

光刻对准中干涉条纹相位解析研究

徐 锋^{1,2} 胡 松¹ 周绍林^{1,2} 徐文祥¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对光刻对准中双光栅产生的具有多频率的干涉条纹, 提出了一种基于二维解析小波变换进行条纹分析的方法。该方法首先通过二维小波变换的多尺度对条纹的多频率进行分析, 并通过解析小波基函数将条纹的幅度与相位进行分离, 最终通过二维小波脊方法提取出与偏移量相关的相位。在相位提取的同时通过二维小波脊所处点的角度分布来移除封闭条纹处理中常见的相位符号不确定性。数值模拟与实验验证了该方法的可行性并与传统的基于频域的相位分析方法进行了对比分析。结果表明, 该方法能在获得所需相位信息的同时较好地滤除掉由光路抖动引起的噪声, 具有很强的适应性。

关键词 测量; 相位解析; 二维解析小波变换; 二维小波脊; 封闭条纹

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0212001

Interference Fringe Pattern Phase Analysis in Alignment of Nanolithography

Xu Feng^{1,2} Hu Song¹ Zhou Shaolin^{1,2} Xu Wenxiang¹

(¹ Institute Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The fringe pattern analysis method based on the two-dimensional (2D) analytic wavelet transform (AWT) is proposed for the interference fringe pattern with multi-frequency that occurs in two grating marks in alignment of nanolithography. The multi-frequency of fringe is analysed by the multi-scale of the 2D wavelet transform (WT) first. The separation of the amplitude and phase is processed by the analytic wavelet basis function. The phase correlating to the offset is extracted through the 2D wavelet ridge method finally. The sign ambiguities which always occur in the process of analyzing closed fringe pattern are removed through the discontinuities of the angel in the 2D wavelet ridge. The feasibility of the method is verified by numerical simulation and experiment, and the comparisons of the traditional frequency-based phase analysis method are given. The results show that the noises brought by the fluctuation in the optical path in the fringes can be filtered effectively at the course of acquiring the phase information through the method with good adaptability.

Key words measurement; phase analysis; two-dimensional analytic wavelet transform; two-dimensional wavelet ridge; closed fringe

OCIS codes 120.5050; 220.1140; 100.5070; 100.3008

1 引 言

近年来, 纳米技术得到快速发展并已被广泛应用, 正日益成为 21 世纪备受关注的的前沿领域。作为纳米技术的基础, 纳米器件的制造对高分辨力光刻

技术的需求越来越迫切。另外, 随着高集成度电路以及相关器件的研发, 集成电路 (IC) 特征尺寸愈来愈小, 对光刻分辨力要求也越来越高。如何提高光刻的分辨力成为业界关注的热点问题。光刻对准技

收稿日期: 2011-05-13; **收到修改稿日期**: 2011-08-25

基金项目: 国家 863 计划 (2009AA03Z341) 和国家自然科学基金 (60976077, 60906049, 61076100) 资助课题。

作者简介: 徐 锋 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光刻对准及条纹图像处理等方面的研究。

E-mail: casxufeng@gmail.com

导师简介: 胡 松 (1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事微细光学技术微电子专用设备方面的研究。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

术作为光刻的三大核心技术之一^[1],是影响光刻分辨率的重要因素之一。提高对准精度是提高光刻分辨率的一个重要途径。基于光栅调制空间相位成像的纳米级对准方法^[2,3],理论上能达到较高的对准精度且具有最好的抗干扰能力,而条纹图像空间相位信息的提取是该方法一个必需且重要的环节,也是直接影响系统对准精度和效率的关键因素。

通常,对于光学干涉条纹图像处理,相移方法^[4~7](Phase-shift)、归一化相位跟踪方法(RPT)^[8]、傅里叶变换方法(FT)^[9]、窗口傅里叶变换方法(WFT)^[10~12]和小波变换方法(WT)^[13~18]等是几种比较典型的相位分析方法。其中,相移方法是通过几幅与原图像有关的相移图像来提取相位信息,算法简单、速度快,然而相移过程常常引入较大误差及实际应用中难以获取相移图像的弱点限制了该方法的广泛应用。归一化相位跟踪方法则是将条纹图看作一个具有特定分布的相位场,建立相应的关于每个像素处相位和频率值的能量函数模型,根据该模型用迭代方法逼近、估计图像的相位和频率信息,可获取平滑的相位场,然而复杂的模型及参数人为控制是该方法的不足。傅里叶变换的方法对图像作整体频域处理和恢复,速度较快,但在噪声滤除的同时引起条纹图的局部信息的损失,且难以提取局部相位信息。窗口傅里叶变换通过窗口函数对干涉条纹图选取一部分进行傅里叶变换,再移动窗口函数对整个条纹图进行扫描,从而获得整个条纹图的相位。窗口傅里叶变换方法结合了空间相移法和傅里叶变换法的优点,既考虑了局部细节,又考虑到整体关系,具有较好的精度和较广的应用范围,但其窗口尺寸一旦确定就无法改变,不适合于条纹频率变化的情况。一维连续小波变换则是利用特定的小波基函数与图像做卷积或相关,得到的小波系数幅值最大之处被称为‘小波脊’,再通过小波脊可以计算出各点的相位等其他信息,具有较强的自适应能力,但其也易受到噪声的影响,对精度有较大影响。

本文针对光刻对准中圆光栅产生的单幅封闭干涉条纹图,提出了通过二维解析小波变换(AWT)进行滤波和二维小波脊进行相位提取的方法。在完成相位提取的同时能较好地抑制噪声,同时针对在相位提取过程中存在的相位符号不确定性,提出了通过角度的不连续点进行修复的方法。首先将对准中干涉条纹的产生与相位变化与非对准偏移的关系进行了介绍,再对二维解析小波变换的理论进行分析,最后通过数值模拟和实验对该方法的可行性进行了验证。

2 理 论

2.1 对准干涉条纹

基于光栅调制空间相位成像纳米对准方法是采用了两周期接近的圆形微光栅作为掩模和硅片上的对准标记,将掩模与硅片的相对位置变化反映到条纹图像的空间相位变化中,通过 CCD 采集到干涉条纹图像,再解析条纹图像的空间相位信息,可以获得掩模与硅片的相对位移信息,用于进一步的对准。图 1 显示了基于光栅调制空间相位成像接近式纳米对准示意图。

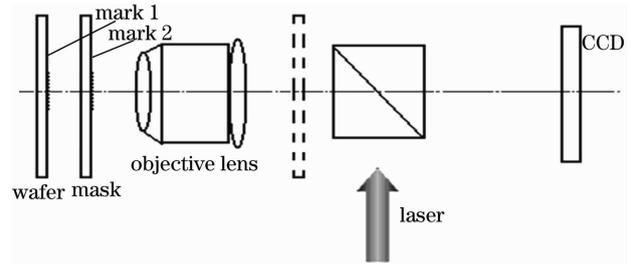


图 1 接近式光刻掩模硅片对准示意图

Fig. 1 Schematic of wafer-mask alignment in the proximity lithography

图 2 为对准中掩模和硅片上光栅标记和对应产生的条纹图像。当这两组如图 2(a), (b) 所示的光栅标记对准重合时,经过放大将产生如图 2(c), (d) 所示的条纹。这两组光栅标记对应的微米级周期分别为 T_1, T_2 , 其中图 2(c) 表示掩模硅片未对准时的条纹分布图像,图 2(d) 表示两标记完全对准时的条纹分布图像。

通常,条纹图像可表示为

$$f(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \varphi(x, y), \quad (1)$$

式中 $f(x, y), a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示条纹强度,背景强度和条纹的调制度。 $\varphi(x, y)$ 为所要提取的相位信息。图 2(c), (d) 中条纹的相位可分别表示为

$$\varphi_1(x, y) = 2\pi \left[f_1 \sqrt{(x - \Delta x)^2 + y^2} - f_2 \sqrt{x^2 + y^2} \right], \quad (2)$$

$$\varphi_2(x, y) = 2\pi \left[f_1 \sqrt{x^2 + y^2} - f_2 \sqrt{x^2 + y^2} \right], \quad (3)$$

式中 $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$ 分别为硅片标记和掩模标记未对准和完全对准时的相位分布, $f_1 = 1/T_1$ 和 $f_2 = 1/T_2$ 分别为两标记光栅的空间频率, Δx 是两光栅标记沿 x 方向的位移^[2]。从中可看出光栅标记的非对准偏移量与条纹图的相位偏移存在一定的关系,特别在条纹的对称轴,即 y 为零时,其关系可表示为

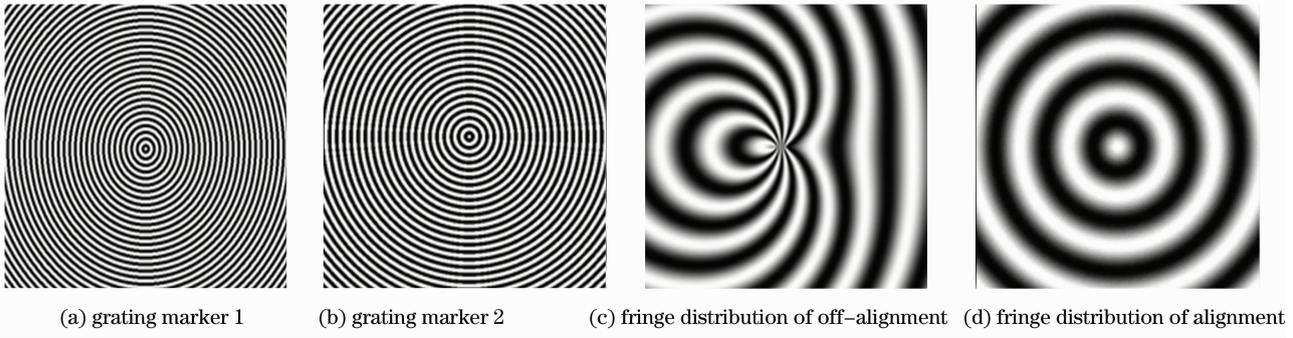


图 2 两组光栅标记及相应的条纹

Fig. 2 Two group grating marker and the corresponding fringe

$$\varphi_1(x, 0) = \begin{cases} 2\pi[(f_1 - f_2)x - f_1 \Delta x] & x \geq \Delta x \\ 2\pi[-(f_1 + f_2)x + f_1 \Delta x], & 0 \leq x < \Delta x \\ 2\pi[-(f_1 - f_2)x + f_1 \Delta x] & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,假定 Δx 为恒大于零。从(4)式可看出,当两标记光栅发生一定的非对准偏移量,即 $0 \leq x < \Delta x$ 时,条纹的相位偏移与其呈现线性关系。因此相位分析是取得非对准偏移量的前提以及重要条件。

2.2 二维解析小波变换

二维连续小波变换的定义为

$$W_f(a, b, s, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \psi_{a, b, s, \theta}(x, y) dx dy, \quad (5)$$

$$\psi_{a, b, s, \theta}(x, y) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, \theta\right), \quad (6)$$

式中 $f(x, y)$ 为二维输入信号, $\psi_{a, b, s, \theta}(x, y)$ 为母小波函数 $\psi(x, y)$ 分别在 x 和 y 方向上平移 a 和 b 距离,并通过尺度 s 伸缩和角度 θ 进行旋转获得的小波序列。其幅值和相位分别表示为

$$A(a, b, s, \theta) = \sqrt{[\operatorname{Re} W_f(a, b, s, \theta)]^2 + [\operatorname{Im} W_f(a, b, s, \theta)]^2}, \quad (7)$$

$$\varphi(a, b, s, \theta) = \arctan \frac{\operatorname{Im} W_f(a, b, s, \theta)}{\operatorname{Re} W_f(a, b, s, \theta)}. \quad (8)$$

从图 2(c)中,可看出掩模和硅片的相对位移与条纹的不同频率变换有关,因此在进行相位提取时应当对每个特定的频率都进行分析。而被誉为信号分析显微镜的小波变换因其多尺度特性对多频率分析具有较强的适应性。为了获得频率变换的相位,需要用解析小波将信号的相位和幅度信息分离,而解析小波通常可以通过一个实对称窗函数的频率调制来构造。Gabor 小波是通过高斯窗函数进行频率调制得到的,因此其属于解析小波范畴,而且在空频两域都具有较好的局部化性能,本文中选取 Gabor

小波进行二维扩展来获得母小波,其形式为

$$\psi(x, y) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} \exp\left(-\frac{(2\pi/\gamma)^2(x^2 + y^2)}{2}\right) \times \exp[j2\pi(x \cos \theta + y \sin \theta)], \quad \gamma = \pi \sqrt{\frac{2}{\ln 2}}, \quad (9)$$

式中 γ 为归一化参数, θ 为二维小波变换中旋转的角度。解析小波变换的实质是描述输入信号与小波序列的内积关系,即两个函数的相似程度。当被测信号的局部相位和方向与相应二维小波序列函数的尺度和方向相同和相近时,小波变换的系数达到最大值为‘脊’。在点 (a, b) 处使得相似程度达到最大时的局部尺度与角度可表示为 s^* 和 θ^* 。这样,通过小波基函数的伸缩与旋转,条纹图像所有点的局部尺度和角度都可以获得。(9)式表示当幅度谱 $A(a, b, s^*, \theta^*)$ 达到最大值幅度和角度(s 和 θ) 取得值 s^* 和 θ^* ,

$$[s^*(a, b), \theta^*(a, b)] = \arg \max A(a, b, s^*, \theta^*), \quad (10)$$

$r(a, b) = |W_f[a, b, s^*(a, b), \theta^*(a, b)]|$, (11) (10)式表明了二维小波脊处所对应的幅度值。然后通过提取该幅值处对应的相位值,即为所求解的相位。提取出的相位具有包裹性,需要进一步的相位展开。

3 数值模拟

通过数值模拟可生成周期分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 的圆形微光栅,其形式如图 2(a), (b)所示。其中 T_1, T_2 分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 。并模拟了 20 倍条

纹放大镜头,当两光栅叠加产生一定位移则生成的非对准条纹如图 3(a)所示,其尺寸设为 $256 \text{ pixel} \times$

256 pixel 。由图可知,条纹中心相位发生了偏移,该偏移量即为两标记的非对准偏差有关。

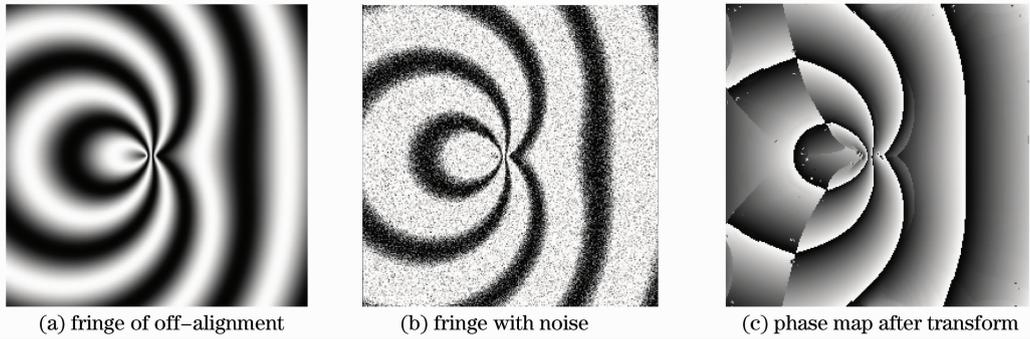


图 3 非对准条纹、带有噪声条纹与变换后的相位图

Fig. 3 Fringe of off-alignment, fringe with noise and phase map after transform

由于在图像采集过程中,不可避免的会受到外界噪声、光路抖动等因素的干扰,从而会影响到相位提取精度,因此模拟中采用了对其加入均值为 0,标准偏差为 0.5 的均匀高斯白噪声进行分析,如图 3(b)所示。通过对噪声条纹图应用二维解析小波变换并通过二维小波脊方法提取得到非对准相位图如图 3(c)所示。从图中可发现,条纹图中的噪声被较好的滤除,对相位没有造成影响。然而相位分布左右两边却存在符号不确定性。经过仔细分析之后,这种符号不确定性不是随机产生的,相位不确定性的边界就是二维小波脊处角度的不连续线。因此通过检测

到角度的不连续线,并对不连续线左右任意一边的相位乘 -1 ,即可移除相位不确定性。图 4(a)为角度分布图,图 4(b)和(c)分别是角度分布中横向和纵向的不连续边界图,通过这两幅不连续图可以确定相位不确定性的分界线与条纹图的对称线。通过沿着条纹对称线的方向可应用前面所述方法可准确移除不确定性。图 4(d)是相位不确定边界被移除后的相位图。从图中可看出相位的边界和角度的不连续线具有相同的轮廓,而分界线移除后的相位图具有较好的效果。

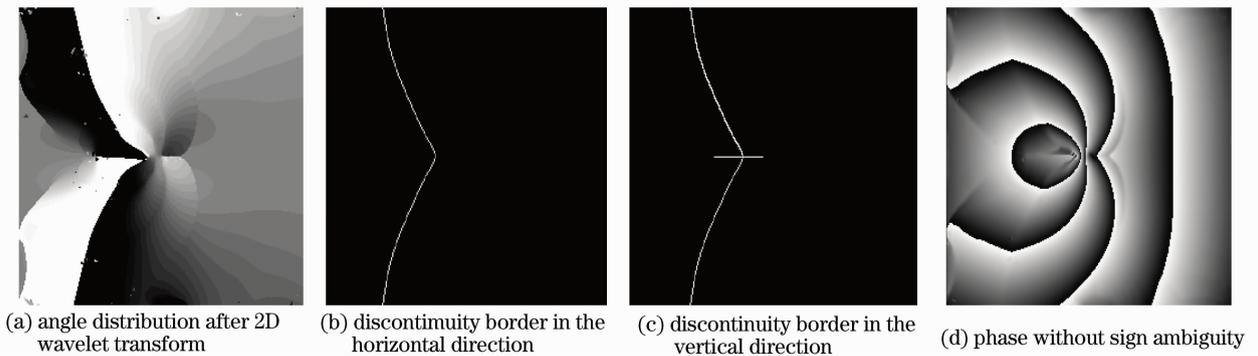


图 4 仿真中二维小波变换后角度分布,不连续边界图,移除符号不确定性后相位图

Fig. 4 Angle distribution after 2D wavelet transform, discontinuity border and the phase without sign ambiguity

为了进行对比,对数值模拟中如图 3(b)所示的单幅封闭噪声条纹分别运用二维傅里叶变换方法,二维加窗傅里叶变换方法和一维小波变换方法进行了相位提取。最终获得的相位分布图如图 5 所示。

与经过二维解析小波变换方法处理后的相位分布图相比较,可知经二维傅里叶变换方法处理后的相位因滤波过程中细节频谱的丢失而变化较大,较

难进行相位恢复。经二维加窗傅里叶变换方法处理后的相位具有真实相位的轮廓,但因受到噪声影响在相位截断部分的边缘比较模糊不清,对进一步的相位展开过程提出了很大的要求。而经一维小波变换方法处理后的相位分布也具有真实相位的轮廓,但仍然受到噪声的影响,以至于影响进一步的相位展开。

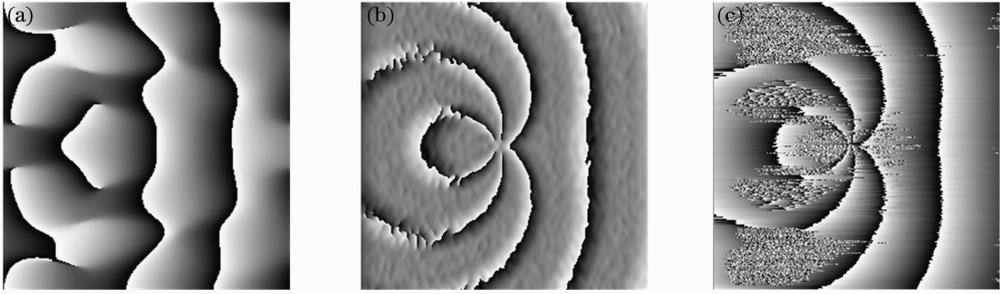


图 5 模拟条纹经(a) 2D FT, (b) 2D WFT 和(c) 1D WT 处理后的相位分布

Fig. 5 Phase distribution after processing by 2D FT (a), 2D WFT (b) and 1D WT (c) in simulated fringe

4 实验与精度分析

为了验证相位提取方法在实际应用中的有效性,依据图 1 所示的对准示意图搭建了实验平台。通过 CCD 采集到的条纹如图 6(a)所示,其图像尺寸仍然为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。从图中可看出光学抖动与硅片工艺等所引入的噪声对条纹具有较大的影响。

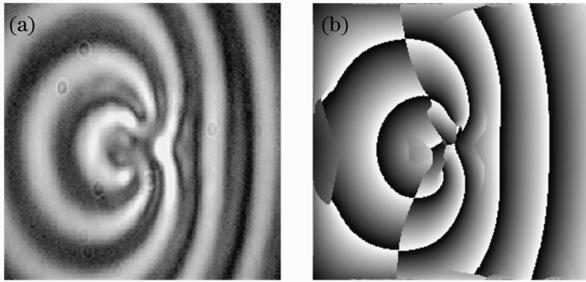


图 6 (a)实验中未对准的条纹与(b)经 2D 解析小波变换处理后的相位

Fig. 6 Fringe of off-alignment in experiment (a) and the phase after processing by 2D analytic waveler transform (b)

通过本文所提出的二维解析小波变换方法对其进行处理,获得的相位分布图如图 6(b)所示。从图

中可看出噪声被滤除掉,但仍然有带有相位符号不确定性,而在二维小波脊处的角度分布图、角度在水平与垂直方向的不连续边界图分别如图 7(a)~(c)所示。运用前述方法移除了符号不确定性的相位分布如图 7(d)所示。

从图中可看出,本文提出的方法能较好的滤除噪声并提取出相位,也对如图 6(a)所示的实验条纹分别运用二维傅里叶变换方法、二维窗口傅里叶变换方法和一维小波变换方法进行处理。其中图 8(a), (b), (c)分别经各方法处理后的相位图。从各相位图的分布来看,与其对应数值模拟条纹中经各方法处理后具有相同的缺点。

由本次对准系统采用的 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 的圆形微光栅,20 倍条纹放大成像镜头,以相位偏移的提取精度 0.01 rad 为例,通过(4)式可得出系统的对准精度大致为

$$\Delta x = \frac{0.01 \times 10 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}}{2\pi \times |10 \mu\text{m} + 11 \mu\text{m}|} \approx 8 \text{ nm}. \quad (12)$$

如果系统采用周期更小的圆形微光栅结合更高倍率的条纹放大成像镜头,其对准精度可达到亚纳米级。



(a) angle distributio after 2D AWT (b) discontinuity border in the horizontal direction (c) discontinuity border in the vertical direction (d) phase without sign ambiguity

图 7 实验中经 2D AWT 后角度分布,不连续边界图,移除符号不确定性后相位图

Fig. 7 Angle distribution after 2D AWT, discontinuity border and the phase without sign ambiguity in experiment

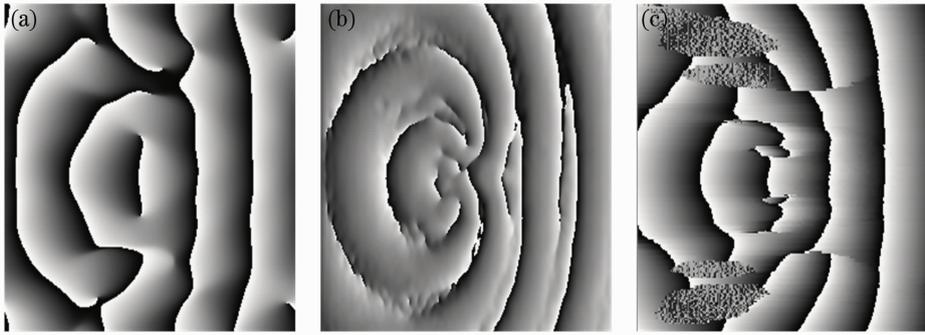


图 8 实验条纹经 2D FT(a), 2D WFT (b)和 1D WT (c)处理后的相位分布

Fig. 8 Phase distribution after processing by 2D FT (a), 2D WFT (b) and 1D WT (c) in experimental fringe

5 结 论

针对纳米光刻对准中双光栅叠加所产生的单幅封闭条纹图,提出了一种相位提取方法。通过尺度和角度变化的二维解析小波变换来滤除噪声与二维小波脊方法获得条纹中的有效相位,同时还通过二维小波脊处各点角度分布来移除在相位提取中产生的不确定的符号变化。本文对二维小波变换进行条纹相位提取进行了理论分析,并通过数值模拟和实验两方面对该方法进行了验证。从文中可看出,对于单幅的封闭条纹,与传统的二维傅里叶变换方法、二维窗口傅里叶变换方法和一维小波变换方法相比,二维解析小波变换与二维小波脊相结合的方法能更好地抑制噪声,并且提取出有效相位。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Micro-Nanofabrication Technology Based Optical Projection Exposure [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 61~68
姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2006. 61~81
- 2 Shaolin Zhou, Yongqi Fu, Xiaoping Tang *et al.*. Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7869~7880
- 3 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706
周绍林, 杨勇, 陈旺富等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 702~706
- 4 R. A. Nicolaus. Precise method to determine systematic errors in phase-shifting interferometry on Fizeau interferences[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(31): 6380~6386
- 5 P. D. Groot. Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2856~2863
- 6 J. Schwider, O. Fallkenstorfer, H. Schreiber *et al.*. New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(8): 1883~1885

- 7 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67
钱克矛, 缪泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 64~67
- 8 M. Servin, J. L. Marroquin, F. J. Cuevas. Demodulation of a single interferogram by use of a two-dimensional regularized phase-tracking technique [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(19): 4540~4548
- 9 Mitsuo Taketa, Hideki Ina, Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 10 Qian Kemao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(18): 2695~2702
- 11 Qian Kemao. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principle, applications, and implementations [J]. *Opt. & Lasers Eng.*, 2007, **45**(2): 304~307
- 12 Qian Kemao. A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform: a note on the threshold selection [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2008, **40**(8): 1091~1098
- 13 Wen Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier-fringe patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
翁嘉文, 钟金刚. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 454~459
- 14 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **30**(19): 2560~2562
- 15 H. Liu, A. N. Cartwright, C. Basaran. Moire interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 850~857
- 16 Michael Liebling, T. F. Bernhard, A. H. Bachmann. Continuous wavelet transform ridge extraction for spectral interferometry imaging[C]. *SPIE*, 2005, **5690**: 397~402
- 17 L. R. Watkins, S. M. Tan, T. H. Barnes. Determination of interferometer phase distributions by use of wavelets[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13): 905~907
- 18 Zheng Suzhen, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase analysis based on complex Morlet wavelet [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(4): 73~76
郑素珍, 陈文静, 苏显渝. 基于复 Morlet 小波的相位分析[J]. *光电工程*, 2007, **34**(4): 73~76

栏目编辑:谢婧