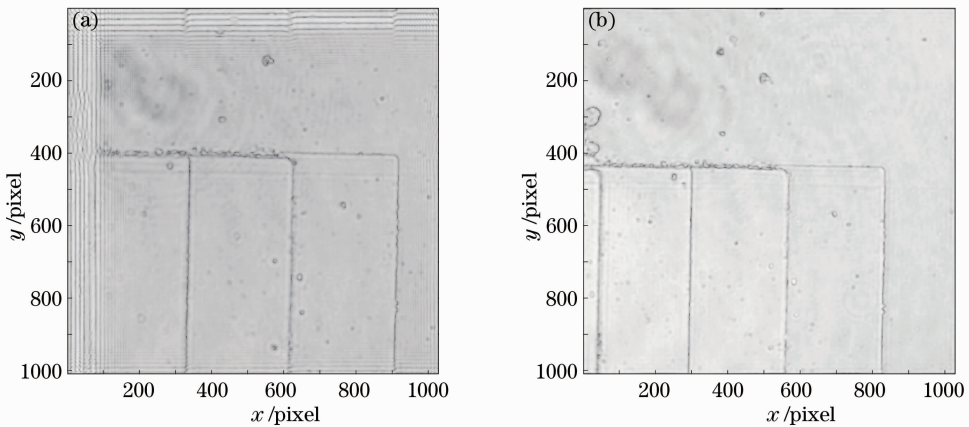


图 3 两种方法强度图对比。(a)传统双波长数字全息显微法得到的强度图;(b)双波长数字显微像面全息法得到的强度图

Fig. 3 Amplitude images with the two methods. (a) Amplitude image of traditional dual-wavelength digital holographic microscopy; (b) amplitude image of dual-wavelength digital microscopic image-plane holography

3.3.2 响应速度

由于传统双波长数字全息显微中要用到衍射重构计算,比如常用的菲涅耳法、卷积法和角谱法衍射,这几种方法都需要进行一次或多次快速傅里叶变换,是非常耗时的。本文方法直接在 CCD 面提取相位,没有衍射计算,可以实现更快速的处理。所测台阶使用 Matlab 软件(计算机处理器 Intel Core i5-2400, CPU 主频 3.10 GHz, 全息图像素为 1008 pixel \times 1028 pixel)进行单幅图的数字处理,耗时 2.931766 s, 传统法(角谱法衍射计算)耗时 3.082824 s, 提高了约

5%,这在实时连续测量中优势尤为明显。

3.3.3 噪声问题

同样,由于衍射计算会引入明显的噪声,故造成平面测量结果出现上下起伏,如图 4 所示。虽然由于频谱滤波会使噪声现象存在,但从传统法与本文方法对比中可以看出,本文方法的噪声较低。这对于双波长数字全息术尤为重要,因为两个单波长相位相减会使噪声形成误差累积,而合成波长的倍数往往是单波长的十几倍,这种误差也会因此扩大。所以针对双波长测量,本文方法是很有意义的。

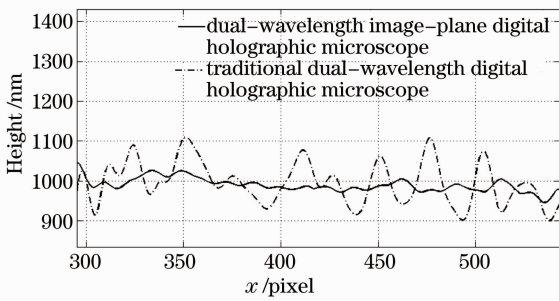


图4 局部放大的两种方法对比台阶高度图

Fig. 4 Magnified part of height profile line of the microstep by the two methods

4 结 论

依据双波长数字显微像面全息术的原理对微台阶进行了测试,并与传统双波长数字全息显微测试系统以及机械探针轮廓仪的测试结果进行对比,结果表明双波长数字显微像面全息术对于阶跃高度大于单波长测量限制的微结构形貌测试有效可行且具有有效测量视场大、响应快以及噪声小等优点,在实时测量的应用中优势明显。

参 考 文 献

- 1 Zhou Wenjing, Yu Yingjie, Xu Qingsheng. Micro-structure measurement of phase grating based on digital micro-holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2234–2238.
周文静, 于瀛洁, 徐强胜. 基于数字显微全息技术的相位光栅结构测量[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2234–2238.
- 2 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.
- 3 Jonas Kühn, Tristan Colomb, Frédéric Montfort, *et al.*. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition [J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7231–7242.
- 4 J Min, B Yao, P Gao, *et al.*. Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(2): 191–196.

- 5 A Khmaladze, R L Matz, C Zhang, *et al.*. Dual wavelength digital holography phase unwrapping by linear regression [C]. *SPIE*, 2011, 8043: 80430X.
- 6 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *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.
- 7 T Colomb, S Krivec, H Hutter, *et al.*. Digital holographic reflectometry [J]. *Opt Express*, 2010, 18(4): 3719–3731.
- 8 T Colomb, J Kühn, C Depeursinge, *et al.*. Several micron-range measurements with sub-nanometric resolution by the use of dual-wavelength digital holography and vertical scanning [C]. *SPIE*, 2009, 7389: 73891H.
- 9 Y Fu, G Pedrini, B M Hennelly, *et al.*. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2009, 47(5): 552–557.
- 10 Jia Jinchao, Mo Weidong, Li Zhaoxiang, *et al.*. Measurement of temperature field based on digital holography technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 91–94.
贾晋超, 莫卫东, 李照祥, 等. 数字全息技术在温度场测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 91–94.
- 11 E Cucho, P Marquet, C Depeursinge. Aperture apodization using cubic spline interpolation; application in digital holographic microscopy [J]. *Opt Commun*, 2000, 182(1): 59–69.
- 12 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.
- 13 Schnars Ulf, Werner P O Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms [J]. *Meas Sci & Technol*, 2002, 13(9): R85–R101.
- 14 Garcia-Sucerquia Jorge, Jorge Alexis Herrera Ramírez, Daniel Velásquez Prieto. Reduction of speckle noise in digital holography by using digital image processing [J]. *Optik*, 2005, 116(1): 44–48.
- 15 Lü Qieni, Ge Baozhen, Zhang Yimo. Digital microscopic image plane holography [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(4): 475–478.
吕且妮, 葛宝臻, 张以谟. 数字显微像面全息技术研究[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 475–478.
- 16 T Colomb, F Montfort, J Kühn, *et al.*. Numerical parametric lens for shifting, magnification, and complete aberration compensation in digital holographic microscopy [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(12): 3177–3190.
- 17 F Montfort, F Charrière, T Colomb, *et al.*. Purely numerical compensation for microscope objective phase curvature in digital holographic microscopy: influence of digital phase mask position [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(11): 2944–2953.

栏目编辑: 何卓铭