

利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌

寇云莉^{1,2,3} 李恩普^{1,2,3} 邸江磊^{1,2,3} 张颜艳^{1,2,3} 李敏茹^{1,2,3} 赵建林^{1,2,3}

(¹西北工业大学理学院, 陕西 西安 710072; ²陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

³教育部空间应用物理与化学重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 针对表面高度起伏较大的物体的三维形貌测量问题, 提出了一种改进的离轴双波长数字全息测量方法。利用偏振分光原理, 将两个波长的物光信息同时记录在一幅全息图上, 并借助两个波长的频差形成远大于单一波长的等效波长, 从而将数字全息术的纵向测量范围拓展到微米甚至毫米量级范围, 有效克服了单波长数字全息术测量形貌起伏较大物体时不可避免的相位去包裹问题。对微米量级高度起伏的台阶状样品形貌进行了实验测量, 测量结果与样品标称值及台阶仪测量值具有很好的一致性, 证明了该方法的有效性。

关键词 全息; 数字全息术; 相位解包裹; 形貌测量

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0209010

Surface Morphology Measurement of Tiny Object Based on Dual-Wavelength Digital Holography

Kou Yunli^{1,2,3} Li Enpu^{1,2,3} Di Jianglei^{1,2,3} Zhang Yanyan^{1,2,3} Li Minru^{1,2,3} Zhao Jianlin^{1,2,3}

¹School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

²Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Xi'an, Shaanxi 710072, China

³Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract An improved off-axis dual-wavelength digital holography method is presented for three-dimensional surface topography measurement of objects with significant variations. The object beams informations of the two different laser wavelengths are recorded on one hologram based on polarization splitting principle, thus the measurement range can be expanded to micron or millimeter scales by means of the equivalent wavelength induced by difference frequency effect between the two wavelengths and the equivalent wavelength is longer than any single one. So the problems of inevitable phase unwrapping when the object morphology with significant variations are measured by a single wavelength is overcome effectively. The morphology of a staircase sample with micron height variations is measured. The experimental results are consistent with the nominal values and the values measured by profile-system, which shows the effectiveness of the proposed method.

Key words holography; digital holography; phase unwrapping; morphology measurement

OCIS codes 090.1995; 110.1650; 110.3175

1 引 言

数字全息术以光学全息理论为基础, 采用电荷耦合器件 (CCD) 或互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机代替传统的全息材料记录全息图, 通过计算机数值模拟全息图的衍射再现, 利用小波变换、相移、快速傅里叶变换及频谱滤波等算法得到物场的振幅

和相位信息, 实现三维物场重构, 具有快速实时、非破坏性、非侵入性、全场测量等优点^[1-2], 因而已被广泛应用于流场测量、形变测量、形貌分析、显微成像和信息加密等领域^[3-15]。

单波长数字全息术是测量物体形貌最简单的方法, 其可直接将得到的相位信息限定在 $[-\pi, \pi]$ 之

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61077008, 61127011)、航空科学基金(2012ZD53055)

作者简介: 寇云莉(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事数字光学信息处理方面的研究。E-mail: kyl.914@163.com

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光信息技术及应用方面的研究。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

间。当样品形貌起伏大于一个波长时,由于得到的物光波前的相位变化超过 2π ,其相位图会产生包裹条纹,必须利用相位解包裹算法才能得到实际相位分布。但是当样品表面起伏较大时,相位包裹条纹非常密集,无法直接判读,导致相位不能展开,为了克服这一缺点,可以利用双波长数字全息术实现物体的形貌测量。

Wagner 等^[16]提出了双波长数字全息术,通过两幅再现相位图相减,得到毫米量级的物体轮廓像,不过其实验装置还较为复杂。Wada^[17]用波长可调的半导体激光器,得到一个毫米量级的等效波长,实现了台阶高度较大物体的测量。可调谐激光器的使用大大地简化了实验系统,但需要在测量过程中依次获取不同波长所对应的全息图。为了实现实时测量,Onodera 等^[18]用两束传播方向相同、波长不同的激光记录了一幅全息图,进而得到等效相位分布,但其仅用于焦距内成像,并且为了避免频谱重叠,物光谱不能包含过高的空间频谱,这大大增加了光路调节的难度。Kühn 等^[19]提出了一种仅需获取单一全息图的实时双波长数字全息显微术,但是两个独立的参考臂同样使得光路系统较复杂。Min 等^[20]提出双波长离轴数字全息显微术,通过改变偏振片的角度,将不同波长所记录的物光波信息分布在 CCD 的整个靶面上。偏振片的引入使得实验中的影响因素增多,同时也增加了光路操作的难度。

本文提出一种改进的离轴双波长数字全息测量方法,利用偏振分光棱镜反射自然光的偏振面垂直于入射面的 s 分量而透射偏振面平行于入射面的 p 分量这一特性,将两个波长的物光信息同时记录在一幅全息图上,同时利用角分复用技术,将两个波长记录的物光频谱分开,由此可实现对具有微米量级高度起伏的台阶状样品形貌的测量。

2 实验原理

假设两束不同波长的物光 O_1 和 O_2 与两束自同一对应激光器发出的参考光 R_1 和 R_2 在一套离轴光路中干涉,利用 CCD 获取相应的复合数字全息图,其强度分布可表示为

$$I(x_H, y_H) = |O_1|^2 + |R_1|^2 + |O_2|^2 + |R_2|^2 + R_1^* O_1 + R_1 O_1^* + R_2^* O_2 + R_2 O_2^*, \quad (1)$$

式中,前四项代表 0 级像,可以通过在傅里叶变换平面滤波直接消除,后四项分别对应两种波长记录条件下物光波 O_i (虚像)或其共轭光波 O_i^* (实像)与相应参考光波的干涉结果。假设两束参考光波的入射

角度不同,则通过傅里叶变换得到的频谱图上各干涉项的位置不同,直接通过空间滤波方法将不同波长的物光频谱分量分离,并分别将其移频至中心,进而乘以对应波长的传递函数并进行逆傅里叶变换,再现的物光场复振幅分布为

$$O_i(x', y') = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [I(x_H, y_H) R_i(x_H, y_H)] \times \exp \left[j \frac{2\pi d'}{\lambda_i} \sqrt{1 - \lambda_i^2 \left(\frac{m}{M \Delta x_H} \right)^2 - \lambda_i^2 \left(\frac{n}{N \Delta y_H} \right)^2} \right] \}, \quad (2)$$

$i = 1, 2$

式中: $R_i(x_H, y_H)$ 为全息图再现过程中所用照明光波的复振幅分布; d' 为再现距离; m, n 是整数,且满足 $-M/2 \leq m \leq M/2, -N/2 \leq n \leq N/2, M$ 为 x 轴方向的采样点数, N 为 y 轴方向采样点数; Δx_H 和 Δy_H 分别为全息图平面上沿 x 和 y 方向上的采样间隔(即 CCD 的像素间隔)。

为了获得由双波长合成得到的等效波长,需要对记录双波长信息的复合全息图进行频谱分离滤波,计算出不同波长对应再现像的复振幅分布,进而通过其波前相位相减操作得到其相位差,即为等效波长的相位分布,定义为

$$\Phi = \arg(O_1 O_2^*) = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{nh}{\lambda_1} - 2\pi \frac{nh}{\lambda_2} = 2\pi \frac{nh}{\Lambda}, \quad (3)$$

式中:算符 $\arg(x)$ 为求解复振幅 x 的幅角,即复振幅 O_1, O_2 的相位差; nh 是空气中均匀样品的光程差, n 是样品的折射率, h 是样品的高度分布; λ_i 是波长; φ_i 是与波长 λ_i 对应的再现光场波前相位分布; Λ 为等效波长,定义为

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,两个波长相差越小,等效波长就越大,因而双波长数字全息术能够拓展相位测量的范围,从而可以分辨结构更为复杂的样品,通过双波长解包裹^[21]即可得到其展开的正确相位。需要说明的是,波长间隔越小,放大效应越明显。但是,波长和测量范围放大的同时,噪声也将等比例放大,精度下降。因此,实际中应根据测量对象的特点合理选择波长差,避免精度过低。根据待测物体的台阶高度选取的波长分别为 532 nm 和 473 nm,等效波长约为 4.3 μm 。

3 实验装置

如图 1 所示,采用基于马赫-曾德尔干涉型透射式离轴数字全息图记录光路。通过调整激光器,使得

Verdi 激光器(波长为 $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$)发出的线偏振光的振动方向垂直于光学平台表面(竖直偏振, s 态),而波长为 $\lambda_2 = 473 \text{ nm}$ 的半导体激光器发出的线偏振光的振动方向平行于光学平台表面(水平偏振, p 态),利

用偏振分光棱镜实现离轴双波长干涉,从而简化光路系统。在扩束准直系统中使用短焦距双胶合消色差透镜,将色差减小至最小,并且使得光路结构更为紧凑,减少光在传播过程中的损失以及受到的干扰。

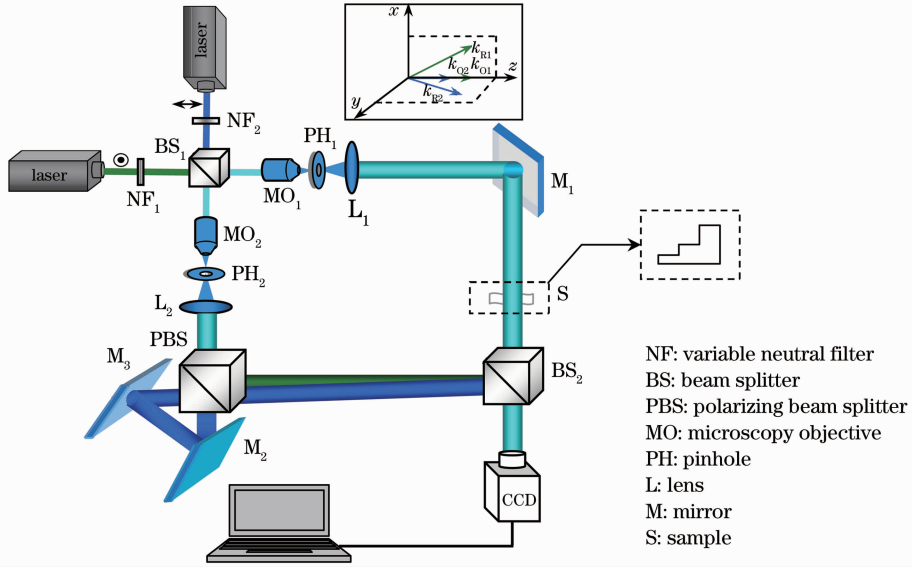


图 1 双波长数字全息图记录光路

Fig. 1 Experimental setup for recording dual-wavelength digital holograms

两束不同波长的激光分别通过衰减器 NF_1 和 NF_2 调节光强比后,再各自经分光棱镜 BS_1 分成两路,其中一路共路的双波长光束依次经显微物镜 MO_1 扩束、针孔 PH_1 滤波和透镜 L_1 准直后变为平行光束,进而被平面反射镜 M_1 反射后照射样品 S ,携带样品信息的物光透过分光棱镜 BS_2 ,进入 CCD (BASLER scA600-14gm 型,像素数为 $1626 \text{ pixel} \times 1326 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$)。另一路共路的双波长光束中,绿、蓝光束分别经显微物镜 MO_2 扩束、针孔 PH_2 滤波和透镜 L_2 准直后变为平行光,进入偏振分光棱镜 PBS,其中 s 态的绿光经反射后作为参考光直接投射到 CCD 靶面; p 态的蓝光依次经 PBS 透射和反射镜 M_2 和 M_3 两次反射后,再次穿过 PBS,最终透过分光棱镜 BS_2 到达 CCD 靶面也作为参考光。两束参考光在 CCD 靶面处与相应波长的物光发

生干涉,形成复合全息图并同时被 CCD 采集和记录。实验中,为了使蓝色物参光波的光程差尽可能小,将 M_2 和 M_3 分别放置在偏振分光棱镜 PBS 的相邻两侧,并且 M_2 和 M_3 在空间互相倾斜成一个较小的角度,使得所能记录的物光波的频谱宽度尽可能大,并且在 CCD 靶面上接收到的两个波长的干涉条纹能够沿不同方向展开,以便于后续的滤波处理。

4 实验结果与分析

实验所用样品是折射率为 1.42 的透明台阶状物。制作时,先以光刻得到的台阶状硅片作为底物,用聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 浇注,在一定温度下固化后,从硅片上剥离出透明的台阶样品。三个台阶高度标称值分别为 $4.5, 3, 0.75 \mu\text{m}$,台阶尺寸均为 $3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。图 2(a)是采

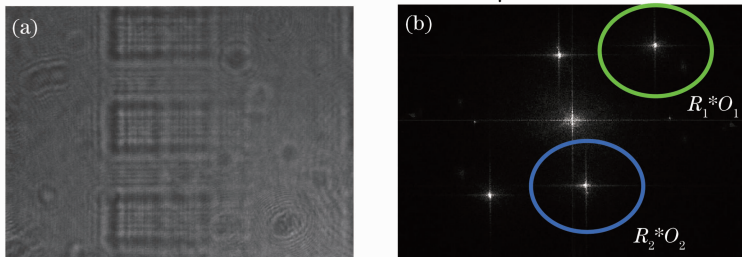


图 2 台阶状样品的(a)数字全息图及其(b)频谱分布

Fig. 2 (a) Digital hologram and (b) Fourier spectra of staircase test-sample

用图 1 所示光路得到样品的数字全息图,图 2(b)为其频谱分布。

图 2(b)中蓝色和绿色的圆圈分别代表蓝光和绿光的+1 级频谱,为了便于分析,分别将其取出并移频至中心,然后利用卷积法进行数值重建,即可得到复振幅分布,进而对其取幅角得到对应的包裹相

位图,如图 3 所示。其中图 3(a)和(b)分别对应 532 nm 和 473 nm 两种波长的结果,分别进行相位解包裹运算后,得到如图 3(c)和 3(d)所示的解包裹相位分布图。由图 3(a)和 3(b)所示包裹相位图得到的等效波长的包裹相位分布如图 4 所示。

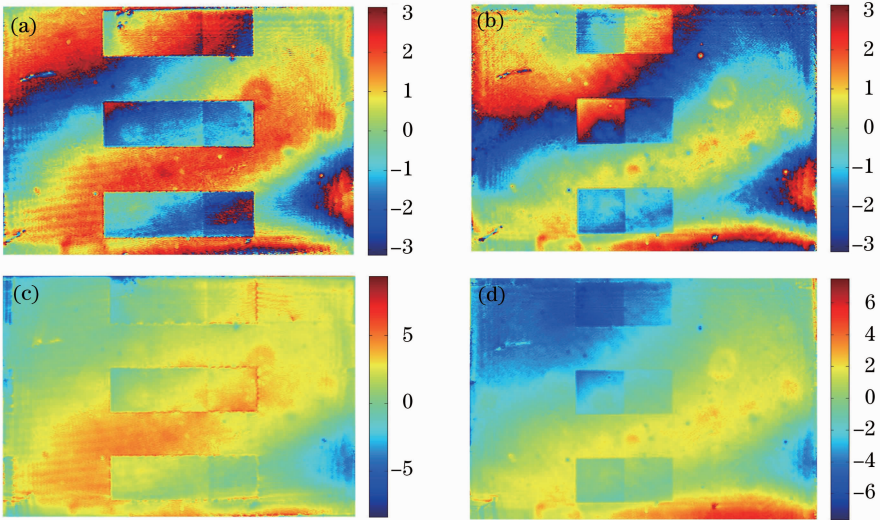


图 3 单波长测量的实验结果。(a)绿光的包裹相位分布;(b)蓝光的包裹相位分布;(c)绿光的解包裹相位分布;(d)蓝光的解包裹相位分布

Fig. 3 Experimental results with single wavelength measurement. (a) Wrapped phase distribution for green beam; (b) wrapped phase distribution for blue beam; (c) unwrapped phase distribution for green beam; (d) unwrapped phase distribution for blue beam

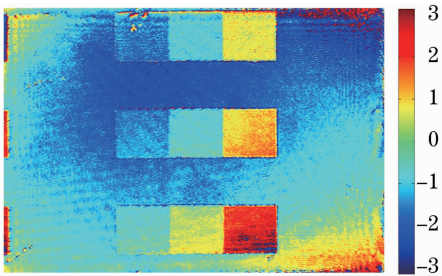


图 4 等效波长情况下的包裹相位分布

Fig. 4 Wrapped phase distribution for equivalent wavelength

考虑到 PDMS 样品的材质质地较软,在夹持的过程中边缘部分可能会受力不均,同时样品表面稍有不平整,所以得到的相位图中背景会有些许不均匀,实验中选取多组数据进行比较分析。由图 3 可见,对应记录波长为 532 nm 的包裹或解包裹相位分布图中,可以分辨出不同高度的三个台阶界面,但较为模糊;对应记录波长为 473 nm 的包裹或解包裹相位分布图中,却只能看到左侧两个台阶边界。然而图 4 显示,利用双波长记录时,重建的解包裹相

位分布图中可以清楚地看到三个台阶界面,并且能够明显地分辨出相位变化大小。这表明,对于表面起伏梯度较大的物体,分别利用单一波长测量时,并不能准确重建出物光场的真实相位分布;而采用双波长测量时,则能够完整地再现全部信息,不存在失真,并且对比测量结果还可以看出,采用双波长数字全息术可以有效地拓展测量范围。

选取图 4 中间一组台阶的包裹相位分布并画出台阶的表面高度分布,结果如图 5(a)所示。取其沿中间对称线的高度分布,并对其进行中值滤波操作,结果如图 5(b)所示。在图 5(b)的台阶高度分布曲线中,确定每个台阶的宽度为 $220 \mu\text{m}$,并在此范围内对高度取平均值。其中 A、B、C 点分别为三个台阶宽度范围内的平均值点, D 点为基底范围内的平均值点。求相邻两点之间的高度差即得到对应台阶的高度值分别为 $b_1 = 4.5 \mu\text{m}$, $b_2 = 2.9 \mu\text{m}$, $b_3 = 0.8 \mu\text{m}$ 。为便于对比,用台阶仪对样品进行测量,得到三个台阶的高度分别为 $c_1 = 4.5 \mu\text{m}$, $c_2 = 3.1 \mu\text{m}$, $c_3 = 0.77 \mu\text{m}$ 。可以看出,标称值、实验测量值以及台阶仪测量值在

允许的误差范围内是一致的,说明双波长数字全息术在测量表面高度起伏较大的样品时可以避免相位包裹产生的影响,回避掉相位解包裹过程中引入的

误差,并且能够得到精确的相位分布,准确地再现样品包含的所有信息。

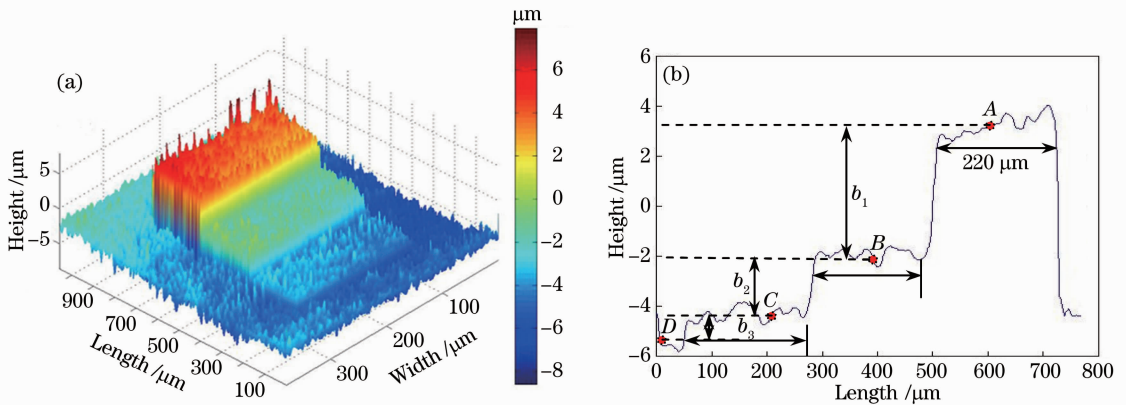


图5 双波长测量结果。(a)图4中间一组合阶的表面三维高度分布;(b)沿图5(a)台阶中间对称线的高度分布曲线
Fig. 5 Measurement results with dual-wavelength measurement. (a) Three-dimensional height distribution of the staircase surface in middle group of Fig. 4; (b) height distribution values along the middle symmetrical line of staircase in Fig. 5(a)

5 结 论

利用改进的离轴双波长数字全息测量方法对表面高度起伏较大的台阶状样品进行了实验测量分析,并比较了单波长和双波长方法测量台阶状样品的优缺点。结果表明,对于表面高度起伏较大的样品,单波长方法存在一定局限性,而双波长方法则能够获得样品真实的相位分布。所提出的改进光路结构简单、操作容易,利用偏振分光和角分复用技术将两个波长记录的物光频谱分开,因而相对于传统的离轴装置能够充分利用 CCD 的分辨率。测量结果与样品标称值和用台阶仪的测量结果在允许的误差范围内一致,进一步验证了双波长数字全息术用于物体形貌测量的有效性。

参 考 文 献

- 1 S Grilli, P Ferraro, S De Nicola, *et al.*. Whole optical wavefields reconstruction by digital holography[J]. *Opt Express*, 2001, 9(6): 294–302.
- 2 G Wernicke, J Frank, H Gruber, *et al.*. Application of the high-resolution optical reconstruction of digital holograms[C]. *SPIE*, 2006, 6136: 61360Q.
- 3 P Marquet, B Rappaz, P J Magistretti. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with sub-wavelength axial accuracy[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(5): 468–470.
- 4 J Fung, K E Martin, R W Oerry, *et al.*. Measuring translational, rotational and vibrational dynamics in colloids with digital holographic microscopy[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8051–8065.
- 5 Y C Zhang, J L Zhao, Q Fan, *et al.*. Improving the reconstruction quality with extension and apodization of the digital hologram[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(16): 3070–3074.

- 6 T Kurihara, Y Takaki. Improving viewing region of $4f$ optical system for holographic displays[J]. *Opt Express*, 2011, 19(18): 17621–17631.
- 7 J L Zhao, H Z Jiang, J L Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2514–2519.
- 8 S Seebacher, W Osten, T Baumbach, *et al.*. The determination of material parameters of microcomponents using digital holography[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2001, 36(2): 103–126.
- 9 Y Hayasaki, M Isaka, A Takita, *et al.*. Time-resolved interferometry of femtosecond-laser induced processes under tight focusing and close-to-optical breakdown inside borosilicate glass [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 5725–5734.
- 10 S A Alexandrov, T R Hillman, T Gutzler, *et al.*. Synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(16): 168102.
- 11 Y Luo, S B Oh, G Barbastathis. Wavelength-coded multifocal microscopy[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(5): 781–783
- 12 N Salah, G Godard, D Lebrun, *et al.*. Application of multiple exposure digital in-line holography to particle tracking in a Bénard-von Kármán vortex flow[J]. *Meas Sci & Technol*, 2008, 19(12): 1–7.
- 13 P Tankam, Q Song, M Karray, *et al.*. Real-time three-sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(12): 2055–2057.
- 14 G Bolognesi, S Bianchi, R Di Leonardo. Digital holographic tracking of microprobes for multipoint viscosity measurements [J]. *Opt Express*, 2011, 19(20): 19245–19254.
- 15 Zeng Yanan, Wang Fei, Lei Hai, *et al.*. Surface profile measurement of microstructures based on dual-wavelength digital microscopic image-plane holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1009001.
- 曾雅楠,汪飞,雷海,等. 双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1009001.
- 16 C Wagner, W Osten, S Seebacher. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multi-wavelength contouring [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(1): 79–85.

- 17 Atsushi Wada. Multiple-wavelength holographic interferometry with tunable laser diodes[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(12): 2053—2060.
- 18 R Onodera, Y Ishii. Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(34): 7988—7994.
- 19 Jonas Kühn, Tristan Colomb, Frédéric Montfort, *et al.*. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy for MEMS characterization[C]. *SPIE*, 2007, 6716: 671608.
- 20 Junwei Min, Baoli Yao, Peng Gao, *et al.*. Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(2): 191—196.
- 21 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.

栏目编辑: 何卓铭