

文章编号 1004-924X(1999)05-0106-08

基于白光的双波长相移干涉的误差分析

周明宝 林大键

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室 成都 610209)

郭履容 郭永康

(四川联合大学物理系 成都 610041)

摘要 概略介绍了基于白光的双波长相移干涉表面形貌测量系统的原理, 具体分析了影响测量精度的各种误差因素, 给出了相应的误差计算公式和计算结果, 并用模拟测量结果和实际测量结果进行了验证和比较。

关键词 相移干涉 表面形貌 测量 测量精度

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

1 引言

相移干涉是一种高效和高精度的位相测量方法, 可用于二维位相分布或二维表面形貌的测量。位相测量精度可达到 $\lambda/100$ 程度, 形貌测量精度可达到纳米量级。

相移干涉的测量精度受多种因素的影响, 一些重要的系统误差或随机误差已在一些文献^[1-5]中有了专门的论述。由于这些文献只局于一个或几个误差的分析, 没有从系统的角度综合考虑, 因此本文在研制表面形貌测试仪的基础上, 对基于白光的双波长相移干涉的误差进行了全面的探讨, 并将理论分析结果和模拟结果与具体测量结果进行了比较, 验证了理论分析结果的正确性, 为降低误差影响和提高测量精度指出了方向。

2 基于白光的双波长相移干涉法测量表面形貌的原理

图1是一种基于白光的双波长相移干涉原理的表面形貌测量系统^[6]。它实际上是一种 Linnik 偏振光路型干涉显微镜, 主要由照明系统、干涉显微系统和 CCD 干涉图像测量系统等部分组成。为了实现相移干涉测量, 在干涉光路中加入了由 $1/4$ 波片和偏振片组成的移相器,

旋转偏振片就可以改变两束相干光的位相差, 从而使干涉光强受到调制。启动系统测量前, 将从 PBS 到参考面的光程与从 PBS 到被测面中一假想基准面的光程调节到等光程, 如果被测面上某一测量点偏离基准面 h , 那么对应的两束相干光将产生光程差, 干涉光强发生变化, 从而干涉光强的强弱反映了被测表面形貌的信息。根据偏振光干涉理论, 两束相干光形成的干涉光强为

$$I/I_r = \frac{1}{2}(\eta + 1) + \frac{1}{2}(\eta - 1) \cdot (\cos 2\theta_{BP} \cos \varphi + \sin 2\theta_{BP} \sin \varphi \cos \delta) + \overline{\eta} \sin 2\theta_{BP} \cos \varphi \cos \varphi - \overline{\eta} \cos 2\theta_{BP} \sin \varphi \cos \varphi \cos \delta + \overline{\eta} \sin \varphi \sin \varphi \sin \delta \quad (1)$$

式中, η 是两束相干光光强 I_s, I_r 的比; δ 是移相器中的 $1/4$ 波片引起的位相延迟; φ 是移相器引起的位相调制项, 由移相器中的检偏器的透振方向 θ_p 和 $1/4$ 波片的晶轴方向 θ_{BP} 决定, 且 $\varphi = 2\theta_{BP} - 2\theta_p$; φ 是被测表面引起的位相。

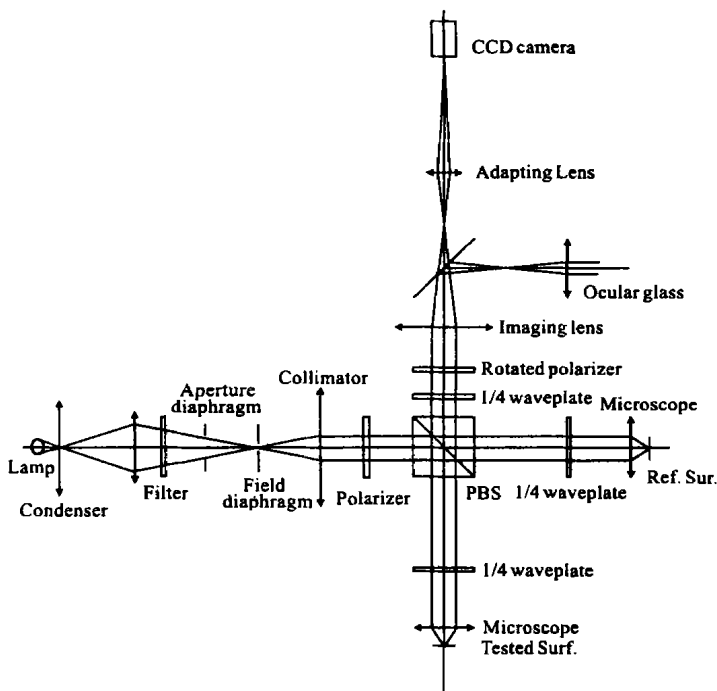


Fig. 1 Measuring system for surface topography based on white-light two-wavelength phase-shifting interferometry

如果移相器中的 $1/4$ 波片的晶轴方向与 P 光偏振方向成 45° , $1/4$ 波片引起的位相延迟是 90° , 即 $\theta_{BP} = \pi/4$, $\delta = \pi/2$, 则上式可以简化为

$$I = \frac{1}{2}(I_s + I_r) + \overline{I_s I_r} \cos(\varphi - \varphi) \quad (2)$$

测量系统采用五步相移干涉方法测量被测位相 φ , 利用 CCD 图像测量系统依次测出位相调制项取五个不同移相值时的干涉图像, 便可计算出被测位相, 其位相计算公式为

$$\varphi = \arctg \frac{2(I_4 - I_2)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (3)$$

式中, I_1, I_2, \dots, I_5 是 φ 分别取 $\varphi = -\pi, -\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ 时测得的干涉光强。

测出表面形貌引起的位相 φ 后, 就可以根据位相与表面形貌间的关系算出表面形貌, 其公式为

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \varphi \quad (4)$$

单波长相移干涉方法只能测量深度在 $\lambda/2(n-1)$ (透射式测量) 或 $\lambda/4$ (反射式测量) 范围内的表面, 为了满足大深度表面的测量需要, 系统采用了双波长测量方法, 用来扩大深度测量范围。其基本思想是, 首先用波长为 λ_1 的光束(这通过更换照明系统中的滤光片来实现) 测出被测表面引起的位相 φ_1 ; 然后换用波长为 λ_2 的光束再一次测出位相 φ_2 。波长 λ_1, λ_2 不同, 各自测出的位相 φ_1, φ_2 不同。利用 $\lambda_1, \varphi_1, \lambda_2$ 和 φ_2 便可计算出被测表面的形貌, 其计算公式为^[7-8]

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} + \frac{\lambda_{eq}}{2} & \text{如果 } \varphi_2 - \varphi_1 \in [-2\pi, -\pi] \\ \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} & \text{如果 } \varphi_2 - \varphi_1 \in [-\pi, \pi] \\ \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} - \frac{\lambda_{eq}}{2} & \text{如果 } \varphi_2 - \varphi_1 \in [\pi, 2\pi] \end{cases} \quad (5)$$

式中, λ_{eq} 被称为等效波长, 由 λ_1, λ_2 决定, 且 $\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 。

上面简单地介绍了基于白光的双波长相移干涉测量的原理, 下面具体分析各主要误差源对测量精度的影响。

3 测量精度分析

从前面的计算公式可以看出, 相移干涉的位相及表面形貌测量精度主要与移相及干涉光强等因素有关。对基于白光的双波长相移干涉而言, 测量精度还与干涉光的单色性即频谱宽度、双波长测量实现手段等因素有关。具体地讲, 影响比较严重的误差源主要有: ①移相器方面的误差, 包括移相误差、1/4 波片位相延迟误差及方位角误差; ②干涉光强不稳定及干涉光非单面性引起的误差; ③干涉光强测量方面的误差, 包括 CCD 噪声等引起的光强测量误差及数据量化误差。与传统的位相测量方法不同, 在相移干涉测量方法中, 干涉条件的对比度以及被测区域上明度的不均匀性, 并不严重影响位相及表面形貌的测量精度, 其影响几乎可以不予考虑。

除这些误差因素外, 系统还存在着许多其它误差, 这些误差有些影响很小可以忽略, 如能量测量系统残余的非线性、采样单元增益的不一致等误差的影响就可以忽略; 有些是系统误差, 这些系统误差在测量系统装调后将基本保持不变或在测量结果中有一定的表现形式, 因此所造成的影响可通过数据处理方法剔除掉, 光路调节不完善或元件表面缺陷等误差源引起的表面形貌测量误差就是系统误差。由于这些误差已在一些文献中讨论过, 因此本节不作讨论, 仅讨论影响比较严重的不能通过数据处理方法剔除的误差。

3.1 移相器中 1/4 波片方位偏差的影响

1/4 波片与检偏器组成移相器, 其作用是在两束相干光的位相差中产生一个可控的位相

调制项。在移相器中, $1/4$ 波片是固定不动的, 其晶轴方向位于 45° 方向上, 但由于安装误差, $1/4$ 波片不可避免地会出现方位偏差, 从而引起表面形貌的测量误差。设 $1/4$ 波片方位角误差为 $\Delta\theta_{BP}$, 根据(1)和(3)式可以推导出它引起的测量误差为

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos 2\Delta\theta_{BP}} - 1 \right) \sin 2\varphi \quad (6)$$

如果根据消光位置来安装和调整 $1/4$ 波片, 那么 $\Delta\theta_{BP}$ 可控制在 3° 以内, 由(6)式得最大位相测量误差为 $\Delta\varphi = 2.75414 \times 10^{-3} \text{ arc} = 0.1578^\circ$ 。

3.2 移相器中 $1/4$ 波片位相延迟误差的影响

为了实现双波长测量, 移相器中的 $1/4$ 波片是针对两个波长 λ_1 和 λ_2 进行设计的。由于材料等因素的限制, 一个波片很难协调到既是波长 λ_1 的 $1/4$ 波片, 又是波长 λ_2 的 $1/4$ 波片。此外, 在制作波片时, 受加工和测量精度的影响, 波片的几何厚度不可避免地存在着误差, 因此 $1/4$ 波片会引起位相延迟误差。

设 $1/4$ 波片位相延迟误差为 $\Delta\delta$, 根据(1)和(3)式可以推导出它引起的位相测量误差为

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (\cos \Delta\delta - 1) \quad (7)$$

在测量系统中双波长 $1/4$ 波片的工作波长分别为 $\lambda_1 = 0.6\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.5\mu\text{m}$, 材料为天然石英, 厚度为 $1.7985\text{mm} \pm 1.5\mu\text{m}$ 。这样的厚度及精度, 波片对 λ_1 产生的位相延迟误差为 $\Delta\delta = -8.52478^\circ \sim 7.83828^\circ$; 对 λ_2 产生的位相延迟误差为 $\Delta\delta = -9.88563^\circ \sim 10.0814^\circ$; 取 $\Delta\delta = 10^\circ$; 代入上式得到波片位相延迟误差引起的位相测量误差为 $\Delta\varphi = 7.59612 \times 10^{-3} \text{ arc} = 0.4352^\circ$ 。由此可见, 尽管 $1/4$ 波片具有较大的位相延迟误差, 但它引起的位相测量误差并不大。正由于此, 在测量系统中采用了双波长 $1/4$ 波片, 避免了波片更换的麻烦。

3.3 移相误差

相移法测量位相, 移相误差是一个重要的误差源。J. Schwider^[11]和 K. Kinnstaetter^[9]等人在他们的论著中详细研究了移相误差对位相测量的影响, 并给出了误差计算公式。鉴于所推导的公式非常复杂, 并存在一定的局限性, 我们用另一种方法推导了一个等效的但简单得多的公式, 其表达式为

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{-\sin^2\varphi (\delta\varphi + 2\delta\varphi + \delta\varphi) - \cos^2\varphi (2\delta\varphi + 2\delta\varphi)}{4 + \sin\varphi \cos\varphi (\delta\varphi + 2\delta\varphi + \delta\varphi - 2\delta\varphi - 2\delta\varphi)} \quad (8)$$

分析这个式子可知, 当各步移相误差 $\delta\varphi$ 绝对值相等且都取最大值时, 位相测量误差最大且等于移相误差值。在测量系统中, 不同移相量是通过旋转检偏器得到的, 检偏器最大转角误差可控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内, 因此移相误差小于 $\pm 0.5^\circ$; 引起的位相测量误差最大值为 $\Delta\varphi = 0.5^\circ$ 。

3.4 干涉光频谱宽度的影响^[10]

在相移干涉中, 参与干涉的光束具有一定的频谱宽度, 干涉光的这种非单色性将会影响表面形貌的测量精度。如果干涉光的频谱宽度为 $\Delta\lambda$ 、中心波长为 λ_0 , 那么表面形貌的实际测量值可表达为

$$h_m = \frac{\lambda_0}{4\pi} \cdot \arctg \frac{\lambda_0 + \Delta\lambda/2 \sin \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \right) d\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda/2 \cos \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \right) d\lambda} \quad (9)$$

式中, h 是被测表面的实际深度, h_m 是测量得到的深度, 两者之间的差值便是多色干涉给测量造成的误差。

图 2 反映了被测表面深度在 $\pm 0.1375\mu\text{m}$ 范围中心波长 λ_0 取 $0.55\mu\text{m}$ 时表面形貌测量精度与谱宽的关系。在 $\Delta\lambda = 50\text{nm}$ 时, 表面形貌测量的最大测量误差为 0.0917nm , 相应的位相测量误差为 $\Delta\varphi = 0.12^\circ$; 图 3 反映了被测表面深度在 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 范围谱宽 $\Delta\lambda$ 取 50nm 时表面形貌测量精度与中心波长 λ_0 的关系。

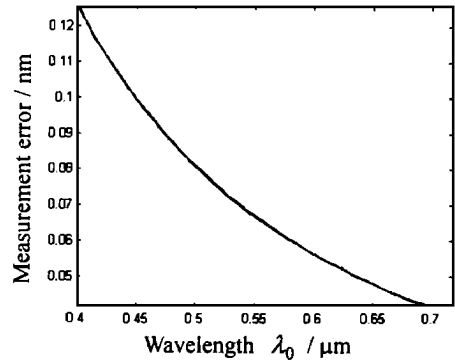
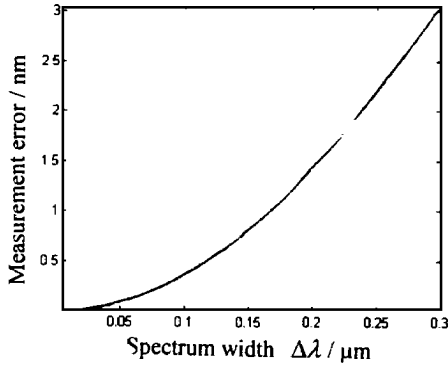


Fig. 2 Relation between the measuring accuracy and the spectrum width

Fig. 3 Relation between the measuring accuracy and the wavelength of the interference light

从图 2 和图 3 可见, 参加干涉的白光频谱越宽, 测量精度越低, 中心波长越大, 测量精度越高。因此为了提高测量精度, 应选用较长的波长, 在系统允许的情况下尽量压缩频谱宽度。

3.5 干涉光强不稳定或漂移对测量的影响^[3]

如果电源或测量环境不稳定或由于其它某种原因造成光源输出功率出现起伏, 那么干涉光强会随着起伏, 这将使位相测量产生误差。如果干涉光强在测量时刻起伏变化率为 q , 那么实际测量的光强将为 $I = (1 + q)I$, 其中, I 是假设干涉光强没有起伏时测得的光强。对于五步相移法, 根据 (2) 和 (4) 式可求得干涉光强不稳定 q 引起的位相测量误差为

$$\Delta\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{2[(1+q_4)(1+\sin\varphi) - (1+q_2)(1-\sin\varphi)]}{2(1+q_3)(1+\cos\varphi) - (1+q_5)(1-\cos\varphi) - (1+q_1)(1-\cos\varphi)} - \varphi \quad (10)$$

从这个式子可以看出, 光强不稳定的影响不仅与光强不稳定的程度有关, 而且还与被测位相有关。模拟计算表明, 如果光强变化 $\pm 1\%$, 那么在整个位相 $[-\pi, +\pi]$ 测量范围内位相测量误差最大值为 $\Delta\varphi = 0.8103^\circ$ 。

3.6 CCD 图像采集系统的测量误差

在 CCD 图像采集系统中, 主要有三个噪声源影响着光强测量精度: 一个是量子噪声, 这是光电探测系统不可避免的噪声, 并且随着信号减弱, 其影响增强; 一个是 CCD 像元噪声, 此噪声与工作环境温度密切相关, 环境温度提高, 其强度迅速增加; 另一个是信号放大与处理电路的噪声, 此噪声对信号的影响相对弱小, 可不予考虑。

从效果上看, 由噪声引起的光强测量误差对位相测量的影响等效于光强不稳定对位相测量的影响, 因此可用 (10) 式来分析光强测量误差对测量的影响。在测量系统中, CCD 图像采集

系统的信噪比为 58, 噪声引起的光强测量误差为 $N/S = 10^{-58/20} = \pm 0.125893\%$ 。模拟计算表明, 在最恶劣的情况下, 它引起的测量误差最大值为 $\Delta Q = 0.1020^\circ$ 。

3.7 数据量化产生的测量误差

在测量系统中, 光强的测量是量化的, 这不可避免地产生量化误差, 从而引起光强测量误差。与 CCD 图像采集系统的噪声不同, 量化误差与被测光强的强弱无关, 即无论被测光强的强弱, 量化误差的大小都是一样的, 即都是 ± 0.5 的灰度, 因此被测光强越弱, 量化误差的影响越大。

为评价量化误差对位相测量的影响, 所用的方法是, 用位相计算公式实际计算出在量化情况下被测位相的值, 然后同被测位相的实际值进行比较, 求出量化误差在每个位相处引起的位相测量误差。

图 4 是用这种方法模拟计算出的量化误差在各位相处引起的位相测量误差, 在整个 $[-\pi + \pi]$ 位相范围内最大误差为 $\Delta Q = 0.2887^\circ$ 。

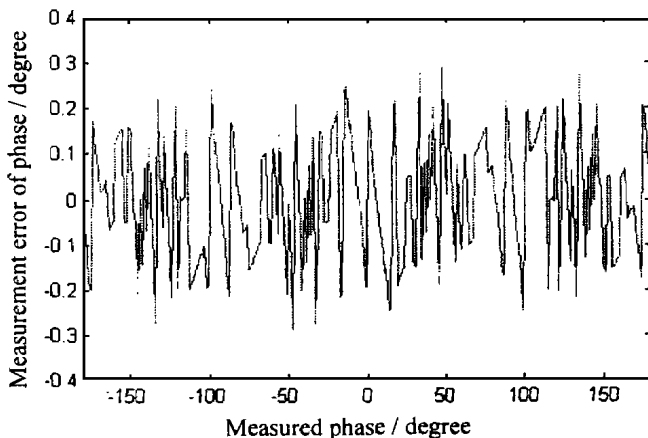


Fig. 4 Phase measuring error induced by quantum error

上面分析的几种误差是基于白光的双波长相移干涉的主要误差源, 如果这些误差因素彼此随机独立, 那么在這些误差共同作用下, 系统的位相测量误差为

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5 + \Delta Q_6 + \Delta Q_7 = 1.1086^\circ \quad (11)$$

相应地, 表面形貌测量误差为

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta Q = \frac{0.55 \times 10^3}{4\pi} \times 1.1086 \times \frac{180}{\pi} \cong 0.8(nm) \quad (12)$$

需要特别指出的是, (11) 式仅考虑了已分析的七种误差, 对于由光路调节不完善和元件表面缺陷等误差源引起的系统误差, 如果未通过数据处理予以剔除, 必须考虑其影响, 因为它们对测量所产生的影响是相当严重的。

上面的分析结果是对单波长测量而言的, 如果采用双波长测量, 测量误差将被放大, 这是由于双波长测量法在扩大深度测量范围的同时也放大了深度测量误差^[7]。在测量系统中, $\lambda_1 = 0.6\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.5\mu\text{m}$, 能够测量的深度范围为 $[-0.75\mu\text{m}, 0.75\mu\text{m}]$, 深度测量范围放大率为 $\lambda_g/\lambda = 6$, 因此测量误差也将放大相同的倍数, 为 4.8nm 。

4 计算机模拟和实验验证^[6]

为了考察各种误差源同时存在时对位相及表面形貌测量的影响, 编写了模拟测试程序。为评价各种误差对整个深度测量范围内所有深度的影响, 模拟测量采用双波长测量法, $\lambda_1 = 0.6\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.5\mu\text{m}$; 模拟测量中输入的各种误差参数值与前面理论分析的相同; 模拟测量的是

一个正弦状连续表面, 连续表面的形状为

$$h(x, y) = A_{xy} \cdot [\cos(f_{xy}x) + \cos(f_{xy}y)] \quad (13)$$

模拟测量时, A_{xy} 取 0.375 , f_{xy} 取 $2\pi/25.6$, $h(x, y)$ 的值域为 $[-0.75 \mu\text{m}, 0.75 \mu\text{m}]$ 。

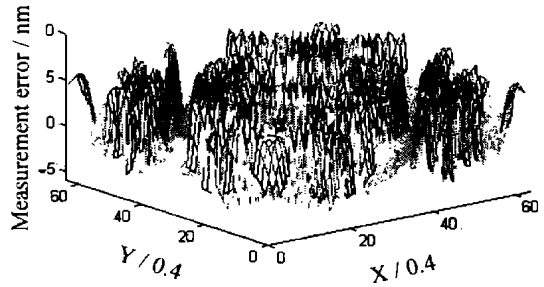


Fig. 5 Measuring error induced by a number of error sources

各种误差引起的表面形貌测量误差如图 5 所示。可以看出, 在整个测量范围内表面形貌测量的最大误差为 7.4 nm 。

表 1 是测量精度实际测量的结果。被测对象是一个标准板上的台阶, 在台阶附近随意地选取 8 个采样点, 4 个在高台阶上, 4 个在低台阶上, 重复测量台阶 10 次, 计算出各采样点 10 次测量结果的标准偏差和最大残差, 并将这样得到的标准偏差作为重复测量精度。从表 1 中的结果可以看出, 测量系统的重复测量精度为 1.3 nm , 各采样点处 10 次测量的最大残差为 2.3 nm 。

Table 1 Repeat measurement accuracy of the measuring system (Unit: μm)

No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
0.0011	0.0010	0.0013	0.0012	0.0013	0.0011	0.0013	0.0011
0.0018	0.0016	0.0021	0.0023	0.0015	0.0015	0.0022	0.0019

比较测量精度的理论分析结果、模拟结果和实测结果可以看出: (1) 模拟计算结果稍大于理论分析结果, 这可能是由于各误差源不一定是随机独立的, 彼此之间可能存在着相互增强作用, 因此用 (11) 式合成的结果比实际情况偏小; (2) 实例结果小于理论分析结果和模拟计算结果, 这可能是由于: ①模拟计算结果是各误差源都处于最坏情况时得到的最大值, 而在实际测量中这种情况是不大可能出现的; ②模拟计算的精度中含有系统误差成分, 而测量的精度是重复测量精度, 系统误差成分被大大剔除了。如果考虑到这些实际情况, 应该说三种方法得到的结果基本是一致的, 理论分析的结果是合理的, 其分析方法以及给出的公式是正确的。

5 结 论

经过对各种误差源影响的分析可以看出, 在基于白光的双波长相移干涉中存在着多种误差因素, 这些误差源的影响是不同的。归纳起来, 对位相测量精度有较大影响的因素主要有: (1) $1/4$ 波片方位角误差, (2) $1/4$ 波片位相延迟误差, (3) 检偏器转角误差, (4) 干涉光强不稳定, (5) CCD 图像采集系统的测量误差, (6) 数据量化误差。可以看出, 这些误差源主要与移相器和 CCD 图像采集系统有关, 因此, 对测量精度而言, 测量系统中的移相器以及 CCD 图像采集系统是两个最关键的部分。精确控制移相器并提高 CCD 图像采集系统的性能是提高测量精度最有效的途径。

参 考 文 献

- 1 Schwider J, J Burow J, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. *Appl Opt*, 1983, 22(21): 3421 ~ 3432
- 2 Creath K. Phase-measurement interferometry: Beware these errors. *Proc SPIE, Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry*, 1991, 1553: 213 ~ 220
- 3 Brophy C P. Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry. *J Opt Soc Am A*, 1990, 7(4): 537 ~ 541
- 4 Ovryn B, Haacke E M. Temporal averaging in a turbulent environment: compensation for phase drifts in phase shifting interferometry. *Proc SPIE*, 1991, 1553: 221 ~ 230
- 5 Freischlad K, Koliopoulos C L. Fourier description of digital phase-measuring interferometry. *Opt Soc Am A*, 1990, 7(4): 542 ~ 551
- 6 周明宝. 衍射光学元件表面形貌三维测量方法研究. [博士学位论文], 成都: 四川联合大学, 1998
- 7 Cheng Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry. *Appl Opt*, 1984, 23(24): 4539 ~ 4543
- 8 周明宝, 林大键, 郭履容, 郭永康. 用双波长测量不连续深结构表面. *计量学报*, 待发表
- 9 Kinnstaetter K, Lohman A W, et al. Accuracy of phase shifting interferometry. *Appl Opt*, 1988, 27(24): 5082 ~ 5089
- 10 周明宝, 林大键, 郭履容, 郭永康. 白光相移干涉中谱宽对测量精度的影响. *计量学报*, 待发表

Error Analysis on Two-wavelength White-light Phase-shifting Interferometry

ZHOU Ming-Bao, LIN Da-Jian

(State Lab of Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics & Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

GUO Lu-Rong, GUO Yong-Kang

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610041)

Abstract

The theory of the two-wavelength white-light phase-shifting topography measuring system is described in brief. Many sources that lead to measuring errors are analyzed, and the relative error-calculating formulas and results are given. Their validity is verified by comparison with the simulated result and the measured result.

Key words: Two-wavelength phase-shifting interferometry, Topography, Measurement, Accuracy

周明宝 男, 1965年12月出生, 1986年毕业于浙江大学。博士, 副研究员。现工作于中科院光电技术研究所, 目前主要从事微机械、微光学、微电子等微细加工领域的单元技术研究。