

## 白光显微干涉三维形貌测量中的移相误差校正方法

张超 袁群 张佳乐 冀翼 高志山 闫钧华

### Calibration method of the phase-shifting error for the topography measurement utilizing white light interferometric microscopy

Zhang Chao, Yuan Qun, Zhang Jiale, Ji Yi, Gao Zhishan, Yan Junhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220050>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 任意正弦调制的正弦移相干涉波面测量方法

Sinusoidal phase-shifting interferometry with arbitrary sinusoidal modulation for wavefront measurement

红外与激光工程. 2019, 48(3): 317002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0317002>

#### 部分补偿数字莫尔移相干涉的回程误差消除

Retrace error elimination for partial compensation digital Moiré phase shifting interferometry

红外与激光工程. 2018, 47(1): 117005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0117005>

#### 基于移相技术的含缺陷复合材料锁相热波检测

Lock-in thermal wave detection of defective composite material based on phase-shifting technology

红外与激光工程. 2019, 48(S2): 60 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S204002>

#### 基于波长移相干涉技术的多表面信息分离

Information separation of multi-surface based on wavelength phase-shifting interferometry

红外与激光工程. 2020, 49(3): 0303014 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0303014>

#### 光学显微三维测量解耦合准则

3D measurement decoupling criterion in optical microscopy

红外与激光工程. 2017, 46(3): 302001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0302001>

#### 基于有效信号提取的白光干涉信号快速处理方法

Fast white light interference signal processing method based on effective signal extraction

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1013002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1013002>

# 白光显微干涉三维形貌测量中的移相误差校正方法

张超<sup>1,2</sup>, 袁群<sup>3</sup>, 张佳乐<sup>3</sup>, 冀翼<sup>2</sup>, 高志山<sup>3\*</sup>, 闫钧华<sup>1</sup>

- (1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏南京 210006;
2. 北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;
3. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 白光显微干涉术通过驱动干涉显微物镜垂直扫描移相, 采集低相干干涉图序列, 定位干涉包络中的零光程差位置, 获取待测表面的三维形貌。微观形貌的计算由获取粗略形貌的垂直扫描(VSI)算法和获取精细形貌的移相(PSI)算法两部分组成。通常情况下, 设置垂直扫描移相的步长为八分之一中心波长, 但移相器误差和干涉显微物镜数值孔径效应等都会使得移相量偏离  $\pi/2$ 。文中采用基于对比度变化重心提取的 VSI 算法, 4M 幅法和 7 幅法两种 PSI 算法, 分别讨论了两种类型移相误差对形貌计算的影响。理论和数值分析结果表明, 在宽带光作用下, 7 幅法仍对移相误差不敏感, 4M 幅法产生的精细相位误差形式恰好与干涉物镜数值孔径效应对条纹展宽的影响相一致, 在从精细相位转换为精细形貌时相互抵消。因而, 采用基于对比度变化重心提取的 VSI 算法和 4M 幅 PSI 算法计算形貌数据, 干涉物镜数值孔径效应造成的移相误差无影响, 移相器误差造成的形貌复原误差可以通过预先测量已知高度的标准台阶进行标定去除。应用上述移相误差校正方法测量了高度为 460 nm 的台阶, 形貌测试结果正确且鲁棒。

**关键词:** 移相误差; 台阶; 形貌测量; 白光显微干涉

中图分类号: O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220050

## Calibration method of the phase-shifting error for the topography measurement utilizing white light interferometric microscopy

Zhang Chao<sup>1,2</sup>, Yuan Qun<sup>3</sup>, Zhang Jiale<sup>3</sup>, Ji Yi<sup>2</sup>, Gao Zhishan<sup>3\*</sup>, Yan Junhua<sup>1</sup>

- (1. Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, China;
2. Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
3. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Sequence of low coherence interferograms were captured during the vertical scanning of the interferometric microscope in the measurement procedure of the white light interferometric microscopy, and thus the topography of the surface under test was retrieved through determining the locations where the optical path difference (OPD) was zero in the envelope of the correlogram. The calculations of the topography for the microstructures were composed of the vertical scanning interferometric (VSI) algorithm determining the coarse map and the phase-shifting interferometric (PSI) algorithm retrieving the fine map. Usually, the vertical scanning step

收稿日期: 2021-11-20; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2019 YFB2005500); 国家自然科学基金 (62175107)

作者简介: 张超, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天载荷设计与光学精密测试方面的研究。

通讯作者: 高志山, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进光学设计、光学计量测试等方面的研究。

was set as one eighth of the central wavelength, but the phase-shifting departures from  $\pi/2$  inevitably due to the phase shifter error as well as the numerical aperture (NA) effect of the interferometric microscope. In this manuscript, the center-of-gravity solving of the visibility curves was adopted as VSI algorithm, and the 4M-frame method as well as the 7-frame method were both utilized as PSI algorithm respectively. The effect of the phase-shifting error on the topography measurement adopting the three above mentioned methods was discussed. Both theoretical derivations and simulation analysis demonstrate that the 7-frame method was insensitive to phase-shifting errors even under the low coherence illuminations. The fine phase error induced by phase-shifting error utilizing the 4M-frame method was by lucky coincides the form of the NA effect increasing the fringe spacing, and they were cancelled out during the transform from the fine phase to the topography. Therefore, adopting the center-of-gravity method as VSI algorithm and the 4M-frame method as the PSI algorithm, the phase-shifting errors arising from NA effect can be ignored, and the topography can be calibrated confronting the phase shifter error through measuring a certificated step standard in advance. A step height of 460 nm was measured utilizing the proposed method, and the topography demonstrate that it was both accurate and robustness.

**Key words:** phase-shifting error; step; topography measurement; white light interferometric microscopy

## 0 引言

移相干涉术是一种纳米级精度非接触式形貌测量方法。单色光移相干涉受限于  $2\pi$  相位模糊,无法确定条纹级次,被测件相邻采样点的高度差不能高于  $\lambda/4$ 。白光显微干涉术利用白光的低相干特性,通过垂直扫描零光程差定位,有效地解决了  $2\pi$  相位模糊问题,可在长程范围内实现阶跃型结构的表面微观三维形貌测量<sup>[1]</sup>。

白光可以看作被光谱分布调制的多个单色光的叠加,其相干长度短,为  $\mu\text{m}$  量级。仅当测试光与参考光的光程差达到相干长度以内时才能产生对比度良好的干涉条纹,当两束光的光程差为零时,干涉条纹对比度最佳。白光显微干涉仪检测微结构三维形貌时,干涉显微物镜被移相器驱动以等步长完成垂直扫描,探测器采集相应的干涉图序列。每一个采样点上垂直扫描采集的干涉光强变化为干涉相干图,其形式为被干涉包络调制的余弦条纹,其中干涉包络的分布与白光光谱相关。计算每个采样点在扫描过程中的对比度变化情况,即可通过寻找对比度最大值定位零光程差位置,记录对应的扫描步数并乘以扫描步长,得到待测件表面的三维形貌<sup>[2]</sup>。提取对比度最高点位置的方法为垂直扫描干涉 (Vertical scanning interferometry, VSI) 算法,可以用重心提取、最小二乘拟合等方式处理对比度变化曲线来实现<sup>[3-4]</sup>,但该过程易受光强噪声的干扰,所以通常情况下 VSI 算法复原形

貌会有数十纳米的误差。相比之下,干涉信号中的相位信息对光强噪声不敏感。因此,复原干涉相位可以获得更高的定位精度。相位计算方法有傅里叶变换法<sup>[5]</sup>,小波变换法<sup>[6]</sup>、空间频域算法等<sup>[7-9]</sup>,其中最经典的也是计算速度最快的是移相干涉 (Phase shifting interferometry, PSI) 算法<sup>[10]</sup>。所以,为了满足阶跃型结构的表面微观形貌三维测量的需求,设置垂直扫描移相量为  $\pi/2$ ,采用 VSI 算法将粗略形貌定位至整数位步长,采用 PSI 算法计算零光程差时对应的小数位精细形貌,再将二者结合获得表面形貌<sup>[11]</sup>。

为了满足垂直扫描移相量为  $\pi/2$  的需求,设置扫描步长为  $\lambda_0/8$  ( $\lambda_0$  为中心波长)。然而,实际的移相量与  $\pi/2$  必然有偏差。首先,受光谱分布、光学系统反射率与透过率、探测器光谱响应的综合影响,宽带光干涉信号对应的等效中心波长与光源的中心波长有偏差;其次,受干涉物镜数值孔径效应的影响<sup>[12-14]</sup>,各个孔径角内的光程差不一致,表现为当垂直入射光束的相位差为  $\pi/2$  时,其它角度光束的相位差小于  $\pi/2$ ,这导致干涉条纹被展宽;移相器的移动量与名义设定值不可避免的存在偏差。且在宽带光中各个波长的移相量难以保持一致。白光显微干涉三维形貌复原中采取的 PSI 算法均源自单色光移相干涉,在宽带光和移相误差双重作用下,这些 PSI 算法的表现需要被评估。因此,文中将分析各类型移相误差对 VSI 算法以及 PSI 算法的影响,讨论在移相误差作用下,采用白光显微干涉术准确复原三维微观形貌的方法。

### 1 白光显微干涉的信号特征

白光显微干涉系统的基本组成如图 1 所示, 白光光源发出具有一定发散角的面视场宽带光束, 经过科勒照明系统充满干涉显微物镜的入瞳, 然后再待测样品上形成均匀照明的视场, 并提供照明数值孔径 (Numerical aperture, NA)。经过样品表面返回的测试光束携带待测形貌信息, 与经过参考镜返回的参考光束发生干涉, 由管镜将低相干干涉图成像至探测器上。图 1 中阴影光束表示了视场光阑、物面和探测器之间的共轭关系; 两根光线为边缘视场的成像主光线, 表示了孔径光阑和入瞳之间的共轭关系。压电陶瓷移相器 (Piezoelectric transducer, PZT) 驱动干涉显微物镜垂直扫描, 获取移相干涉图序列。对每一个采样点按照扫描顺序画出干涉光强变化即为干涉相干图, 在干涉相干图上光强对比度最大值对应零光程差位置, 计算出各个采样点的零光程差位置即可获得微观表面三维形貌。

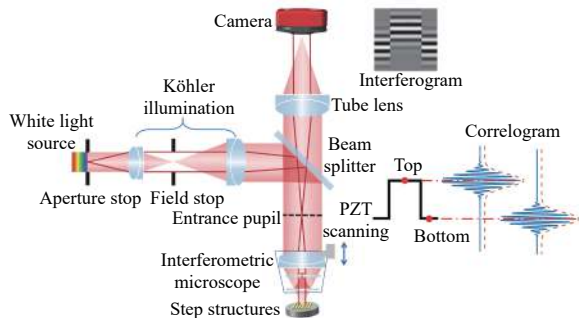


图 1 白光显微干涉仪测量台阶结构三维形貌测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of the tomography measurement schemes of the step height utilizing white light interferometric microscopy

与单色光干涉相比, 白光干涉的干涉光强中引入了宽带光的低相干特性, 可以表示为:

$$I = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{\Delta \lambda \cdot \Delta}{\lambda_0^2} \right)^2 \right] \gamma \cos \left( \frac{2\pi \Delta}{\lambda_0} \right) \right\} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为白光干涉光强  $I$  中的背景分量;  $\Delta$  为光程差, 与初始相位误差和扫描步数相关;  $\gamma$  为常数, 取决于待测件与参考面的反射率比值; 白光光谱的中心波长为  $\lambda_0$ , 光谱带宽为  $\Delta \lambda$ , 此处假定白光光谱为理想的高斯分布;  $\exp \left[ - \left( \frac{\Delta \lambda \cdot \Delta}{\lambda_0^2} \right)^2 \right]$  项为白光干涉包络, 是单色光干涉与白光干涉光强的重要区别。

设待测件表面起伏的高度为  $Z$ , 垂直扫描步长为  $\sigma$ , 扫描的序号为  $m$ , 则光程差  $\Delta$  可表示为:

$$\Delta = 2(Z + m\sigma) \quad (2)$$

按照公式 (1) 计算的白光干涉光强信号随移相量的变化见图 2。零光程差位置有最大的干涉光强值, 也有最佳的对比度。

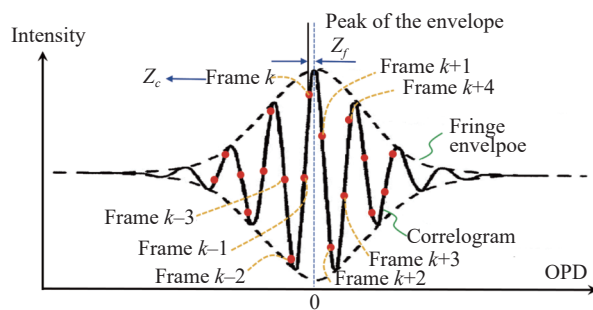


图 2 基于垂直扫描移相相干图采样的形貌高度复原原理图

Fig.2 Schematic diagram of tomography height retrieve from the correlogram based on vertical scanning phase-shifting

### 2 形貌复原方法

第  $i$  幅采样位置的对比度  $V_i$  可根据其前后的干涉光强值计算<sup>[4]</sup>:

$$V_i = \frac{\sqrt{4(I_{i-1} - I_{i+1})^2 + (-I_{i-2} + 2I_i - I_{i+2})^2}}{4} \quad (3)$$

如图 2 中干涉相干图上各幅采样所示, 垂直扫描过程中每一幅干涉图是对干涉相干图上光强值的离散采样。假定在待测面上某个测试点处, 第  $k$  幅采样距离干涉包络峰值点, 也即是距离零光程差点最近。常规的 VSI 算法是依据离散采样光强数据获取对比度变化, 根据重心法计算获得对比度峰值点对应的扫描幅数的序号, 该序号包含整数位和小数位, 其整数位为图 2 中的  $k$ , 假定小数位为  $l$ 。再与扫描步长相乘, 可以获得形貌高度。但受光强噪声的影响, VSI 算法的小数位计算误差较大, 形貌复原误差往往有数十 nm。而待测件上任意一点的形貌高度可以由对比度最佳采样幅数  $k$  所对应的粗略形貌  $Z_c$  和该幅图与零光程差位置的偏离量, 也即是精细形貌  $Z_f$  共同组成。其中, VSI 算法的整数位计算较为准确, 也即能够准确地确定图 2 中的粗略形貌  $Z_c$ 。按照基于重心法的 VSI 算法:

$$Z_c = k\sigma = \text{round} \left( \frac{\sum_{i=1}^N iV_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right) \sigma \quad (4)$$

式中:  $\text{round}$  为取整符号;  $N$  为总采样幅数; 对于  $i=1, 2, N-1, N$  等无法通过公式 (4) 计算的  $V_i$  均直接置为零。

对比度的计算易受光强噪声的干扰, 但相位计算受光强噪声的干扰较小, 移相算法是精确计算相位的方法。经典的单色光移相算法通常以  $\pi/2$  作为移相间隔, 能够精准求解高度起伏较小的形貌, 所以扫描步长  $\sigma$  设置为  $\lambda_0/8$ 。

宽带光作用下, 精细形貌  $Z_f$  只在零光程差附近, 也即是图 2 中第  $k$  幅干涉图与零光程差位置偏差的小数位  $l$  所对应的求解相位。在此位置, 宽带光的干涉信号最接近于单色光的干涉信号, 因此, 可以借用经典的单色光移相算法。7 幅法是一种对移相误差极不敏感的移相算法, 其相位计算表达式为<sup>[15]</sup>:

$$\phi = \frac{-I_{k-3} + 7I_{k-1} - 7I_{k+1} + I_{k+3}}{-4I_{k-2} + 8I_k - 4I_{k+2}} \quad (5)$$

移相量为  $\pi/2$ , 4 幅移相干涉图为一个周期。在白 光垂直扫描移相时采用  $4M$  幅法<sup>[16]</sup>, 可以不用定位第  $k$  幅图, 直接通过对垂直扫描范围内所有干涉图运算, 计算获得精细相位, 其相位计算表达式为:

$$\phi = \alpha \tan \frac{\sum_{i=1}^{4M} I_i \sin \frac{i\pi}{2}}{\sum_{i=1}^{4M} I_i \cos \frac{i\pi}{2}} \quad (6)$$

相位差转化为光程差再转化为形貌高度, 则精细形貌  $Z_f$  为:

$$Z_f = l\sigma = \frac{2\phi}{\pi} \sigma \quad (7)$$

因此, 为了复原微结构的表面形貌, 将 VSI 和 PSI 相结合, 设置垂直扫描和移相的间隔均为  $\pi/2$ , 采用基于对比度变化重心提取的 VSI 算法计算粗略形貌  $Z_c$ , 采用 7 幅法或  $4M$  幅法计算精细形貌  $Z_f$ , 二者相加获得表面形貌  $Z$ 。

$$Z = Z_c + Z_f = (k+l)\sigma = \left\{ \text{round} \left( \frac{\sum_{i=1}^N iV_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right) + \frac{2\phi}{\pi} \right\} \sigma \quad (8)$$

### 3 移相误差影响的分析与校正

公式 (2) 中计算光程差时测试光线垂直于待测件, 而在白光显微干涉术中, 采用的干涉显微物镜通常具有一定的  $NA$ 。图 3(a) 所示为 Mirau 型干涉物镜的孔径角情况, 参考板位置的参考面是照明和成像系统中的中心遮拦。因此, 有效的  $NA$  为环型会聚的光束, 参与干涉成像的光束孔径角范围为  $\gamma-\theta$ 。图 3(b) 画出了入射角为  $\alpha$  的光线的干涉情况, 将参考面经过分光镜镜像至待测面附近做分析, 假定待测面面和参考面的高度差为  $H$ , 则参考光线和测试光线的光程差  $\delta$  为:

$$\delta = 2H \cos \alpha \quad (9)$$

公式 (9) 表明, 对于干涉显微物镜中有效  $NA$  范围内参与成像的各个入射角度光线, 其光程差与光线入射角度余弦呈线性关系。进一步地, 干涉显微物镜作用下的光程差是有效孔径内光程差的积分, 小于垂直高度差, 导致干涉条纹展宽。

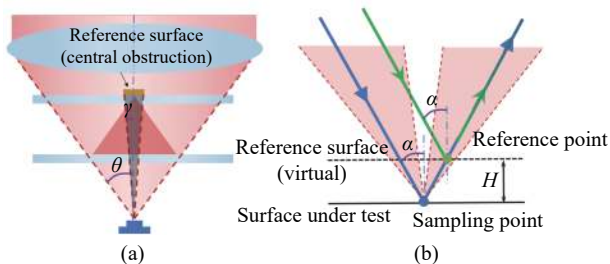


图 3 Mirau 型干涉显微物镜的  $NA$  效应。(a) 有效  $NA$ ; (b) 光程差  
Fig.3  $NA$  effect of the Mirau type interference microscope. (a) Effective  $NA$ ; (b) OPD

上述现象称为干涉显微物镜的  $NA$  效应<sup>[12-14]</sup>, 可以定义系数  $C_1 (<1)$  表征其对光程的影响。干涉显微物镜主要有 3 种类型, 文中以 Mirau 型干涉显微物镜为例, Michelson 型和 Linnik 型干涉显微物镜的工作模式与之类似。  $NA$  效应在高倍率干涉显微物镜上较为显著, Mirau 型物镜由于存在中心遮拦, 其作用最为复杂。有相关文献讨论了  $C_1$  的数学表达形式<sup>[12-14]</sup>, 但干涉显微物镜有效  $NA$  范围的名义值与实际值存在偏差, 通过实验测量获得  $C_1$  是一种较为有效的手段<sup>[13-14]</sup>。此外, PZT 也存在误差, 导致实际步进量  $\sigma$  偏离名义步进量  $\sigma$ , 定义  $C_2$  为 PZT 位移的误差系数, 则公式 (2) 可以被修正为:

$$\Delta = 2C_1(Z + m\sigma') = 2C_1Z + 2mC_1C_2\sigma \quad (10)$$

分析在  $NA$  效应和移相器误差的双重作用下, 计算形貌的公式 (8) 存在的误差情况。定义  $Z_c'$  为存在移相误差情况下按照公式 (4) 计算得到的粗略形貌, 分析其与真实粗略形貌  $Z_c$  的关系。公式 (4) 中粗略形貌  $Z_c$  的求解是计算对比度最佳采样幅数  $k$ , 再与垂直扫描步长为  $\sigma$  相乘, 中间未涉及到光程差的计算, 所以  $Z_c$  的求解与  $NA$  效应的影响无关。因而有:

$$Z_c' = k'\sigma = \text{round} \left( \frac{\sum_{i=1}^N iV_i'}{\sum_{i=1}^N V_i'} \right) \sigma = \frac{Z_c}{C_2} \quad (11)$$

求解粗略形貌  $Z_c$  主要的误差源为 PZT 位移误差, 即名义步进量  $\sigma = \lambda_0/8$ , 但实际步进量是其  $C_2$  倍。比较公式 (4) 和 (11), 尽管扫描步长发生了变化, 粗略形貌的求解方式仍然一样, 这与常规垂直扫描方式可以变换步长的效果是等效的。也即是只要知道实际的扫描步长, 均能准确获得粗略形貌高度。这也与常规垂直扫描求解表面形貌不需要考虑干涉显微镜的  $NA$  相吻合。

精细形貌  $Z_f$  的求解是通过移相算法求解相位, 再转换为光程差, 再换成形貌高度。其中需要考虑  $NA$  效应的影响因子  $C_1$ 。公式 (7) 中定义了相位  $\phi$ , 定义  $NA$  作用下的综合相位  $\tilde{\phi}$ , 则满足  $\tilde{\phi} = C_1\phi$ 。定义  $\phi'$  为移相算法计算获取的相位。相应的, 按照公式 (7) 计算精细形貌  $Z_f'$  的表达式为:

$$Z_f' = l'\sigma = \frac{2\phi'}{\pi}\sigma \quad (12)$$

单独讨论 PSI 算法, 移相量从  $\pi/2$  变为  $C\pi/2$  ( $C=C_1C_2$ ) 的作用, 公式 (12) 的相位计算存在误差, 接下来分析计算获得的相位  $\phi'$  的形式特征。将移相误差对光程差的影响公式 (10) 引入到白光显微干涉光强的表达式 (1) 中, 即可得到各幅垂直扫描移相干涉图的干涉光强。然后根据公式 (5) 和 (6) 即可计算分析 7 幅法和 4M 幅法各自的复原相位情况。尽管已知单色光干涉时, 7 幅法对移相误差不敏感, 但此处 PSI 算法的应用场景为复色光。

因为基于理论公式的推导过程较为复杂, 文中采用数值模拟的方式分析计算相位复原的情况。PSI 算法的测试对象是高度小于  $\lambda_0/4$  的台阶, 所以数值模拟计算的设置参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟 PSI 算法计算误差的参数设置

Tab.1 Parameters for simulation analysis of PSI algorithms

$H/\text{nm}$	$\lambda_0/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\gamma$	$C$	$\sigma/\text{nm}$
100	560	200	1	0.8-1.2	70

以高度 100 nm 的台阶为测试对象, 高度数据和相位数据的转换不考虑  $NA$  效应, 所以输入的直接是综合相位  $\tilde{\phi}$ , 图 4(a) 为台阶一维轮廓分布; 图 4(b) 为某幅中间位置的扫描干涉图, 其中有载频条纹, 探测器的量化选用 10 byte; 图 4(c) 和 (d) 分别为 7 幅法复原的台阶一维轮廓及复原误差; 图 4(e) 和 (f) 为 4M 幅法复原的台阶一维轮廓及复原误差。

根据图 4(d) 显示的数据, 当实际扫描步进量分别为名义值  $\lambda_0/8$  的 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 倍时, 采用 7 幅法复原台阶高度的计算误差非常小, 分别偏差 2.33、2.43、2.16、1.56、0.60 nm, 图 4(c) 中 7 幅法复原的台阶高度与名义值 100 nm 十分接近, 在宽带光条件下, 7 幅法仍然对移相误差不敏感, 即  $\phi' = \tilde{\phi}$ 。图 4(e) 中, 4M 幅法复原的台阶形貌与图 4(a) 的原始形貌相比做了整体的缩放或拉伸, 复原的台阶高度分别为 125.06、111.11、100、90.91、83.36 nm, 分别是名义高度值 100 nm 的 1/0.8、1/0.9、1/1、1/1.1、1/1.2 倍。也即是当存在移相误差时, 4M 算法复原出的相位结果是名义相位的  $1/C$  倍, 即  $\phi' = \frac{\tilde{\phi}}{C}$ 。

因此, 面向  $NA$  效应 ( $C_1$ ) 和移相器误差 ( $C_2$ ) 两种移相误差的影响, 7 幅法和 4M 幅法各自计算的精细形貌为:

$$Z_{f-7}' = \frac{2\phi'}{\pi}\sigma = \frac{2\tilde{\phi}}{\pi}\sigma = \frac{2C_1\phi}{\pi}\sigma = C_1Z_f \quad (13)$$

$$Z_{f-4M}' = \frac{2\phi'}{\pi}\sigma = \frac{2\tilde{\phi}}{C\pi}\sigma = \frac{2C_1\phi}{C_1C_2\pi}\sigma = \frac{2\phi}{C_2\pi}\sigma = \frac{Z_f}{C_2} \quad (14)$$

继而, 考虑公式 (11) 中求解获得的粗略形貌  $Z_c'$  和实际粗略形貌  $Z_c$  的关系, 待复原的表面形貌  $Z$  与求解获得的形貌的关系式为:

$$Z = C_2Z_c' + \frac{Z_{f-7}'}{C_1} \quad (15)$$

$$Z = C_2Z_c' + C_2Z_{f-4M}' \quad (16)$$

因此, 采用垂直扫描移相计算微观形貌, 首先要移相器位移准确, 移相器误差将影响形貌复原结

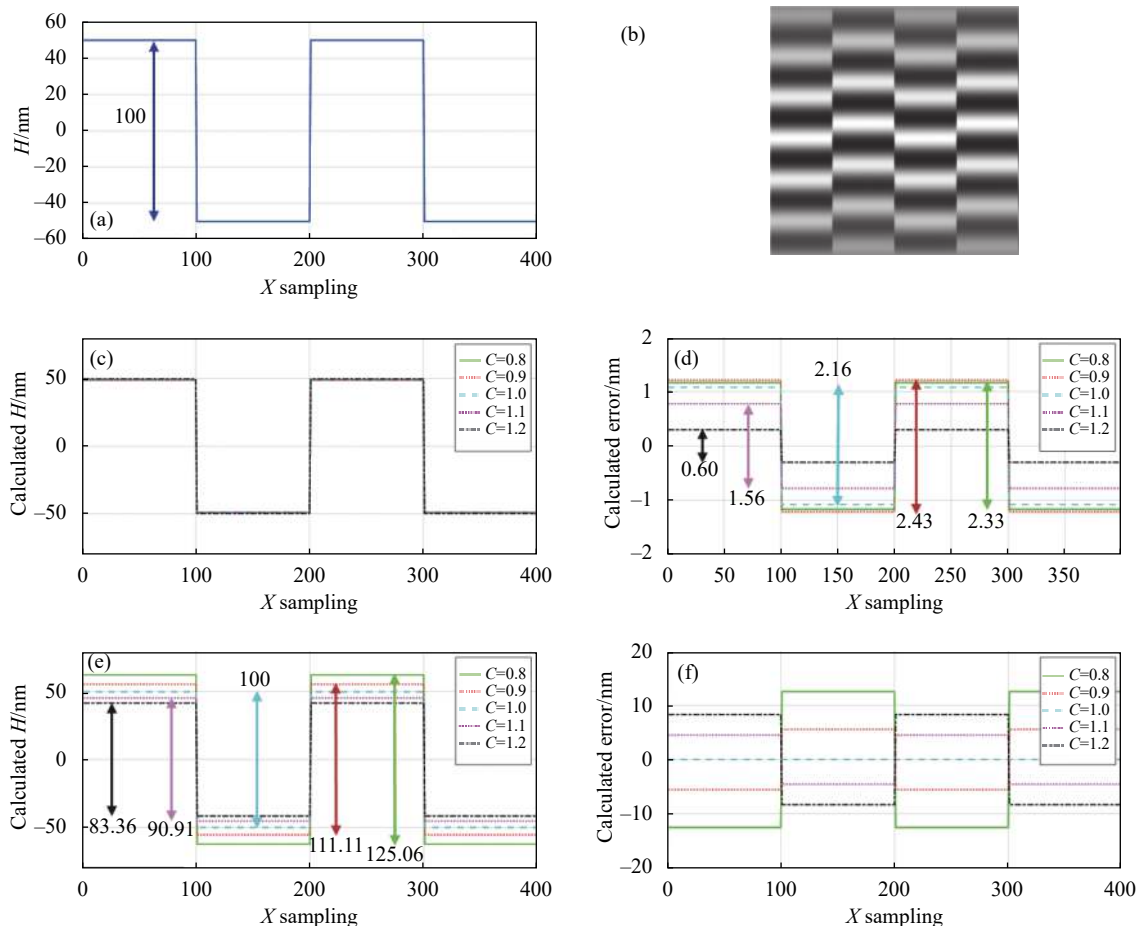


图 4 PSI 算法计算台阶形貌。(a) 100 nm 台阶; (b) 干涉图; (c) 7 幅法复原台阶; (d) 7 幅法复原误差; (e) 4M 幅法复原台阶; (f) 4M 幅法复原误差  
Fig.4 Step profile measurement utilizing the PSI algorithms. (a) Step with 100 nm height; (b) Interferogram; (c) Measured profile utilizing 7-frame algorithm; (d) Measured error utilizing 7-frame algorithm; (e) Measured profile utilizing 4M-frame algorithm; (f) Measured error utilizing 4M-frame algorithm

果。采用 7 幅法计算精细形貌, 尽管相位计算时其对移相误差敏感, 但物镜的  $NA$  效应需要被纳入考虑; 而采用 4M 法的精细相位误差形式恰好与物镜的  $NA$  效应对条纹展宽的影响相一致, 在从精细相位转换为精细形貌时相互抵消。准确计算物镜  $NA$  效应的影响因子  $C_1$  比较困难, 因而公式 (15) 中采用 7 幅法计算求解微观形貌比较难以实现。采用 4M 法计算求解微观形貌, 物镜  $NA$  效应的影响因子  $C_1$  没有影响, 移相器误差  $C_2$  对于粗略形貌和精细形貌的影响相同, 可以通过测量已知高度的标准台阶, 比较测量高度和标准高度, 完成对  $C_2$  的标定。综上, 采用基于对比度变化重心提取的 VSI 算法和 4M 幅 PSI 算法计算形貌数据, 无需在移相量设置时考虑引入物镜  $NA$  的影响, 只要精确知道 PZT 的扫描步进量, 即可准

确地复原形貌数据。

## 4 实验验证

为了验证所提方法对垂直扫描移相误差的校正能力, 采用校准高度为  $(459.8 \pm 3.0)$  nm 的标准台阶板 (BKUKER, S/N1612-270) 作为样品, 在自研的白光显微干涉仪上进行测试。采用闭环伸长量 250  $\mu\text{m}$ , 闭环线性度 0.03% 的 PZT (PI, P-725), 搭载数个倍率的干涉显微物镜进行测量。台阶板样品信息如图 5 所示。

5 倍干涉显微物镜的  $NA$  为 0.1,  $NA$  效应的较小, 认为此时  $C_1=1$ 。为了确定低相干垂直扫描干涉测量的中心波长  $\lambda_0$ , 先假定一个初始值, 并据此设定扫描步长为  $\lambda_0/8$ , 采集垂直扫描移相低相干干涉图序列, 提取在最大对比度位置附近相邻的 8 幅干涉图, 用

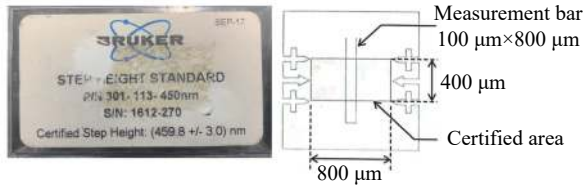


图 5 标准台阶板样品照片与图案

Fig.5 Photos and figures of the step height standard

7 幅算法分别计算前 7 幅图和后 7 幅图的相位,再计算二者相位差,根据相位差偏离  $\pi/2$  的情况修正假定的  $\lambda_0$  值,最终确立  $\lambda_0$  为 550 nm,相应的扫描步长为 68.75 nm。

为了引入  $NA$  效应的影响,更换采用 20 倍干涉显微物镜,其  $NA$  为 0.4,  $NA$  效应的影响因子  $C_1 < 1$ 。如仍以扫描步长 68.75 nm 进行垂直扫描移相采图,则受  $NA$  效应的影响,移相量偏离  $\pi/2$ 。按照前述采集相邻两组 7 幅图计算相位差的方式,实验调试得到  $C_1=1.043$ ,即扫描步长为 71.71 nm 对应  $\pi/2$  移相量。但为了仿真实验的真实情况,不对  $NA$  效应进行校正,并且为了进一步引入 PZT 误差,人为设置扫描步长偏离  $\lambda_0/8$ 。如表 2 所示,实际的扫描步长  $\sigma'$  均偏离了 71.71 nm,相当于既有  $NA$  效应的影响因子  $C_1$ ,又有 PZT 误差的影响因子  $C_2$ 。需要说明的是,由于实验采用的 PZT 闭环控制时线性度较好,实际的扫描步长是已知的,将其代入到公式 (15) 中计算形貌分布,然后对台阶形貌上所有水平方向轮廓曲线分别计算台阶高度再求平均值得到每次测量的台阶高度数据。从一根水平轮廓线上提取台阶高度的计算依据 ISO5436-1:2000 规定的  $W/3$  方法。表 2 给出了不同的扫描步

表 2 不同扫描步进量的台阶高度计算结果

Tab.2 Calculation results of step height with different scanning interval

$\sigma'$	$H'$	
	4M-frame method/nm	7-frame method/nm
$0.9 \times \lambda_0/8$	459.2	455.8
$0.95 \times \lambda_0/8$	458.8	454.4
$1 \times \lambda_0/8$	460.4	454.7
$1.05 \times \lambda_0/8$	459.6	453.3
$1.1 \times \lambda_0/8$	459.4	453.9

进量, VSI 算法采用基于对比度变化的重心提取法, PSI 算法分别采用 4M 幅法和 7 幅法两种 PSI 算法,计算得到的台阶高度数据  $H'$ 。图 6 给出了在扫描步长为  $\lambda_0/8$  条件下的台阶形貌和中间位置的一维轮廓曲线。

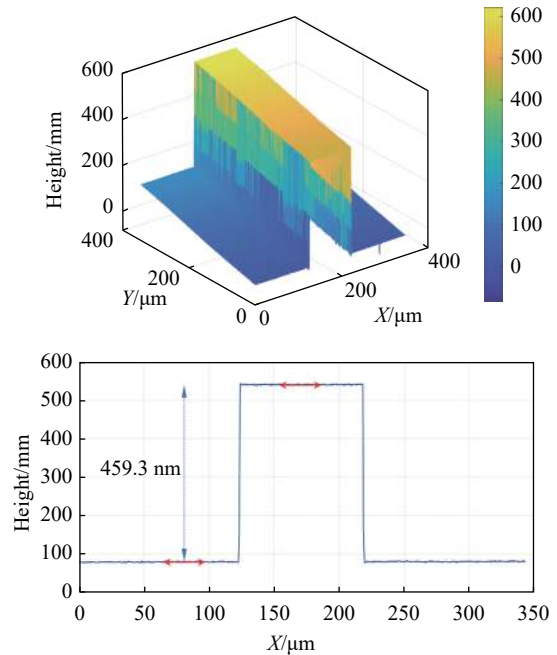


图 6 20 倍物镜检测标准台阶板的形貌数据 (4M 幅法)

Fig.6 Calculated topography of the step height standard using 20x interferometric microscopy (4M-frame method)

更换采用 50 倍干涉显微物镜,其  $NA$  为 0.55,  $NA$  效应的影响因子更小。仍然采用  $\lambda_0/8$  扫描步长,此时相当于仍未对  $NA$  效应引入的移相误差做校正,也即是移相量进一步偏离  $\pi/2$ 。计算得到的形貌数据如图 7 所示,仍可准确地复原台阶高度。

因而,此次实验分别采用 20 倍和 50 倍干涉显微镜检测了校准台阶高度为  $(459.8 \pm 3.0)$  nm 的标准台阶板。采用  $\lambda_0/8$  扫描步长时,没有考虑到  $NA$  效应对于移相量偏离  $\pi/2$  的影响,但采用基于对比度变化重心提取的 VSI 算法和 4M 幅 PSI 算法计算形貌数据,形貌复原结构仍然十分准确。此外,人为设置扫描步长偏离  $\lambda_0/8$ ,但只要准确知晓 PZT 实际的步长,也可以准确复原形貌。因此,对于 PZT 误差的影响,可以通过检测已知高度的台阶,对 PZT 的线性度进行标定,从而准确得到 PZT 的实际移动量。



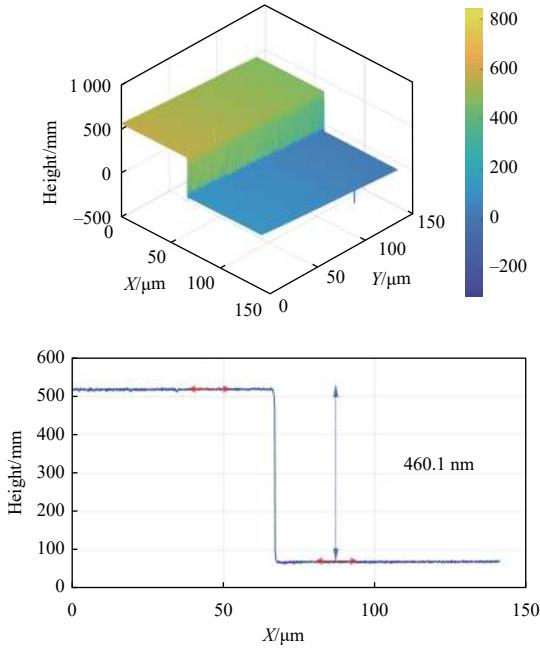


图 7 50 倍物镜检测标准台阶板的形貌数据 (4M 幅法)

Fig.7 Calculated topography of the step height standard using 50× interferometric microscopy (4M-frame method)

## 5 结 论

针对白光显微干涉术垂直扫描移相的移相误差问题进行了理论分析, 将其归类为干涉显微物镜 NA 效应的影响和移相器误差两种类型。分析了移相误差对于三维形貌复原算法中 VSI 算法和 PSI 算法的影响。结果表明: 宽带作用下, PSI 算法中的 7 幅算法延续了其在单色光情况下对移相误差不敏感的优越表现, 4M 幅法产生的精细相位误差形式恰好与相位转换为形貌高度信息时所需要考虑的干涉显微物镜 NA 效应的影响因子相抵消。PZT 位移误差可以通过测量已知高度的台阶进行标定去除。因而, 在白光显微干涉术中优选基于对比度变化重心提取的 VSI 算法和 4M 幅 PSI 算法计算形貌数据, 可以不用考虑计算 NA 效应影响因子的复杂过程, 即不需要修正扫描步长以满足移相量为  $\pi/2$ , 只需确保 PZT 位移准确, 即可准确获得三维形貌数据, 这有效地保证了低相干垂直扫描算法的可操作性和鲁棒性。

### 参考文献:

[1] Schmit J, Creath K, Wyant J C. Surface Profilers, Multiple Wavelength, and White Light Interferometry [M]. 3rd ed. US: Wiley, 2007: 667-755.

[2] de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography [J]. *Advanced Optics Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.

[3] Sandoz P. An algorithm for profilometry by white-light phase shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(8): 1545-1554.

[4] Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1996, 13(4): 832-843.

[5] 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): 2488-2493.

[6] de Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(2): 389-401.

[7] Wang J, Chen L. Measurement of micro-displacement using white-light interference based on a spatial frequency domain algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 874-877. (in Chinese)

[8] Deng Q, Tang Y, Zhou Y, et al. High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001. (in Chinese)

[9] Montgomery P C, Salzenstein F, Montaner D, et al. Implementation of a fringe visibility based algorithm in coherence scanning interferometry for surface roughness measurement [C]// Proc SPIE, 2013, 8788: 87883G.

[10] Han Z, Chen L. Eight-step phase shifting algorithm for broadband light interferometry insensitive to envelop variation and phase shifting error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1236-1242. (in Chinese)

[11] Dong Chen. High-definition vertical-scan interferometry, US: US11473447[P].2006-06-23.

[12] Creath K. Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(15): 3333-3338.

[13] Sheppard C J R, Larkin K G. Effect of numerical aperture on interference fringe spacing [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4731-4734.

[14] Dubois A, Selb J, Vabre L, et al. Phase measurements with wide-aperture interferometers [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(14): 2326-2331.

[15] de Groot P. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4723-4730.

[16] Phillion D W. General methods for generation phase-shifting interferometry algorithms [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(31): 8098-8115.