

相移式反射数字全息显微成像术研究

丁 航^{1,2} 胡翠英^{2,3} 翁嘉文^{1,4} 钟金钢^{1,2}

¹ 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

² 暨南大学光电信息与传感技术广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510632

³ 暨南大学物理系, 广东 广州 510632; ⁴ 华南农业大学理学院, 广东 广州 510642

摘要 针对相移式反射数字全息显微成像技术, 在分析、比较现有的几种相移式反射数字全息装置的基础上, 提出了一种基于改进型的 Linnik 干涉仪的相移式反射数字全息显微装置。这种改进型的 Linnik 干涉仪装置可以实现更高相移精度, 能大大改善显微再现像的质量。为了证明该装置的可行性, 利用该装置, 在实验上实现了 USAF-1951 分辨率板的表面结构的三维显微成像, 获得了清晰、放大的物光波振幅和相位分布。

关键词 全息; Linnik 干涉仪; 四步相移; 表面测量; 微结构

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1209001

Phase-Shifting Digital Holographic Microscopy in Reflection Configuration

Ding Hang^{1,2} Hu Cuiying^{2,3} Weng Jiawen^{1,4} Zhong Jingang^{1,2}

¹ Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

² Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Educational Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

³ Department of Physics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

⁴ College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract An improved Linnik interferometer for phase-shifting digital holographic microscopy in reflection configuration is demonstrated. Some phase-shifting configurations which have been used are analyzed and compared. Higher phase-shifting precision can be achieved in this improved Linnik interferometer, so the microscopic imaging quality can be improved. In experiment, to prove its feasibility, the 3D microscopic imaging of the USAF-1951 target surface structure has been realized, the amplitude and phase distributions of object wave are reconstructed.

Key words holography; Linnik interferometer; four-step phase-shifting; surface measurement; micro-structure

OCIS codes 090.1760; 090.1995; 090.2880

1 引 言

和传统的全息术比较起来, 近年发展起来的数字全息术具有全场、定量、实时和动态成像等优点, 已在多个领域得到广泛应用。数字全息术和传统全息术的区别在于用 CCD、COMS 等电子成像设备代替化学干板记录全息图, 再通过数字再现的方式获得物光波的定量表示。数字再现方法有菲涅耳衍射

积分法^[1]、角谱法^[2]和相移法^[3,4]等。相移数字全息和其他两种方法相比, 有一明显的优点即数字再现光场不会出现 0 级衍射和孪生像。0 级衍射和孪生像的出现, 将对成像形成干扰, 必须通过滤波处理消去 0 级衍射和孪生像。为了更好地消去 0 级衍射和孪生像, 在记录数字全息图时, 必须满足两个孪生像分离的条件, 也就是必须在离轴的情况下记录。离

收稿日期: 2011-07-08; **收到修改稿日期**: 2011-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61077003)和广东省高校优秀青年创新人才培养项目(LYM10036)资助课题。

作者简介: 丁 航(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: dinghang1107@163.com

导师简介: 钟金钢(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn (通信联系人)

轴的角度越大,孪生像分离就越开,干涉条纹也越密。但是受数字全息记录器件 CCD,CMOS 等分辨率低的限制,离轴的角度又不能太大。由于不存在 0 级衍射和孪生像问题,相移数字全息没有这一限制,在同轴的情况下也可实现物光波的重现,这就使得在一些特殊情况下,相移数字全息具有较大的优越性,例如在弱空间相干光数字全息方面,只有在同轴的情况下,才能获得较好的全息图^[5]。

各种半导体芯片的微结构表面形貌特征直接影响其性能,对微结构表面形貌的检测是一项非常重要的工作。传统的 Mirau 干涉仪、Linnik 干涉仪或原子力显微镜需要逐点扫描测量,检测时间过长,已不能满足大规模生产要求。反射式数字全息显微成像技术,在对不透明的微结构表面三维成像方面,由于全场测量特性,相对其他技术具有明显的检测时间短的优势。瑞士的 Christian Depeursinge 小组研制了一种基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪的离轴菲涅耳反射式数字全息显微镜,用于表面粗糙度^[6]、表面微结构的分析^[7]。相移数字全息术已有许多方面的应用,如基于马赫-曾德尔干涉仪的透射式数字全息显微成像技术^[8],但是用于反射式数字全息显微成像方面研究较少,只是 Yamaguchi 小组^[9,10]提出过针对较大物体表面测量的相移反射式数字全息技术。本文针对相移式反射数字全息显微成像技术,在分析、比较现有的几种相移式反射数字全息装置的基础上,提出了一种基于改进型的 Linnik 干涉仪的相移式反射数字全息显微装置。这种改进型 Linnik 干涉仪装置可以实现更高的相移精度,从而能大大改善显微再现像的质量。

2 相移全息术

数字全息图是物光波和参考光波相干叠加的结果,假设物光波为

$$O(x, y) = O_0(x, y)\exp(j\phi_0),$$

参考光波为

$$R(x, y) = R_0(x, y)\exp(j\phi_r),$$

则全息图的强度分布为

$$I = (O+R)(O+R)^* = O_0^2 + R_0^2 + O_0R_0^* \times \exp[j(\phi_0 - \phi_r)] + O_0^*R_0 \exp[-j(\phi_0 - \phi_r)]. \quad (1)$$

(1)式表明全息图中包含有关于被测物体的三种信息:前两项称为 0 级信息,为物光波与参考光波强度的非相干叠加;第三项为全息图的+1 级信息,包含有物光波的振幅、相位信息,是需要获取的信息;第四项为-1 级孪生像,对其再现会产生一个与原始

物体等大、相位相反的虚像。

目前,广泛被采用的去掉 0 级像和-1 级孪生像的方法主要有两种:1)采用离轴光路,使 0 级、+1 级、-1 级三像分离,用滤波窗滤去;2)引入相移技术,其中使用最普遍的是四步相移技术,通过改变参考光光程 $0, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$,使参考光分别具有附加相位 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$,分别和物光波干涉,获得 4 张全息图,对这 4 张全息图做一定运算可消去 0 级和-1 级孪生像。

当改变参考光光程 $\frac{n}{4}\lambda(n=0,1,2,3)$ 时,全息图上的强度分布为

$$I_{n+1} = O_0^2 + R_0^2 + O_0R_0^* \exp\left[j\left(\phi_0 - \phi_r + \frac{n}{2}\pi\right)\right] + O_0^*R_0 \exp\left[-j\left(\phi_0 - \phi_r + \frac{n}{2}\pi\right)\right] = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos\left(\phi_0 - \phi_r + \frac{n}{2}\pi\right). \quad (2)$$

令 $\phi = \phi_0 - \phi_r$, 则有

$$\begin{cases} I_1 = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos \phi \\ I_2 = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_3 = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos(\phi + \pi) \\ I_4 = O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos\left(\phi + \frac{3}{2}\pi\right) \end{cases}, \quad (3)$$

得到物光波在 CCD 面上的复振幅分布为

$$O(x, y) = \frac{1}{4R_0} [(I_1 - I_3) + j(I_4 - I_2)], \quad (4)$$

物光波与参考光波相位差为

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), \quad (5)$$

由(4),(5)式可知,采用四步相移技术能够很好地消除 0 级像和-1 级孪生像,得到物光波的复振幅分布。

根据衍射理论,对四步相移后得到的重建物光波 $O(x, y)$ 做衍射,可得到物光波再现分布。考虑到在显微记录条件下,全息记录面到像面距离可能不满足菲涅耳衍射条件,可采用角谱衍射理论^[2,11]对被测物光场进行再现,系统传递函数为

$$H(f_x, f_y) = \exp[jkd \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}], \quad (6)$$

式中 \mathbf{k} 为波矢, d 为衍射距离, f_x, f_y 为空间频率。则再现物光波复振幅分布为

$$O'(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[O(x, y)] \times H(f_x, f_y)\}, \quad (7)$$

3 相移式反射数字全息显微成像光路的设计

由 Yamaguchi 等^[9,10]提出的基于马赫-曾德尔式的反射式相移光路如图 1 所示,主要用于较大物体的表面测量。

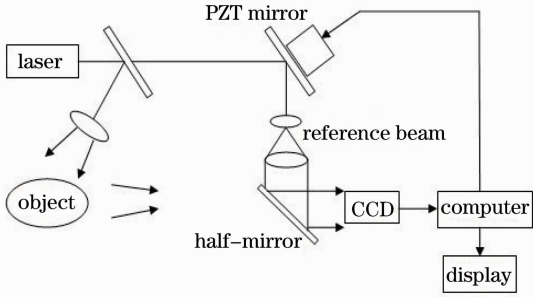


图 1 马赫-曾德尔反射式相移光路图

Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer in reflection phase-shifting configuration

图 1 光路中光通过分光镜分为两束,分别作为物光和参考光,该光路如果用于显微成像的话,至少存在以下两方面的问题:1)显微物镜的工作距离较短,一般在几个毫米以内,显微镜必须放在物体表面附近,将影响光波照射被测的表面;2)该光路通过移动贴附在平面镜后的压电陶瓷(PZT)来改变参考光的光程,进而改变参考光附加相位,如图 2 所示。当进行一次相移时,PZT 驱动平面镜沿法线方向从 M 位置移动到 M1 位置,入射光沿 BC 反射变成沿 AD 反射,显然光束在横向有一个错位,为了保证相移精度,需使得入射光束是一个严格的平行光束,整个波面在相移前后的相位差相同。

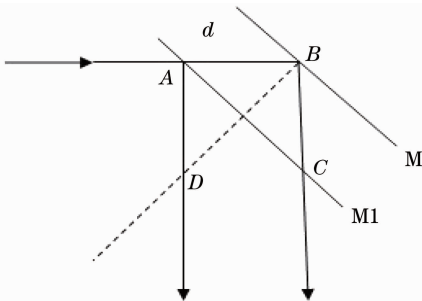


图 2 马赫-曾德尔干涉式光路相移前后光程变化图

Fig. 2 Optical path difference resulting from the phase-shifting in Mach-Zehnder interferometer configuration

传统的 Linnik 干涉仪^[12~14]是迈克耳孙干涉仪的一种变型,它在迈克耳孙干涉仪两臂增加了两个相同的显微物镜,如图 3 所示,主要目的是用来对样品表面进行显微干涉测量。光由光源发出后,通过透镜 L1 会聚后被针孔 PH 滤波,经过透镜 L2 扩束

并形成平面波,再经分光镜(BS)分光后分成两路:一路经显微物镜 MO1 以球面波的形式照射样品表面并反射,通过 MO1 放大后形成物光波经 BS 后到达 CCD 面;另一路经显微物镜 MO2 形成球面波照射平面镜 M 并反射,通过 MO2 放大后形成参考光波经 BS 后到达 CCD 面,两束光波的干涉图样被 CCD 所记录。

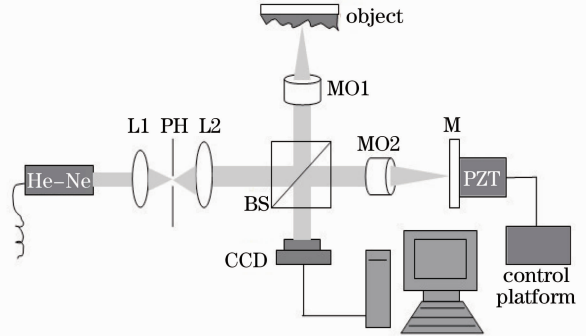


图 3 传统 Linnik 干涉仪光路图

Fig. 3 Traditional Linnik interferometer configuration

要在该传统 Linnik 干涉仪上实现相移测量,最直接的办法是用 PZT 驱动平面镜 M 移动。但是如果显微物镜 MO2 不动,只是移动平面镜 M 的话,由于球面波在同一平面上各点相位皆不相同,将会存在较大相移误差,如图 4 所示。

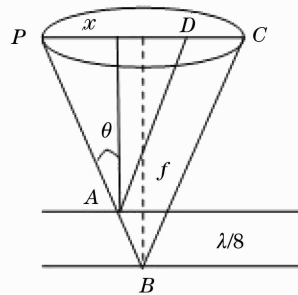


图 4 传统 Linnik 干涉仪相移前后的光程变化简易图

Fig. 4 Optical path difference resulting from the phase-shifting in traditional Linnik interferometer configuration

平面镜 M 被放置于 MO2(焦距为 f)的前焦面上,出射的球面波会聚于平面镜上一点。以出射球面波某截面上任一点 P 为例,设其入射光 PB 与平面镜法线方向夹角为 θ ,截面直径 PC 为 $2d$,按照几何光学理论,在显微物镜的孔径范围内,光从 P 点出发到返回显微物镜上,往返光程为

$$L_0 = \overline{PB} + \overline{BC} = 2 \sqrt{d^2 + f^2}, \quad (8)$$

当进行相移时,假设平面镜移动了 $\lambda/8$ (以使参考光相位角变化 $\pi/2$),往返光程为

$$L_1 = \overline{PA} + \overline{AD} = 2\left(1 - \frac{\lambda}{8f}\right) \sqrt{d^2 + f^2}, \quad (9)$$

则平面镜移动引起的光程差为

$$\Delta L = L_1 - L_0 = -\frac{\lambda}{4f} \sqrt{d^2 + f^2} = -\frac{\lambda}{4\cos\theta}. \quad (10)$$

可见,平面镜移动引起的光程差与光线和平面镜法线的夹角 θ 有关, θ 不同的点,其光程变化也是不同的(只有在中心点光程变化是 $-\lambda/4$, 相位角变化是 $\pi/2$),因此采用此种光路会导致截面上各点的相移量不相同,带来相移误差。

若将显微物镜 MO2 和平面镜 M 组合在一起由 PZT 驱动,那么可以实现同一截面上各点的较精确相移,但操作将相当不便。

基于以上原因,设计了一种改进型的 Linnik 干涉仪,用于相移式反射数字全息显微成像实验,如图 5 所示。

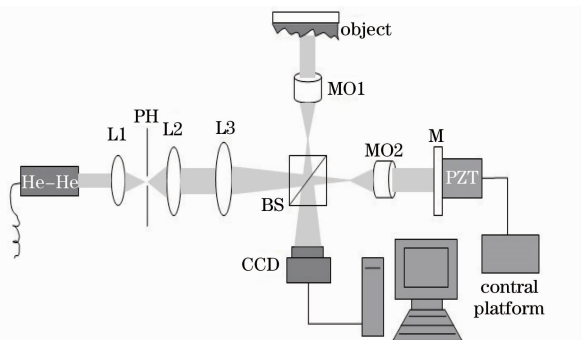


图 5 改进型 Linnik 干涉仪光路图

Fig. 5 Improved Linnik interferometer configuration

在传统的 Linnik 干涉仪光路上再加上一个透镜 L3,使经扩束后的平行光聚焦到显微物镜 MO1 和 MO2 的后焦面上,再经显微物镜,使照射在平面镜和被测样品的光为平面波,这样就可以直接用 PZT 驱动参考平面镜 M 移动,避免了图 3 所示光路的相移误差,或者不必使得显微物镜 MO2 和平面镜 M 组合在一起移动,变得简单易操作。

4 实验结果

实验采用图 5 所示光路,光源为 He-Ne 激光器,工作波长为 632.8 nm;从激光器发出的光经过 L1 会聚后被 $25\ \mu\text{m}$ 孔径的针孔 PH 滤波,通过透镜 L2(焦距 $f=10\ \text{cm}$)准直后变为平面波;再经过透镜 L3(焦距 $f=18\ \text{cm}$)、BS 后形成球面波,分别聚焦于显微物镜 MO1, MO2 ($4\times$, $d_{NA}=0.1$, 筒长 $L=160\ \text{mm}$)的后焦点上;再通过 MO1, MO2 后以平面波形式照射于被测样品(object)及固定于相移装置

PZT 上的平面镜 M,在其表面发生反射并按原路折回,最终以球面波形式干涉形成全息图并被放置在被测物像面位置的 CCD 所记录。其中 BS 分光比为 $50\% \times 50\%$;记录全息图所采用的 CCD 有效像素数为 $720\ \text{pixel} \times 576\ \text{pixel}$,像素尺寸为 $8.33\ \mu\text{m} \times 8.33\ \mu\text{m}$,再现时截取 $512\ \text{pixel} \times 512\ \text{pixel}$ 来进行数据处理。相移装置是普爱纳米位移技术(上海)有限公司的 PZT 位移器,其工作电压范围为 $0\sim 100\ \text{V}$,位移范围为 $0\sim 50\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $1\ \text{nm}$;非线性度为 0.02% 。

实验采用的被测样品为 USAF-1951 分辨率板,以逐次减小参考光光程 $\lambda/4$,拍摄到 4 幅相位相差 $\pi/2$ 的全息图,其中的一幅如图 6 所示。

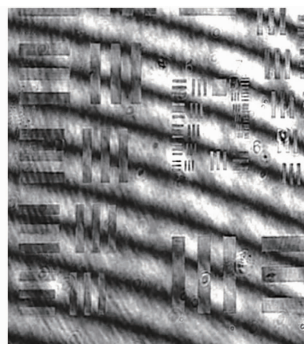


图 6 CCD 所记录的全息图样

Fig. 6 Hologram recorded by CCD

依据(4),(5)式,对所得到的 4 幅全息图进行物光波的数字再现,得到在 CCD 面处的物光波的振幅和包裹相位分布,如图 7 所示。

考虑到 CCD 面的位置不一定是严格的被测物像面位置,作为对比,利用角谱法,依据(6),(7)式,并利用数字切趾术^[15],得到不同衍射距离的再现像的复振幅分布,如图 8 所示。图 8(a)~(d)分别是衍射距离为 1,2,3,5 mm 的再现振幅分布。从图 8 和图 7(a)的比较可知,图 7(a)表示的 CCD 面上的振幅像最清晰,故认为该处最为接近像面位置。

另外,从图 7(c)可看出解包裹相位灰度显示中图像亮度明显不均匀,下部明显较亮,出现了明显的倾斜,这是源于被测分辨率板固定时板面出现倾斜,使得其反射面与参考光反射面存在一定夹角。图 6 全息图中出现稍弯曲的干涉条纹,也验证了分辨率板面倾斜导致两干涉球面波不同轴。基于此,利用傅里叶变换条纹相位分析技术对其做消倾斜处理,得到结果如图 9 所示。

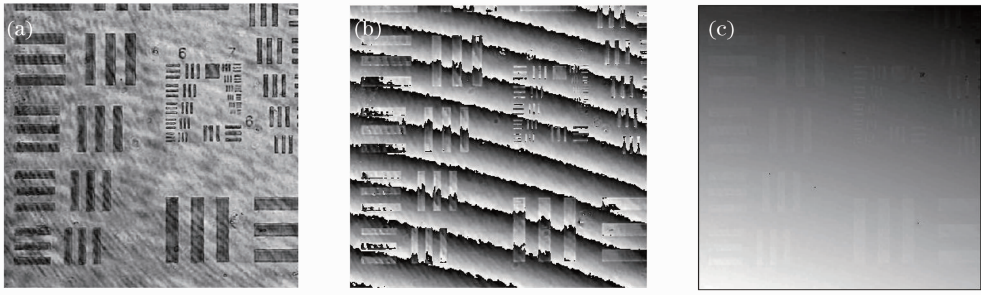


图 7 基于相移技术所得物光波的振幅、包裹相位信息。(a)物光波在 CCD 面上的振幅分布;(b)包裹相位分布;
(c) CCD 面处的解包裹相位分布

Fig. 7 Amplitude and wrapped phase distributions of object wave obtained via phase-shifting. (a) Amplitude distribution of object wave at CCD plane; (b) wrapped phase distribution; (c) unwrapped phase distribution at CCD plane

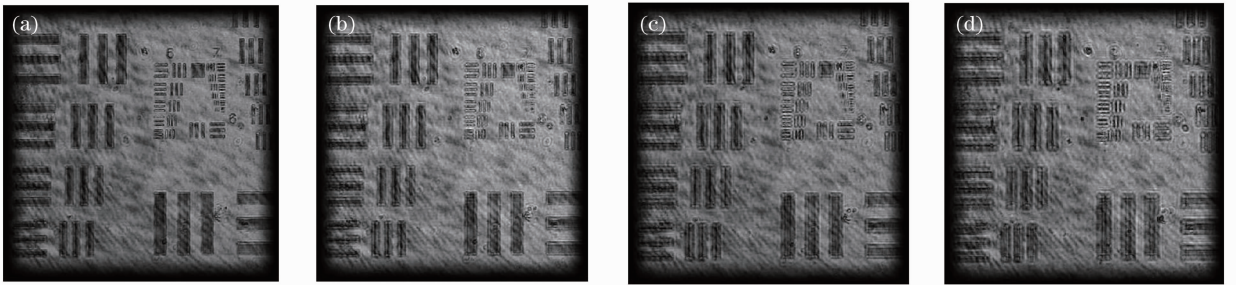


图 8 基于改进型 Linnik 干涉仪的相移数字全息显微光路的数值再现过程。对应衍射距离分别为(a) $z=1$ mm, (b) $z=2$ mm, (c) $z=3$ mm, (d) $z=5$ mm 时的振幅分布

Fig. 8 Reconstruction processing based on the improved Linnik interferometer configuration. Reconstructed amplitude distribution of the diffraction distances are (a) $z=1$ mm, (b) $z=2$ mm, (c) $z=3$ mm, (d) $z=5$ mm respectively

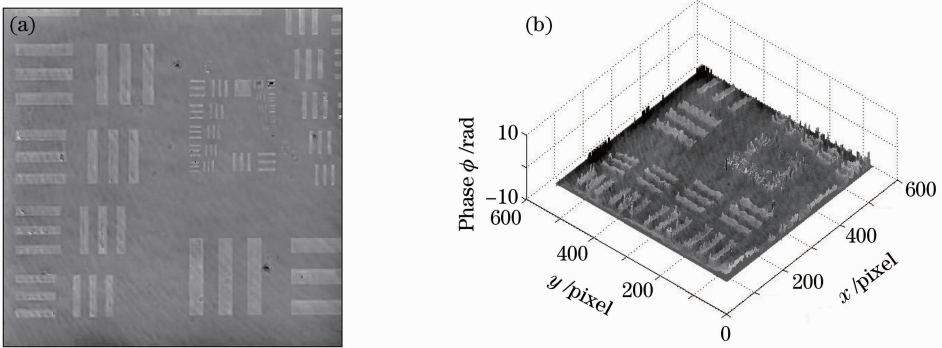


图 9 消倾斜后的结果。(a)解包裹相位分布;(b)解包裹相位三维分布图

Fig. 9 Reconstruction after removing inclination angle. (a) Unwrapped phase distribution; (b) three-dimensional figure of the unwrapped phase distribution

可以看到,消除分辨率板板面倾斜后,所得到的相位图亮度已十分均匀,三维分布也显示板面倾斜状况已得到良好修正。

作为对比,采用图 3 传统 Linnik 光路所得到的

再现像如图 10 所示,图 10(a)为 CCD 面处的再现振幅,图 10(b)为包裹相位。由图可见,由于存在的相移误差,再现振幅、包裹相位和图 7(a),(b)相比,图像清晰度明显要差,此亦验证了上面的推断。

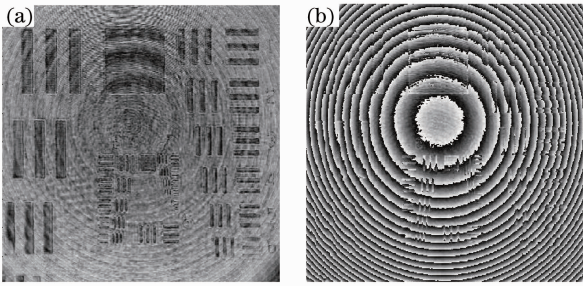


图 10 基于传统 Linnik 干涉仪的实验结果。(a) CCD 面处的再现像振幅分布;(b)包裹相位分布

Fig. 10 Experimental results achieved based on traditional Linnik interferometer configuration. (a) Amplitude distribution of object wave at CCD plane; (b) wrapped phase distribution

5 结 论

为了实现相移式反射数字全息显微成像,设计出了一种基于改进型的 Linnik 干涉仪的反射数字全息显微光路。在此光路基础上,对 USAF-1951 分辨率干板进行预放大波前记录,并采用相移技术和角谱法对数字全息图进行了数值再现,得到了清晰的再现像。实验证明,采用此种光路,可方便地在反射数字全息显微成像技术中实现相移测量,有望在半导体芯片等微结构表面的三维成像方面得到应用。

参 考 文 献

- 1 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-holograms [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 2 L. Yu, M. K. Kim. Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2092~2094

- 3 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 4 M. Chang, Ch. P. Hu, P. Lam *et al.*. High precision deformation measurement by digital phase shifting holographic interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(22): 3780~3783
- 5 Qin Yi, Zhong Jingang. Theoretical and experiment research of digital holography with partially coherent light based on light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2236~2241
- 秦 怡, 钟金钢. 基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2236~2241
- 6 F. Charrière, J. Kühn, T. Colomb *et al.*. Characterization of microlenses by digital holographic microscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 829~835
- 7 T. Colomb, S. Krivec, H. Hutter *et al.*. Digital holographic reflectometry[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3719~3731
- 8 T. Zhang, I. Yamaguchi. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1221~1223
- 9 I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota *et al.*. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(29): 7610~7616
- 10 I. Yamaguchi, S. Ohta, J. Kato. Surface contouring by phase-shifting digital holography[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2001, **36**(5): 417~428
- 11 C. J. Mann, L. Yu, C. Lo *et al.*. High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8693~8698
- 12 Xie Yongjun, Shi Tielin, Liu Shiyuan *et al.*. Measuring dynamic characterization of micro-structures with Linnik microscopic interferometry[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2009, **36**(4): 4~6
- 谢勇君, 史铁林, 刘世元 等. 利用 Linnik 显微干涉技术测量微结构动态特性[J]. *计量与测试技术*, 2009, **36**(4): 4~6
- 13 B. Kemper, S. Stürwald, C. Remmersmann *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 Engng.*, 2008, **46**(7): 499~507
- 14 N. Warnasooriya, M. K. Kim. LED-based multi-wavelength phase imaging interference microscopy[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 9239~9247
- 15 Zhang Yancao, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Application of apodization digital holography in phase measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1602~1606
- 张延曹, 赵建林, 范 琦 等. 切趾数字全息术在相位测量中的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1602~1606

栏目编辑:何卓铭