

基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微术

邓丽军¹, 黄星艳², 曾吕明¹, 黄振¹, 刘国栋^{1*}

¹江西科技师范大学江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330038;

²江西科技师范大学研究生院, 江西 南昌 330038

摘要 提出了一种基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微术。将主波长为 670 nm 的红光芯片和主波长为 521 nm 的绿光芯片封装成半球型 LED 芯片, 然后利用彩色 CCD 相机获取被测样品在两种照明光波下的彩色相移数字全息图, 最后采用色彩分离技术、相移技术及双波长相位提取技术获取被测样品的相位分布及面型分布。实验结果证明了本文方法的可行性。

关键词 成像系统; 双波长像面数字全息显微术; 双色 LED 芯片; 相位分布; 面型分布

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0111004

Dual-Wavelength Image-Plane Digital Holographic Microscopy Based on Bi-Color LED Chips

Deng Lijun¹, Huang Xingyan², Zeng Lüming¹, Huang Zhen¹, Liu Guodong¹

¹Jiangxi Provincial Key Laboratory of Optoelectronics and Communications, Jiangxi Science and
Technology Normal University, Nanchang, Jiangxi 330038, China;

²Graduate College, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang, Jiangxi 330038, China

Abstract Dual-wavelength image-plane digital holographic microscopy based on bi-color LED chips is proposed. Firstly, a red LED chip with central wavelength of 670 nm and a green LED chip with central wavelength of 521 nm are packaged as a hemispherical LED chip. Composite holograms at different wavelengths and phase shift are recorded with a color CCD camera. The phase distribution and surface profile of the sample are reconstructed based on the color separation technology, phase shifting technology and dual-wavelength phase extracting technology. The feasibility of the proposed method is demonstrated by the experimental results.

Key words imaging systems; dual-wavelength image-plane digital holographic microscopy; bi-color LED chips; phase distribution; surface profile

OCIS codes 110.6880; 090.1995; 110.0180; 100.3010; 100.5088

1 引 言

数字全息显微术是一种能够快速、定量地获取被测物场复振幅信息的新型显微技术, 具有非接触、全场测量、高精度等特点, 因而在材料分析^[1]、生物医学观测^[2]、流场测量^[3]等方面得到了广泛的应用。

双波长数字全息显微术首先记录两个不同波长下的两幅数字全息图, 然后分别通过数值再现算法

获得其对应波长的包裹相位图, 并求得两者的包裹相位差, 最后得到等效波长的相位分布。该方法解决了单波长数字全息显微术所面临的相位解包裹问题, 而且适用于被测样品表面结构梯度变化很大或受噪声严重影响的情况^[4-7]。

传统双波长数字全息显微术通常采用单色光电记录器件获取两个分立光源照明下的多幅数字全息图, 这种方式极易受到光源稳定性不佳、外界环境扰动、气流扰动等因素的影响^[8-9]。曾雅楠等^[10]利用

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(11664011)、江西省科技支撑计划(20132BBG70033)、江西省 2011 协同创新项目、江西科技师范大学博士科研启动基金(3000990325)、江西省自然科学基金(2017ACB20027)

作者简介: 邓丽军(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事数字全息显微术方面的研究。E-mail: jxldeng2008@163.com

* 通信联系人。E-mail: 626208665@qq.com

两个分立光源并结合像面数字全息显微术实现了对台阶型透明样品的高精度测量,但其实验装置较为复杂。Wada^[11]利用可调谐激光器实现了对大深度台阶的形貌测量,但由于该方法需要依次获取被测样品在不同波长下的全息图,因此无法进行实时测量。Rinehart 等^[12]首先通过实验证明了彩色电荷耦合器件(CCD)的色串扰对双波长数字全息相位测量精度的影响很小。而后,Min 等^[13]利用彩色光电记录器件 CMOS 并结合角分复用技术,实现了单帧采集双波长数字全息图,但实验中依然采用两个独立光源,易受光源稳定性及外界环境因素影响。Jeon 等^[14]采用两种不同中心波长的窄带滤光片对宽带发光二极管(LED)光源进行滤色,依次获得不同照明光波下的数字全息图,但是滤光片的引入使得实验中的影响因素增多,如光能损耗、滤色效果都会影响该方案的有效性,同时也降低了测量的实时性。

针对上述问题,本文提出了一种基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微测量方法,该方法通过在 LED 中封装两种波长的芯片实现双色光场的同时输出,而后利用彩色 CCD 记录的双色场数字全息图,并结合两步相移迭代技术,重构出被测样品的相位分布及面型分布。与现有系统相比,本文方法能够有效地简化光路,降低光源稳定性,减小外界环境因素扰动对系统稳定性的影响。

2 原 理

在像面数字全息显微术中,记录两幅含有相移量 δ 的相移数字全息图,其光强分布可以表示为

$$\begin{cases} I_1 = I_o + I_r + O^* R + OR^* \\ I_2 = I_o + I_r + O^* R \exp(i\delta) + OR^* \exp(-i\delta) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 分别为记录的两幅相移数字全息图的光强分布; I_o, I_r 分别为记录的物光波和参考光波的光强分布; O^* 为物光波复振幅 O 的共轭; R^* 为参考光波复振幅 R 的共轭。

通过(1)式获取的 +1 级再现像 OR^* 可以表示为

$$OR^* = \frac{I_1 - I_o - I_r - \exp(-i\delta)(I_2 - I_o - I_r)}{1 - \exp(-2i\delta)}. \quad (2)$$

通过模拟产生数字参考光波 R_s , 并与 +1 级再现像 OR^* 相乘,得到物光波复振幅 O 的分布为

$$O = R_s(OR^*). \quad (3)$$

获取实际相移量后,利用(2)式及(3)式就可以准确得到 +1 级再现像 OR^* 的复振幅分布。在像面数字全息中,(3)式表示的物光波即为原始物光波的复振幅分布,无需再进行衍射传播计算^[14]。由(3)式得到相应的物光波包裹相位 φ 为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}O}{\text{Re}O}\right), \quad (4)$$

式中 $\text{Im}O$ 为物光波复振幅 O 的虚部, $\text{Re}O$ 为物光波复振幅 O 的实部。从(4)式可以看出,由于数字全息显微术采用数值再现算法获取的物光波相位信息是通过求解反正切函数得到的,因此当光经过被测样品的光程差大于所记录光波长的 1/2 时,其真实相位分布会被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 区间内。

在双波长数字全息显微术中,将记录光波 λ_1, λ_2 下的物光波包裹相位分布 $\varphi_{\lambda_1}, \varphi_{\lambda_2}$ 相减得到相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta L_{OP} = \begin{cases} \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2}, & \Delta\varphi > 0 \\ \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2} + 2\pi, & \Delta\varphi < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 为等效波长, ΔL_{OP} 为光程差分布。这相当于用等效波长 Λ 记录物光波相位,当两个记录光波之间的波长差选取合适从而使等效波长大于光程差 ΔL_{OP} 时,获取的相位分布不存在包裹现象。这可以解决单波长数字全息显微术中相位展开所引入的算法误差问题,以及无法适用于物体表面结构梯度变化较大情况的问题。需要说明的是,等效波长在增加测量范围的同时,对单波长包裹相位分布中的噪声也进行了放大,因此为了将放大噪声降低到单波长水平,采用基于引导相位的双波长相位去噪声算法对等效波长相位中的噪声进行抑制,以提高双波长数字全息显微术的测量精度^[15-16]。

获取等效波长下的去噪声物光波相位分布后,依据被测样品结构的不同,分别得到被测样品的面型分布。

对于反射型被测样品,其面型分布 H 为

$$H = \frac{\Lambda}{4\pi} \Delta\varphi, \quad (6)$$

对于透射型被测样品,其面型分布 H 为

$$H = \frac{\Lambda}{2\pi(n - n_0)} \Delta\varphi, \quad (7)$$

式中 n 为被测样品的折射率分布, n_0 为被测样品所处周围介质的折射率分布。

3 实 验

3.1 双色 LED 芯片的封装结构

利用固晶、焊线、灌胶等传统封装工艺,将台

湾晶元光电股份有限公司生产的红光芯片(1.13 mm×1.13 mm)、绿光芯片(1.52 mm×1.52 mm)封装成双色 LED 芯片,其结构尺寸及实物如图 1 所示。

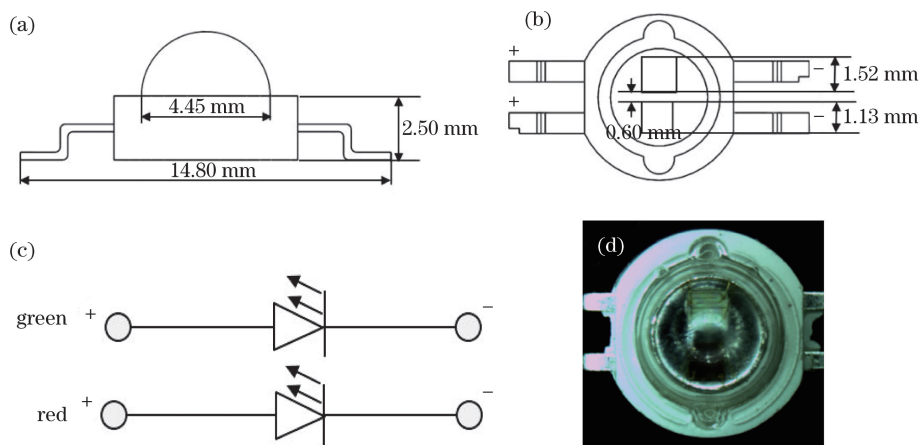


图 1 双色 LED 芯片的封装结构图。(a)正视图;(b)俯视图;(c)电路图;(d)实物图

Fig. 1 Packaging structure of bi-color LED chips. (a) Front view; (b) top view; (c) circuit; (d) physical map

采用杭州灵彩科技有限公司生产的 LMS-0315 光源光电色测试系统,对封装后的双色 LED 芯片进行功率谱测量。当直流输入电压为 3.2 V,电流为 350 mA 时,其结果如图 2 所示。

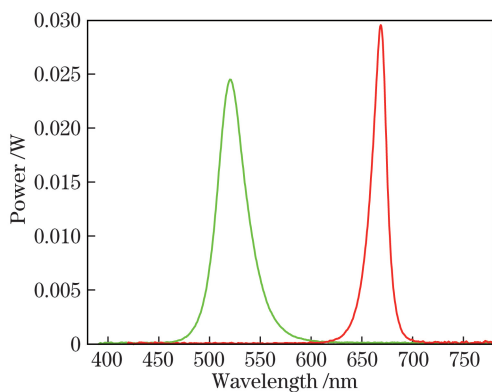


图 2 双色 LED 芯片的功率谱分布

Fig. 2 Power spectrum of bi-color LED chips

从双色 LED 芯片的功率谱可以获取封装后 LED 的中心波长 λ_0 、半峰全宽 $\omega_{1/2}$ 、相干长度 $(\lambda^2/\Delta\lambda)$ 及发光功率等参数,如表 1 所示。

3.2 实验装置

实验装置的光路如图 3 所示。

在图 3 所示实验装置中,封装后双色 LED 芯片由电压 3.2 V、电流 350 mA 的直流电源供电,双色 LED 芯片同时发出的红光和绿光经过空间滤波、准直后,被分束镜(BS)分成 2 束,其中一束经过显微物镜(MO)后形成光强均匀分布的参考光波,另一束照射到被测样品后通过 MO 将被测样品放大 8 倍成像至彩色 CCD 的感光面上,作为物光波。参考光波与物光波在彩色 CCD 的感光面发生干涉,形成像面全息图。LED 作为低相干光源能够有效地减少数字全息测量系统的相干噪声,不仅能够使参考光的光强分布更加均匀,而且能提高数字全息成像和重建的精度。在实验中,被测样品为自制的台阶型相位物体(介质折射率为 1.49);反射镜 M_2 搭载在哈尔滨芯明天科技有限公司生产的 PST150 VS9 型压电陶瓷(PZT)换能器上,其控制器为 PVC-150,位移精度为 $0.0001 \mu\text{m}$;彩色 CCD 型号为 CMLN-13S2C,其像素尺度为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$;图像采集大小为 768 pixel(水平方向)×572 pixel(竖直方向)。实验中,通过控制反射镜 M_2 的移动距离 $d = 0.083 \mu\text{m}$ 依次获取两幅彩色相移数字全息图,如图 4 所示。

表 1 封装后双色 LED 芯片的光学性质

Table 1 Optical properties of the utilized bi-color LED chips

Color	Central wavelength λ_0 /nm	$\omega_{1/2}$ /nm	Coherent length / μm	Luminous power /W
Green	521	28	9.69	1.90
Red	670	17	26.40	2.06

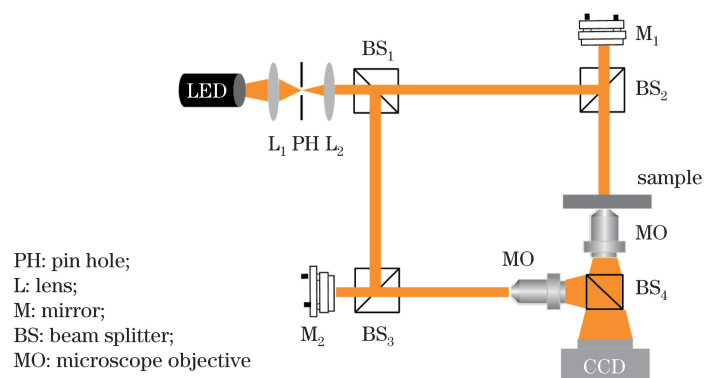


图 3 实验装置的光路图

Fig. 3 Optical path of experimental setup

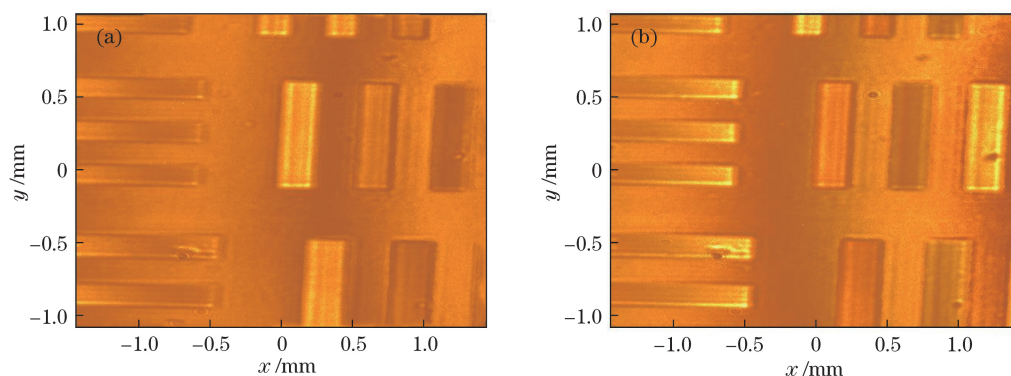


图 4 彩色数字全息图。(a)相移前;(b)相移后

Fig. 4 Colorful digital holograms. (a) Without phase shift; (b) with phase shift

利用彩色 CCD 的不同颜色通道将获取的两幅彩色相移数字全息图进行颜色分离,得到两组分别

对应于 670 nm(红光通道)和 521 nm(绿光通道)的相移数字全息图,如图 5 所示。

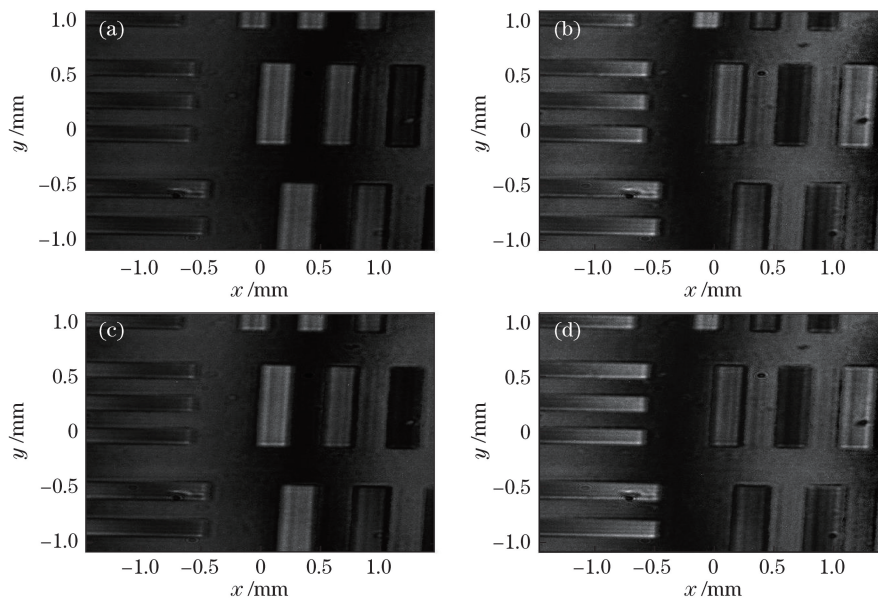


图 5 两种波长的相移数字全息图。(a) 670 nm 波长相移前;(b) 670 nm 波长相移后;

(c) 521 nm 波长相移前;(d) 521 nm 波长相移后

Fig. 5 Phase shifting digital holograms with two wavelengths. (a) Without phase shift at 670 nm; (b) with phase shift at 670 nm; (c) without phase shift at 521 nm; (d) with phase shift at 521 nm

对获取的两组像面相移数字全息图,采用以再现参考光的峰值信噪比为判断条件的两步相移迭代算法,降低相移误差,优化迭代过程^[17-18]。通过该方法,获取 670 nm 及 521 nm 照明波长下的

实际相移量分别为 1.5567 rad 和 1.9523 rad。结合(1)式和(2)式,利用实际相移量及两步相移算法,重构被测样品在两个波长下的包裹相位,如图 6 所示。

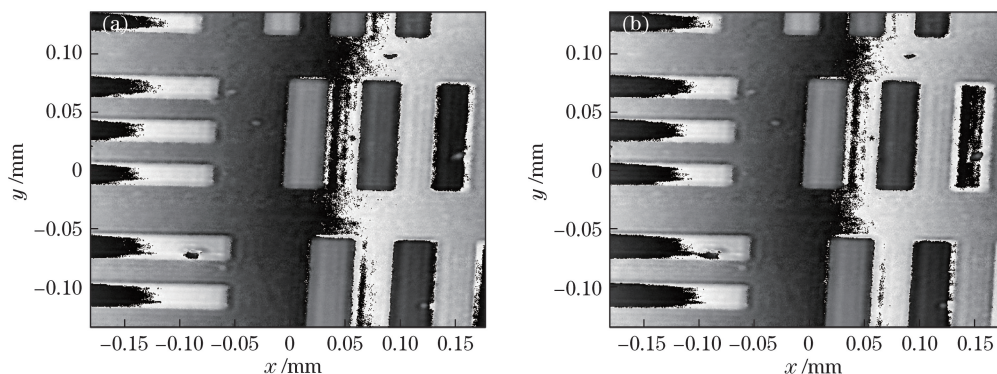


图 6 通过两步相移算法重构的包裹相位图。(a) 670 nm; (b) 521 nm

Fig. 6 Reconstructed wrap phase maps using two-step phase shifting algorithm. (a) 670 nm; (b) 521 nm

利用被测样品在两个波长下的包裹相位分布并结合(5)式即可获取被测样品的无包裹相位分布,如图 7(a)所示。从图中可以看出,由于再现物光波受到数字参考光波的影响,恢复出的被测样品相位包含了参考光波的一次相位倾斜因子。为此,采用相位掩模法^[19]对一次相位畸变进行校正,正确再现的被测样品的相位分布如图 7(b)所示。利用(7)式得

到的被测样品的面形如图 7(c)和图 7(d)实线所示。此外,利用 Veeco NT9100 轮廓仪对图 7(b)中虚线部分进行了对比测试,测试结果如图 7(d)虚线所示。本文方法测得的被测样品平均高度为 0.56 μm ,轮廓仪测得的被测样品平均高度为 0.6 μm ,本文方法与轮廓仪测试结果基本符合,证明了本文方法的有效性。

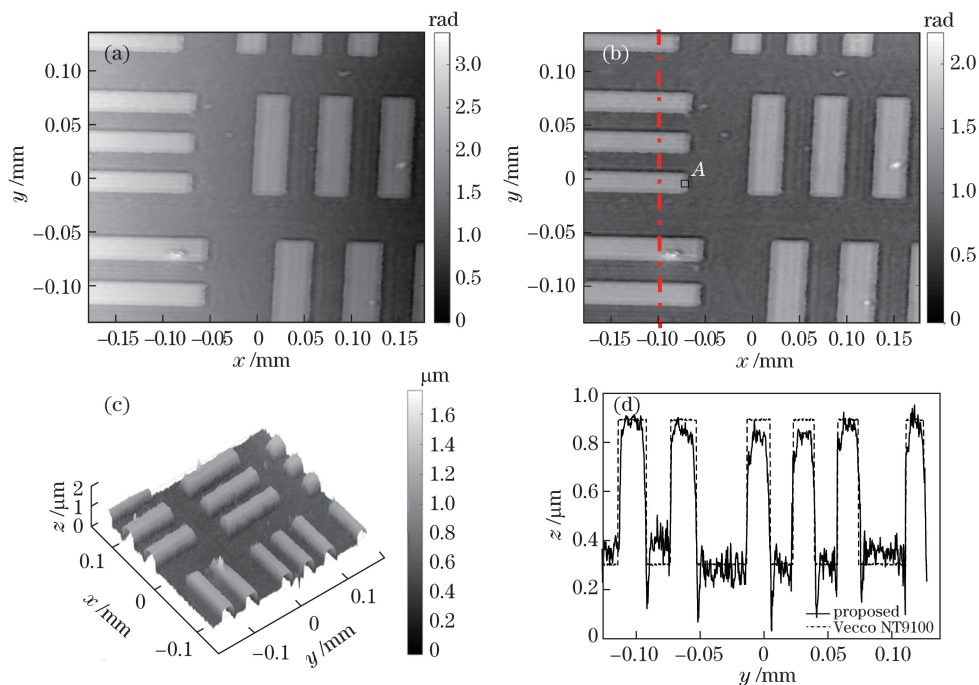


图 7 实验结果。(a)含有相位畸变的双波长合成相位;(b)去除相位畸变的双波长合成相位;
(c)被测样品的三维面型分布;(d)对比实验结果

Fig. 7 Experimental results. (a) Dual-wavelength phase map with phase distortion;
(b) dual wavelength phase map without phase distortion; (c) 3D surface profile of the tested sample;
(d) comparison of the measurement data

为了证明本文方法与分立光源相比具有更好的系统稳定性,分别利用双色 LED 芯片以及与双色 LED 芯片波长相同的分立 LED 光源对被测样品进行了 30 min 连续测量,间隔时间为 1 min。而后,针对图 7(b)中 A 点内面型的平均值变化,比较双色 LED 芯片以及分立光源的 30 次测量结果,如图 8 所示。从图 8 可以看出,在长时间连续测量的情况下,采用基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微测量系统的稳定性明显优于传统的分立光源测量系统。因此,本文方法有利于提高系统稳定性。

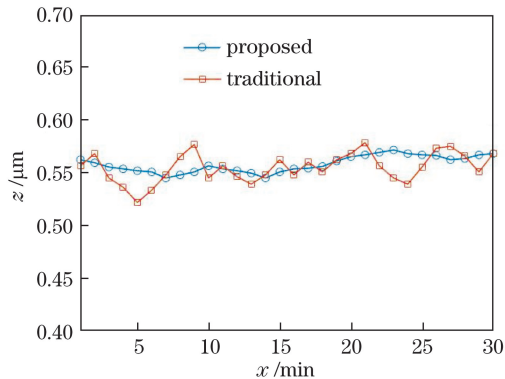


图 8 本文系统与分立光源测量系统的稳定性对比

Fig. 8 Comparison of stability between the proposed system and the system with two individual light sources

4 结 论

结合双色 LED 封装技术、彩色全息图分离技术及双波长相位提取技术,提出了一种基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微测量系统,并进行了实验验证。结果表明,该系统可以有效地获取被测样品真实的相位分布和面型分布。该系统与其他双波长数字全息记录系统相比,避免了多个独立光源、可调谐光源或滤光元件的使用,这能够有效简化实验光路和实验过程,降低光源稳定性要求及外界环境因素扰动对测量系统稳定性的影响,提高系统稳定性。

参 考 文 献

- [1] Yuan F, Yuan C J, Nie S P, *et al.* Digital holographic microscopy employing dual-Lloyd's mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104207.
袁飞, 袁操今, 聂守平, 等. 双 Lloyd 镜数字全息显微测量术[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104207.
- [2] Zhao J, Wang D Y, Li Y, *et al.* Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. *Chinese Journal of 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] Pandiyan V P, John R. Optofluidic bioimaging platform for quantitative phase imaging of lab on a chip devices using digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A54-A59.
- [4] Kemper B, Stürwald S, Remmersmann C, *et al.* Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(7): 499-507.
- [5] Deng L J, Yang Y, Shi B C, *et al.* Refractive index distribution and surface profile measurement of micro-optics based on dual wavelength digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312006.
邓丽军, 杨勇, 石炳川, 等. 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[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0312006.
- [6] Wang Y J, Jiang Z Q, Gao Z R, *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.
- [7] Wang Z M, Jiao J N, Qu W J, *et al.* Linear programming phase unwrapping for dual-wavelength digital holography[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 424-433.
- [8] Abdelsalam D G, Magnusson R, Kim D, *et al.* Single-shot, dual-wavelength digital holography based on polarizing separation[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3360-3368.
- [9] Kou Y L, Li E P, Di J L, *et al.* Surface morphology measurement of tiny object based on dual-wavelength digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209010.
寇云莉, 李恩普, 邸江磊, 等. 利用双波长数字全息显微术测量微小物体表面形貌[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209010.
- [10] Zeng Y N, Wang F, Lei H, *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.
- [11] Wada A. Multiple-wavelength holographic interferometry

- with tunable laser diodes[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2053-2060.
- [12] Rinehart M T, Shaked N T, Jenness N J, *et al.* Simultaneous two-wavelength transmission quantitative phase microscopy with a color camera[J]. *Optics Letter*, 2010, 35(15): 2612-2614.
- [13] Min J W, Yao B L, Gao P, *et al.* Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(2): 191-196.
- [14] Jeon S, Cho J Y, Jin J N, *et al.* Dual-wavelength digital holography with a single low-coherence light source[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18408-18416.
- [15] Gass J, Dakoff A, Kim M K. Phase imaging without 2π ambiguity by multiple-wavelength digital holography[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1141-1143.
- [16] Pan W Q, Gong G F, Fan Y F. Low noisy dual wavelength digital holography and application in the ultra-precision machining surface measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(1): 25-31.
- 潘卫青, 龚国芳, 范玉峰. 低噪声双波长数字全息及在超精密加工表面检测中的应用[J]. *光电工程*, 2015, 42(1): 25-31.
- [17] Deng L J, Yang Y, Shi B C, *et al.* Two-step phase-shifting digital holography based on extraction of phase shift[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209014.
- 邓丽军, 杨勇, 石炳川, 等. 基于相移量提取的两步相移数字全息术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209014.
- [18] Gong Q, Qin Y. Extraction of real phase-shifting angle in two-step phase-shifting digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1807-1811.
- 巩琼, 秦怡. 二步相移数字全息中实际相移角的获取[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1807-1811.
- [19] Colomb T, Cuche E, Charrière F, *et al.* Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 851-863.