

对包络变化及移相误差不敏感的宽带光八步移相算法

韩志刚¹, 陈磊^{1,2}

- (1. 南京理工大学 先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 提出了一种用于测量微观表面三维形貌的宽带光八步移相算法。该算法通过定位宽带光干涉条纹的零相位差位置实现微观轮廓的测量。计算宽带光移相干涉信号中相邻采样点的相位差得到实际移相间隔, 从而实现实际移相量的在线标定以及移相误差的校正。分析了倾斜 SiC 平面的移相干涉条纹, 计算结果的标准均方差为 1.646 nm, 与不存在移相误差时的计算结果吻合。宽带光八步移相算法对干涉包络的变化不敏感, 能够抑制移相误差, 是一种实用、高精度的微观表面轮廓测量方法。

关键词: 光学测量; 宽带光干涉; 显微测量术; 移相术

中图分类号: TH741.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1236-07

Eight-step phase shifting algorithm for broadband light interferometry insensitive to envelop variation and phase shifting error

Han Zhigang¹, Chen Lei^{1,2}

- (1. Advanced Lanching Co-innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An eight-step broadband light phase shifting algorithm was proposed for the determination of three dimensional micro textures. The actual phase step was calibrated to eliminate the phase shifting error, from the difference between the phase values of two neighbored sampling of the broadband light interference signal. The microscopic interference fringes with phase shifting error of the oblique SiC flat were analyzed. The standard deviation is 1.646 nm, showing excellent agreement with the result obtained without phase shifting error. The proposed method, insensitive to envelop variation and phase shifting error of the interference signal, is practical and accurate for understanding three dimensional micro textures.

Key words: optical testing; broadband interferometry; microscopy; phase shifting technique

收稿日期: 2014-08-10; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1231111, 61108041)

作者简介: 韩志刚(1986-), 男, 博士生, 主要从事精密光学测试技术方面的研究。Email: hannjust@163.com

导师简介: 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学测试技术方面的研究。Email: chenlei@njjust.edu.cn

0 引言

移相干涉术是一种计算机辅助轮廓测量技术,具有纳米级轮廓测量精度,广泛应用于光学车间中以评价光学元件的表面质量^[1-2]。然而,传统单色光移相干涉术受到单色光干涉信号级次模糊的限制,被测件相邻轮廓点的高度差需低于1/4波长。采用宽带光照明干涉系统能够避免这一缺陷。基于宽带光干涉的微观表面轮廓仪也因此得到了广泛的应用^[3]。

宽带光干涉信号可看成是具有干涉包络的单色光干涉信号。早期的宽带光干涉定位算法通过定位干涉包络的中心来实现表面轮廓的恢复^[4]。P. Sandoz 等指出干涉包络对光程差的变化并不十分敏感。相比之下,宽带光干涉信号自身对光程差变化的敏感度更高。因此,基于干涉相位的宽带光干涉算法能够获得更高的定位精度^[4-11]。常用的相位定位算法包括宽带光移相算法^[4-6]、空间频域算法^[7]、窗口傅里叶变换算法^[8]、小波变换算法^[9]等,其中宽带光移相算法所需数据量少,计算速度快,被广泛地研究和应用。

基于移相算法恢复干涉信号的相位需要基于两个假设:(1)干涉光强的调制度在移相过程中保持一致,(2)移相过程中的相位间隔为 $\pi/2$ 。但宽带光显微干涉系统的移相过程中,这两个假设很难满足。首先,由于时间相干性的影响,宽带光干涉信号各级次干涉条纹的调制度明显不同,因此,采用传统的移相方式(移动参考镜或被测件)无法保证移相过程中调制度恒定,由此引起测量误差^[10]。其次,宽带光干涉信号的周期不仅与光源的中心波长,还与系统中光学元件的光谱透射/反射率、探测器的光谱响应以及显微物镜的数值孔径等有关。因此,即使知道光源的中心波长也很难保证 $\pi/2$ 的移相间隔。研究者们进行了大量的研究以校正由这两方面引起的测量结果偏差。

为了抑制干涉包络引起的计算误差,P. Hariharan 等提出了无色散移相技术^[11-12],能够在移相过程中保证干涉信号的调制度恒定,理论上抑制了调制度误差。但该技术需要在传统的干涉显微系统中引入偏振分光装置及偏振移相装置。P. Sandoz 等^[4]假设宽带光干涉条纹的局部调制度依线性变化,提出了基于七步移相的宽带光移相算法,相位的计算精度

达到了0.01 rad。

一些高级的移相算法能够校正单色光干涉系统中的移相误差,但宽带光移相系统中,即使采用这些高级的移相算法也无法很好的校正移相误差带来的“纹波”,必须标定移相器来实现移相误差的校正^[13]。传统单色光干涉系统的移相器的标定可通过对时域或空域干涉信号的傅里叶分析实现,宽带光干涉系统的移相器也可依类似的思想实现^[14]。但这种标定方法是对移相器的预标定,只能在测量前进行,且标定需要采集很多时变干涉信号。J. Schmit 等^[13]提出了宽带光移相干涉术相移误差的在线校正算法,通过六个光强值实现移相误差的在线校正,但该算法并未考虑移相过程中干涉包络变化的影响。

文中提出宽带光八步移相算法,旨在抑制宽带光干涉仪中移相误差以及干涉包络变化引起的测量误差。

1 原理

文中以显微干涉系统说明宽带光八步移相算法。如图1所示,光源经过科勒照明系统照明到干涉

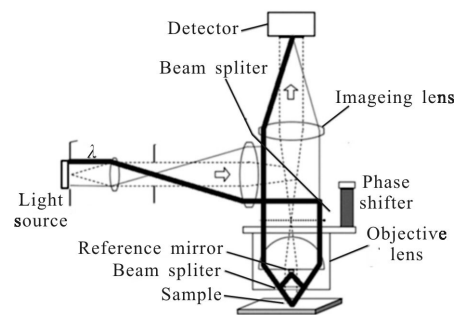


图1 宽带光显微干涉系统

Fig.1 Broadband light microscopic interference system

显微物镜的分光镜上,形成参考光和测试光,它们分别经参考镜和测试镜反射后汇聚在探测器的靶面上形成宽带光干涉条纹。通过移相器移动干涉显微物镜改变参考光和测试光的光程差。探测器上各像素点的宽带光干涉信号随光程差的变化可记作^[4]:

$$I(\varphi) = A + B \exp(-E\varphi^2) \cos \varphi \quad (1)$$

式中: A 为常数,表示干涉信号的背景分量; $B \exp(-E\varphi^2)$ 为宽带光干涉信号的对比度, B 为常数,参数 E 与系统的中心波数及带宽相关, φ 为中心频率处参考光和测试光的相位差。宽带光干涉信号的调制度随相

位差 φ 变化。因此宽带光干涉能够避免单色光干涉信号相位级次模糊的缺陷。 E 和 φ 分别具有如下形式:

$$E = -\left(\frac{\Delta\nu}{2\nu_m}\right)^2 \quad (2a)$$

$$\varphi = 2\pi\nu_m z \quad (2b)$$

式中: ν_m 为系统中心波数; $\Delta\nu$ 为系统带宽; z 为参考光和测试光的光程差。

图 2 给出了宽带光干涉信号随相位差 φ 的变化(图中实线表示)。干涉光强的零相位位置处有干涉光强的最大值, 该位置可用来定位表面轮廓。文中提出通过采样相移间隔为 $\pi/2$ 的干涉信号(如图 2 中的空心圆所示), 并通过调制度较大的八个连续采

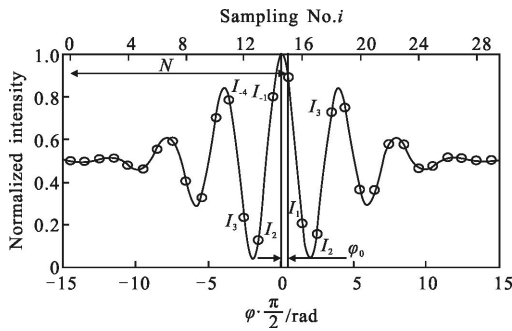


图 2 宽带光干涉信号随相位差的变化及采样信号

Fig.2 Broadband light interference signal versus phase difference, and the sampling signal

样信号确定零相位差位置。采样干涉信号可记为:

$$I_i = A + B \exp[-E(\varphi_0 + i\delta)^2] \cos(\varphi_0 + i\delta) \quad (3)$$

式中: i 为采样序数; φ_0 为调制度最大的采样信号的相位值; $\delta = \pi/2 + \varepsilon$ 表示实际移相量。零相位差位置距离采样初始位置的相位可表示为:

$$\sigma = N\delta - \varphi_0 \quad (4)$$

式中: N 为调制度最大的采样信号距离初始采样位置的采样序数差。由公式(4), σ 的计算误差由移相量 δ 和 φ_0 的计算误差引起。以图 2 中的八个采样光强 I_i (i 为 $-4 \sim 3$ 间的整数) 为例, 提出根据调制度最大的采样光强 I_0 附近的八个光强值得到相位值 φ_0 以及移相间隔 δ 。令 P_i, Q_i ($i = -1, 0$) 表示为:

$$P_i = 7(I_{i-1} - I_{i+1}) - (I_{i-3} - I_{i+3}) \quad (5a)$$

$$Q_i = 8I_i - 4I_{i-2} - 4I_{i+2} \quad (5b)$$

φ_0 由下式计算得到:

$$\varphi_0^a = \arctan\left(\frac{P_0}{Q_0}\right) \quad (6)$$

移相间隔的计算值为:

$$\delta^a = \varphi_0^a - \varphi_{-1}^a = \arctan\frac{P_0Q_{-1} - P_{-1}Q_0}{P_0P_{-1} + Q_0Q_{-1}} \quad (7)$$

式中: φ_{-1}^a 为由光强值 $I_{-1} \sim I_2$ 计算得到采样序数 $i = -1$ 的相位值。公式(7)可理解为由两次 Groot 七步法计算相邻采样光强相位值的差得到。相位间隔最终由反正切运算得到, 使得计算结果包裹在 $[-\pi, \pi]$ 范围内。于是零相位差位置距离初始采样位置的相位可表示为:

$$\sigma = N \arctan\frac{P_0Q_{-1} - P_{-1}Q_0}{P_0P_{-1} + Q_0Q_{-1}} - \arctan\left(\frac{P_0}{Q_0}\right) \quad (8)$$

由公式(5a)~公式(8), 根据八个移相光强值计算得到实际移相量 δ^a 及相位值 φ_0^a , 在存在移相误差的情况下定位宽带光干涉信号的零相位差位置, 将该方法称为宽带光八步移相算法。

2 分析

宽带光八步移相法的实质是采用两次 Groot 七步移相法计算移相间隔 δ , 并基于 Groot 七步法计算相位值 φ_0 。宽带光干涉信号的包络变化以及移相误差会引起 δ 及 φ_0 的计算误差, 影响面形恢复结果。

首先当移相量 $\delta = \pi/2$ 时, 分别采用 Carré 四步法、Hariharan 五步法及 Groot 七步法, 计算得到的相位值 φ_0^a 与其真实值 φ_0 正切的比值 C_4, C_5 及 C_7 关系:

$$C_4 = \frac{\tan \varphi_0^a}{\tan \varphi_0} = \frac{(\gamma_0 + \gamma_2) + (\gamma_1 + \gamma_{-1})}{(\gamma_0 + \gamma_2) - (\gamma_1 + \gamma_{-1}) \tan \varphi_0} \quad (9a)$$

$$C_5 = \frac{\tan \varphi_0^a}{\tan \varphi_0} = \frac{4\gamma_0 + 2\gamma_{-2} + 2\gamma_2}{5(\gamma_{-1} + \gamma_1) + (\gamma_{-3} + \gamma_3)} \quad (9b)$$

$$C_7 = \frac{\tan \varphi_0^a}{\tan \varphi_0} = \frac{8\gamma_0 + 4\gamma_{-2} + 4\gamma_2}{7(\gamma_{-1} + \gamma_1) + (\gamma_{-3} + \gamma_3)} \quad (9c)$$

式中: $\gamma_i = \exp[-E(\varphi_0 + i\pi/2)^2]$ 为干涉包络。图 3 给出了比值 C_4, C_5 及 C_7 随真实相位值 φ_0 的变化 ($E = 0.01$), 其中 $-\pi/2 \leq \varphi_0 \leq \pi/2$ 。 C_4 随 φ_0 接近线性变化, 变化量约为 0.1, 如图中实线所示。 C_5 随 φ_0 的变化如图中虚线所示, 均值为 1.023。 C_7 随 φ_0 的变化如图中点画线所示, 均值为 1.0008。不难推导, 当 $\gamma_i = 1 - E(\varphi_0 + i\pi/2)^2$, $C_7 = 1$, 即宽带光干涉包络服从 $1 - E(\varphi_0 + i\pi/2)^2$ 的分布时, 采用 Groot 七步移相算法不会引起相位值 φ_0 的计算误差。可见, 相比于 Carré 四步法及 Hariharan 五步法, 宽带光干涉包络的变化对 Groot 法的计算结

果影响更小。

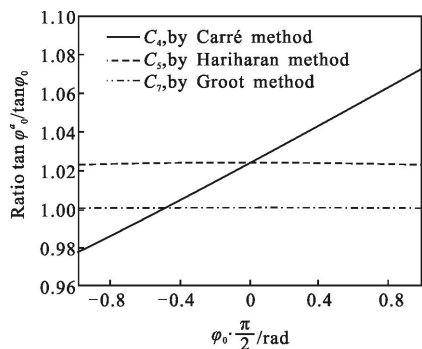
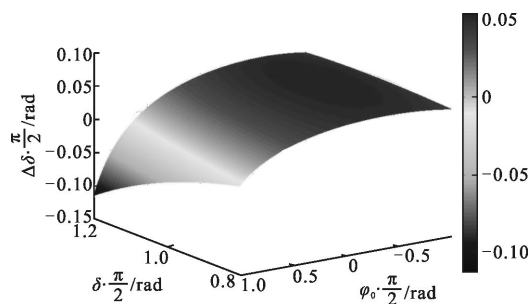


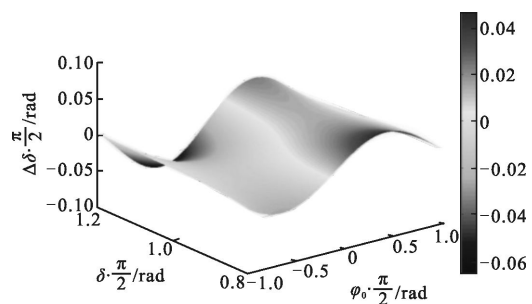
图 3 Carré 法、Hariharan 法及 Groot 法的 $\tan \varphi_0^a / \tan \varphi_0$

Fig.3 $\tan \varphi_0^a / \tan \varphi_0$ determined by Carré, Hariharan and Groot methods

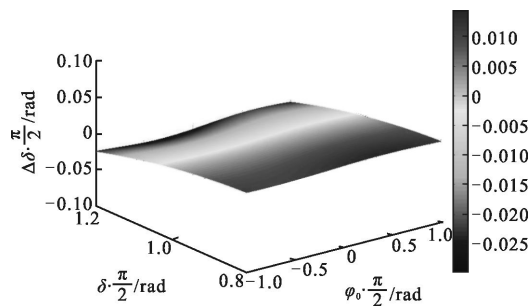
图 4 仿真比较了 Carré 四步法、J.Schmit 法以及宽带光八步法计算宽带光移相信号的相位间隔 δ 受实际移相量的影响。其中,J.Schmit 法采用两次 Hariharan 五步法计算移相间隔。仿真中, 移相量 $2\pi/5 \leq \delta \leq 3\pi/5$, 相位值 $-\pi/2 \leq \varphi_0 \leq \pi/2$ 。三种方法的计算偏差 $\Delta\delta$ 随实际移相量 δ 以及相位值 φ_0 的变化如图 4 所示。采用 Carré 方法标定移相量的偏差的变化量为 0.17 rad。采用 J. Schmit 方法标定移相量的偏差的变化量为 0.1 rad。宽带光八步移相法的标定结果对相位初值 φ_0 的变化并不敏感,随 δ 接近线性变化(小于 0.04 rad),可见宽带光八步法能够高精度地标定移相量。



(a) Carré 法
(a) Carré method



(b) J. Schmit 法
(b) J. Schmit method

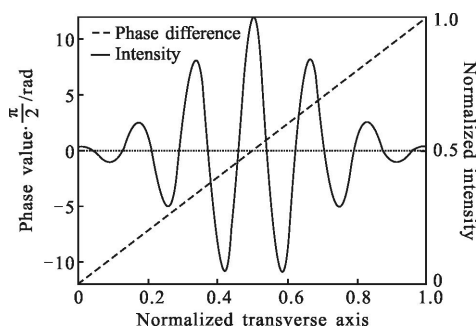


(c) 宽带光八步移相法
(c) Proposed method

图 4 三种移相量标定方法的比较

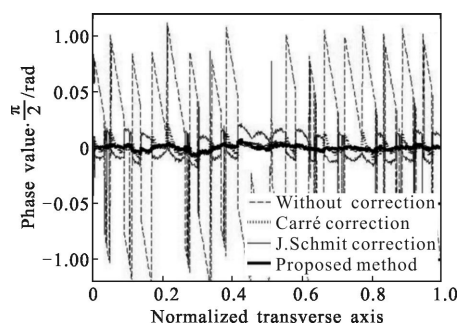
Fig.4 Comparison of three different methods for calibrating phase step

图 5 仿真倾斜平面的面形恢复。图 5(a)的虚线



(a) 倾斜平面的相位值及干涉信号

(a) Phase values of tilted flat and interference signal



(b) 计算结果比较

(b) Comparisons of results using different methods

图 5 倾斜平面形貌的仿真计算

Fig.5 Simulation calculation surface profile of a tilted flat

给出了仿真的倾斜面与参考面间的相位差(采用图中左侧纵坐标),其中倾斜面中央位置与参考面的绝对相位差为零,图 5(a)的实线为相应的干涉光强(采用图中右侧坐标),当移相器移动参考镜时,干涉光强沿横向坐标方向偏移,这里设定移相量为设计移相量的 8/9,即移相过程中存在 $\varepsilon = -\pi/18$ rad 的移相

误差,光强信号量化到 0~255 内的整数,并叠加按参数[0,10]正态分布的随机噪声。图 5(b)为各种计算方法恢复的倾斜表面轮廓的相位差。不校正移相误差的结果中含有明显的“纹波”,“纹波”的周期是图 5(a)中干涉信号周期的 1/4,“纹波”的幅值为 0.16 rad。将 Carré 法计算得到的相位间隔及 φ_0 代入公式(4),得到的结果如图中点画线所示,变化的幅值为 0.02 rad,均方根为 0.005 rad。采用 J.Schmit 法校正的结果如图中的细实线所示,变化幅值为 0.02 rad,均方根为 0.01 rad。采用宽带光八步移相法计算得到的相位结果如图中的粗实线所示,均方根为 0.002 rad,且“纹波”现象被明显抑制。

3 实验装置

构建如图 1 所示的宽带光显微干涉系统以研究移相误差的校正技术。采用宽带光 LED(苏州雷克斯光电, SZ6L)作为系统光源,由干涉显微物镜(Nikon, MUL40200)的参考镜反射的参考光及被测样品反射的测试光经成像镜(Computar, M7528MP)在探测器(北京微视新纪元, MVC1450DMF)靶面上形成干涉条纹。干涉显微物镜由压电促动器^[2]驱动产生移相。实验测量的是浙江大学光学工程研究所加工的标准台阶板的高度,经商用轮廓仪(Veeco NT9100,10X 显微物镜,1 倍视场)标定,台阶的平均高度为 110.05 ± 0.5 nm。此外,实验测量碳化硅平面(Bruker, RM1085)的表面轮廓,从而验证文中算法的精度。

4 实验结果

首先标定宽带光干涉系统的移相间隔为 $\pi/2$ 。由图 4,移相量的标定误差随实际移相量变化,因此,当实际移相量较大偏离 $\pi/2$ 时,需要多次表示才能使最终移相量结果收敛至 $\pi/2$ 。实际标定流程如图 6 所示。由 J.Schmit 方法及宽带光计算预采集的移相干涉图序列的移相间隔 δ_{i-1} ,对应的移相器控制电压为 V_{i-1} 。将移相间隔反馈至压电促动器并调节压电促动器控制电压 V_i ,直至移相间隔收敛至 $\pi/2$,最终采集得到相移干涉图序列并计算台阶面的相位分布。其中移相量控制电压 V_i 由下式得到:

$$V_i = \frac{V_{i-1}}{\delta_{i-1}} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

分别采用宽带光八步移相法及 J.Schmit 法确定

移相间隔,移相量初始控制电压为 V_0 ,最终的移相量控制电压收敛至 $2.7 V_0$ 。标定过程中两种移相量标定算法的电压收敛曲线如图 7 所示。可见,宽带光八步移相法的收敛效率优于 J. Schmit 方法。

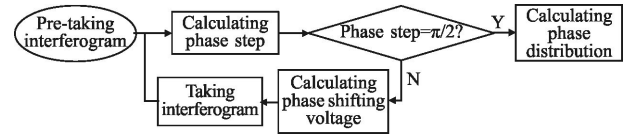


图 6 移相间隔标定流程

Fig.6 Procedure for calibrating phase step

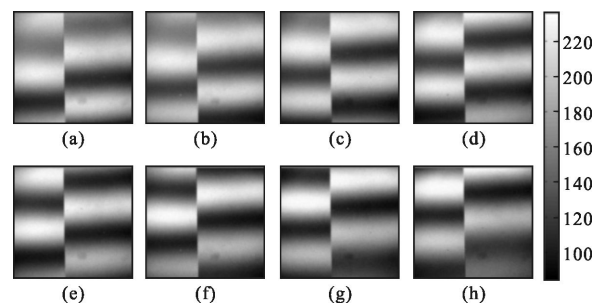


图 7 两种移相量校正方法的电压收敛曲线

Fig.7 Voltage convergence curves when calibrating the phase step using two different methods

图 8(a)~(f)给出了相移间隔为 $\pi/2$ 时的宽带光移相干涉图序列。每经过四次移相,移相前后的干涉相位重合,计算得到的所有像素点移相量均值为 1.576 rad。图 9(a)给出了由移相干涉图序列计算得到的台阶板相位分布,其中相位分布以左侧表面为基准常数项和消倾斜,从而得到台阶上下表面的相位差。重复十次测量,计算得到相位差均值为 2.605 3 rad,均方根值为 0.004 2 rad。台阶板高度的标定值为 110.05 nm,如图 9(b)所示。由公式 5(b)得到系统的中心波数 $\nu_m = 1/(530.8 \text{ nm})$ 。

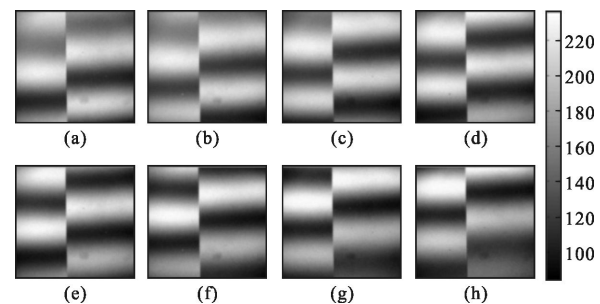
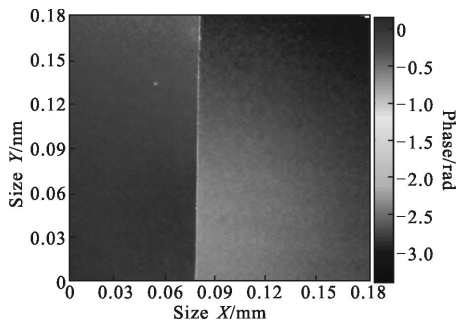


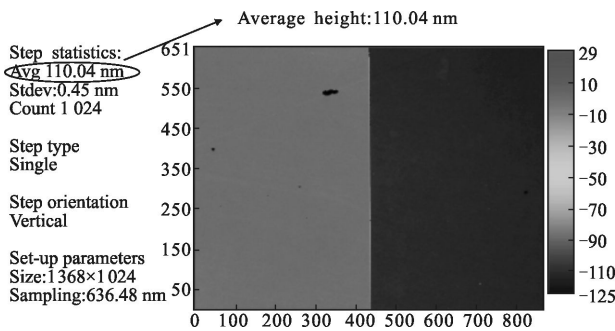
图 8 移相量标定后的移相干涉图序列(视场: $0.18 \times 0.18 \text{ mm}^2$)

Fig.8 Phase shifted interferograms taken after calibration of phase step(field of view: $0.18 \times 0.18 \text{ mm}^2$)



(a) 台阶板相位计算结果

(a) Phase profile of a standard step



(b) Veeco NT9100 测量得到的台阶轮廓

(b) Step profile determined by Veeco NT9100

图 9 系统中心波数的标定

Fig.9 Calibration of central wavenumber

以碳化硅平面为研究对象,比较相移间隔偏离 $\pi/2$ 情况下,宽带光八步移相法对移相误差的抑制。记相移间隔为 $\pi/2$ 时对应的移相间隔控制电压为 $V(\pi/2)$ 的移相间隔由图 6 所示流程得到)。设置移相间隔控制电压为 0.9 V 并采集移相干涉图序列,如图 10 所

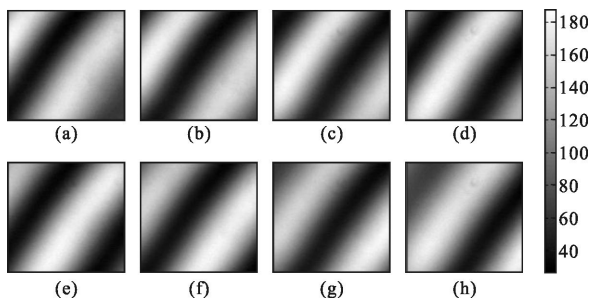
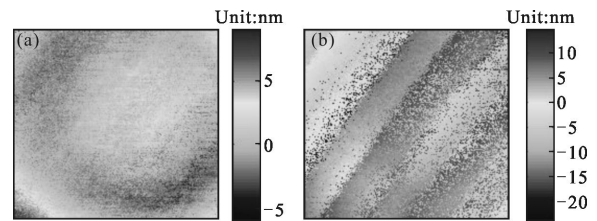


图 10 含有移相误差的移相干涉图(视场:0.18x0.18 mm²)

Fig.10 Phase shifting interferograms with phase shift error (field of view: 0.18x0.18 mm²)

示,移相干涉条纹中存在明显的移相误差。图 11 比较了采用四种处理方法处理倾斜平面的宽带光干涉条纹的结果(计算结果均作了消倾斜和消离焦处理)。

图 11(a)为 $\pi/2$ 移相时的测量结果,计算波面的均方根值为 1.614 nm。图 11(b)给出了不校正移相误差的计算结果,计算结果存在明显的条纹方向一致的“纹波”。由 J.Schmit 方法得到的波面结果如图 11(c)所示,其均方根值为 2.883 nm,测量结果中仍叠加了“纹波”。由宽带光八步移相法得到的波面结果如图 11(d)所示,均方根值为 1.646 nm,与不含移相误差时的计算结果吻合,但“纹波”现象得到了有效地抑制。

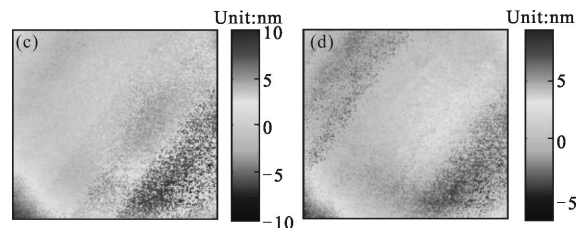


(a) 不含移相误差的测量结果

(b) 不校正移相误差的测量结果

(a) Result determined without phase shifting error

(b) Result determined without correcting phase shifting error



(c) J. Schmit 法在线校正移相误差的测量结果

(d) 宽带光八步移相法在线校正移相误差的结果

(c) Result determined by J. Schmit method

(d) Result determined by broadband light eight step algorithm

图 11 不同方法恢复得到的倾斜平面的结果比较 (消倾斜及离焦,视场:0.18x0.18 mm²)

Fig.11 Results of tilted flat retrieved by different methods (tilt and focus terms are removed, field of view: 0.18x0.18 mm²)

5 结论

提出了宽带光八步移相算法实现微观表面形貌的测量。该算法定位宽带光干涉条纹的零相位差位置,计算相邻采样点的相位值从而得到实际移相间隔,实现移相误差的实时校正。仿真分析表明:该算法对干涉包络的变化不敏感。相比于 J.Schmit 方法,宽带光八步移相法能高效地标定移相量,能明显抑制计算结果中的纹波现象。宽带光八步移相法是一种实用、高精度的微观表面轮廓测量算法。

参考文献:

- [1] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [2] Zhu Rihong, Chen Lei, Wang Qing, et. al. Phase shifting interferometry and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 27(2): 85–88. (in Chinese)
朱日宏, 陈磊, 王青, 等. 移相干涉测量术及其应用研究 [J]. *应用光学*, 2008, 27(2): 85–88.
- [3] Leach R. Optical Measurement of Surface Topography [M]. Berlin: Springer-Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] Sandoz P. An algorithm for profilometry by white-light phase shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(8): 1545–1554.
- [5] Harasaki A, Schmit J, Wyant J. Improved vertical-scanning interferometer[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(19): 2017–2115.
- [6] Shen M, Wang W, Hwang C. White-light interferometer-micro-profile measurement based on higher steps phase shifting algorithm [C]//Fringe, 2013, 2014: 341–344.
- [7] Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42: 389–401.
- [8] Ma S, Quan C, Zhu R, et al. Micro-profile measurement based on windowed Fourier transform in white-light scanning interferometry [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(10–11): 2488–2493.
- [9] Li M, Quan C, Tay C. Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry [J]. *Optics Lasers Technology*, 2008, 40: 920–929.
- [10] Adachi M. Phase-shift algorithm for white-light interferometry insensitive to linear errors in phase shift [J]. *Optics Review*, 2008, 15(3): 148–155.
- [11] Roy M, Cox G, Hariharan P. Low-coherence interference microscope with an improved switchable achromatic phase-shifter [J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9125–9130.
- [12] Yang Y, Ding Z, Wang K, et al. Full-field optical coherence tomography by achromatic phase shifting with a rotating half-wave plate[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(3): 035301.
- [13] Schmit J, Olszak A. High-precision shape measurement by white-light interferometry with real-time scanner error correction [J]. *Applied Optics*, 2002, 42(28): 5934–5950.
- [14] Wang Jun, Chen Lei. Measurement of micro-displacement using white interference based on a spatial frequency domain algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 874–877. (in Chinese)
王军, 陈磊. 基于空间频域算法的白光干涉微位移测量法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 874–877.