

超精表面缺陷检测的光学混频误差分析

林浩山¹ 陈举科¹ 李玉和^{2*} 李庆祥² 潘福东¹ 王力虎¹

¹广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004

²清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 双频激光外差干涉法与扫描探针相结合的超精表面缺陷检测系统具有很高的分辨率。但系统光源和光学器件的各种误差因素会产生非线性混频误差,影响系统精确测量。利用琼斯矩阵分析了同时存在激光光源椭圆偏振化和方位角误差以及光学器件相位延迟和偏振泄漏等综合因素引起的偏振态变化,并由此研究了它们频率混叠产生的非线性误差。结果表明,由各种误差因素引起的非线性混频误差呈正弦规律变化,激光光源非理想和偏振分光镜对位移测量误差影响较大而1/4波片的影响较小。同时,结合计算结果对系统提出了减少非线性误差的方法措施。

关键词 测量;外差干涉;偏振光;琼斯矩阵;频率混叠;非线性误差

中图分类号 TH744.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021203

Error Analysis of Optical Frequency Mixing on Detecting Device for Superfinish Surface Scratch

Lin Haoshan¹ Chen Juke¹ Li Yuhe² Li Qingxiang² Pan Fudong¹ Wang Lihu¹

¹College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A novel method with high resolution has been proposed which is based on heterodyne interferometry and scanning probe to get the measurement values of superfinish surface scratch. But the optical nonlinear errors affect the measurement precision of the system. We adopt the Jones matrix to analyze the change of elliptic polarization caused by the composite error factors, which are polarization ellipticity and installation orientation error of laser source, phase retardation of quarter-wave plate and polarization leakage of polarization beam splitter. The measurement errors of frequency mixing about these elliptic polarization beams arriving at the photodiode detector are studied by vector theory. The results show that the measurement errors are periodic errors, and they are more affected by nonideal laser and polarization beam splitter. Also, the methods of reducing nonlinear error according to the numerical results in the system are suggested.

Key words measurement; heterodyne interferometry; polarized light; Jones matrix; frequency mixing; nonlinear errors

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 240.2130; 230.4320

1 引言

对超精加工表面进行检测是盘片或晶片制造过程中的重要组成部分。电子产品高集成化和高性能化发展,要求对抛光盘片或晶片的超精表面缺陷检测实现纳米级分辨率进而提高成品率。相对于表面检测技术如光学干涉法等^[1-3],外差干涉与探针扫描集成化检测技术则具有纳米级的纵向、横向分辨率和高的测量精度^[4]。然而,激光外差干涉光路中两个频率的偏振光不能彻底分开而形成的非线性混频误差对系统检测性能有至关重要影响^[5-7]。多年来许多学者对激光外差干涉非线性误差进行了理论与实验研究^[7-18],如文献

收稿日期: 2014-09-05; 收到修改稿日期: 2014-09-16; 网络出版日期: 2014-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61362035,51275259)

作者简介: 林浩山(1964—),男,博士,副教授,主要从事精密测量技术方面的研究。E-mail: gllinhs2004@aliyun.com

*通信联系人。E-mail: liyuhe@mail.tsinghua.edu.cn

[8-10]分别研究了波片相位延迟误差与安装误差引入的非线性漂移,确定了纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的纳米比方法和幅值估算方法;分析了共光路外差干涉仪中由激光光源的椭圆偏振化和Wollaston棱镜的安装方位角所引起的频率混叠误差的大小及变化规律等。本文采用横向塞曼双频激光外差干涉法和扫描探针技术构建了一种新型的超精表面缺陷检测系统,利用琼斯矩阵探讨了光学系统偏振态变化规律,分析计算了多种干扰因素的混频误差及其综合影响,并讨论了减少混频误差的方法措施,其结果将对测量系统设计、调试具有指导意义。

2 超精表面缺陷检测系统

超精表面缺陷检测系统采用双频激光外差干涉法对微探针振动进行测量,如图1所示。频差为3.6 MHz的横向塞曼He-Ne激光器在理想情况下输出正交线偏振的双频激光,在激光器内部由分光镜将光分为两束,反射光检偏后由内部探测器接收形成参考信号,在激光器尾部输出接入相位计,作为鉴相的参考信号。透射光从激光器前端输出,经过小透镜2会聚在针孔3上,针孔滤除杂散光后由双胶合透镜4将光束扩成平行光束。由于小透镜表面为凸面,同时表面镀有增透膜,反射光较弱而且不进入激光器,同时透射光经过小孔,其后的反射光只有很少部分能够通过小孔,就不会和激光器的端镜形成另一谐振腔而导致激光器失稳,从而有效避免激光回授对激光器稳频的影响。

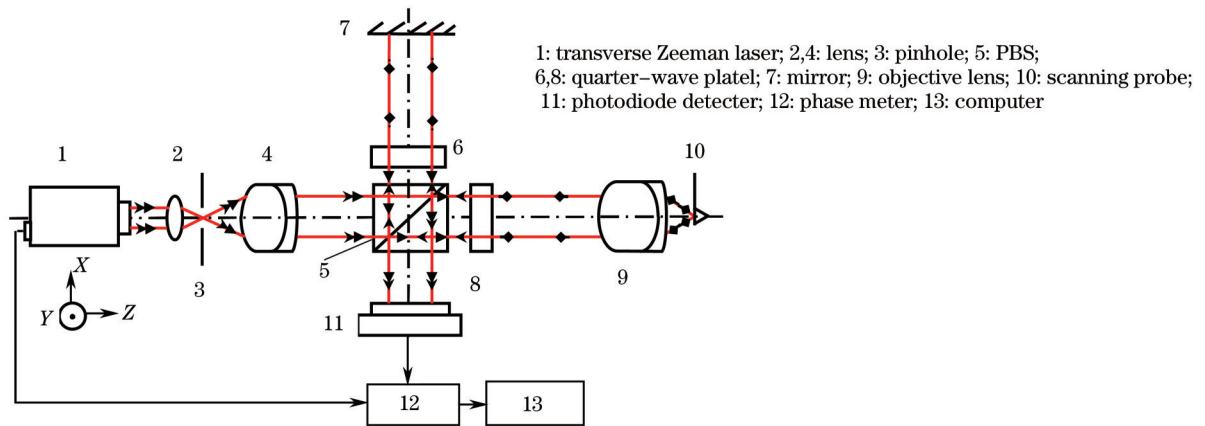


图1 超精表面缺陷检测系统组成结构

Fig.1 Optical schematic of detecting device for superfinish surface scratch

平行光束通过偏振分光棱镜(PBS)进行偏振分光,其中反射光为s分量形成参考光,透射光为p分量形成测量光。参考光先经过快轴沿45°放置的1/4波片1后被平面反射镜反射,反射光再次经过1/4波片1,使得参考光的偏振方向旋转90°,由s偏振变成p偏振,再次经过PBS时变为透射光;测量光经过快轴沿45°放置的1/4波片2和无限筒长的显微物镜聚焦在微探针背面,测量光经微探针反射后再次经过1/4波片2,偏振方向也旋转90°,由p偏振变成s偏振,再次经过PBS后被反射,并与参考光合光。合成光进入光电探测器检偏接收后形成鉴相的测量信号,测量信号输入相位计与激光器输出的参考信号进行比相。微探针振动位移量由式 $z = \lambda \Delta\varphi / 720$ 来计算,式中He-Ne激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\Delta\varphi$ 为相位变化量。

3 系统光学偏振态的琼斯矩阵

在实际的干涉测量中,激光源总会存在一定的椭圆偏振化或光束非正交。这样,检测系统图1中激光源输出频率 f_1 、 f_2 的双频激光可表示为

$$E = E_1 \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \cos x_1 - j \sin \theta_1 \sin x_1 \\ \sin \theta_1 \cos x_1 + j \cos \theta_1 \sin x_1 \end{pmatrix} \exp(-j2\pi f_1 t) + E_2 \begin{pmatrix} -\sin \theta_2 \cos x_2 - j \cos \theta_2 \sin x_2 \\ \cos \theta_2 \cos x_2 - j \sin \theta_2 \sin x_2 \end{pmatrix} \exp(-j2\pi f_2 t), \quad (1)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, $E_1 \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \cos x_1 - j \sin \theta_1 \sin x_1 \\ \sin \theta_1 \cos x_1 + j \cos \theta_1 \sin x_1 \end{pmatrix}$ 、 $E_2 \begin{pmatrix} -\sin \theta_2 \cos x_2 - j \cos \theta_2 \sin x_2 \\ \cos \theta_2 \cos x_2 - j \sin \theta_2 \sin x_2 \end{pmatrix}$ 为频率 f_1 、 f_2 双频激光幅值, θ_i ($i=1,2$)为光源偏振光的方位角且 $-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$, x_i 为光源偏振光的椭率角, $x_i > 0$ 表示右旋椭圆偏振光、反

之, $x_i < 0$ 为左旋椭圆偏振光。

系统测量光路的琼斯矩阵为 $J_M = R(X) \cdot J_r \cdot J_q^* \cdot J_m \cdot J_q \cdot J_l$ 。其中, 反射镜的琼斯矩阵为 $J_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$; J_q 、 J_q^* 分别表示 1/4 波片对正向与反向通过偏振光的琼斯矩阵, 且二者相位共轭, 假设 1/4 波片的相位延迟量为 $\delta_Q = \pi/2 + \delta_q$, 其快轴与 x 轴夹角为 $\theta_Q = \pi/4 + \theta_q$, 且 $\delta_q \ll 1$ 、 $\theta_q \ll 1$, 可以得到 $J_q^* = \begin{bmatrix} 1 - j \tan \delta_Q / (2 \cdot \cos 2\theta_Q) & -j \tan \delta_Q / (2 \cdot \sin 2\theta_Q) \\ -j \tan \delta_Q / (2 \cdot \sin 2\theta_Q) & 1 + j \tan \delta_Q / (2 \cdot \cos 2\theta_Q) \end{bmatrix}$; 由于光路中光学材料的应力双折射会引起偏振态变化、检偏器偏振度也会引起测量误差, 为了简化分析, 这些影响等效到 PBS 反射与透射的相位误差中, 若假定在 PBS 内反射光 s 分量与透射光 p 分量的相移为常数且相等, 则其反射琼斯矩阵为 $J_r = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、透射琼斯矩阵为 $J_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t \end{bmatrix}$, 参数 r 、 t 分别表示反射方向上 p 分量与 s 分量的反射系数比和透射方向上 s 分量与 p 分量的透射系数比, 且有 $r < 1$ 和 $t < 1$; 在直角坐标系中计算偏振态时所需的坐标旋转 $R(X) = \begin{bmatrix} \cos X & \sin X \\ -\sin X & \cos X \end{bmatrix}$, 其中 $X = -\pi/2$ 。将各矩阵代入系统测量光路的琼斯矩阵中, 略去除 rt 外更小的二阶小量, 得到测量光路琼斯矩阵:

$$J_M = \begin{bmatrix} (1 + \delta_q) - 2j\theta_q & 0 \\ 0 & rt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{M11} & J_{M12} \\ J_{M21} & J_{M22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

同理, 系统参考光路的琼斯矩阵为 $J_R = R(X) \cdot J_l \cdot J_q^* \cdot J_m \cdot J_q \cdot J_r$, 也将上述各矩阵代入式中并略去除 rt 外更小的二阶小量, 得到参考光路琼斯矩阵:

$$J_R = \begin{bmatrix} rt & 0 \\ 0 & (1 + \delta_q) + 2j\theta_q \end{bmatrix}. \quad (3)$$

如果引入复偏振参数 χ 矢量, 根据光学系统的偏振传递函数^[19], 若系统测量光路中频率 f_1 的入射光复偏振参数为 χ_{i1} , 则出射光 χ_{o1} 矢量可利用(1)式和(2)式得到

$$\chi_{o1} = (J_{M22}\chi_{i1} + J_{M21}) / (J_{M12}\chi_{i1} + J_{M11}) = \{rt / [(1 + \delta_q) - 2j\theta_q]\} \cdot [(\tan \theta_1 + j \tan x_1) / (1 - j \tan \theta_1 \tan x_1)]. \quad (4)$$

同理, 系统参考光路频率 f_2 的出射光 χ_{o2} 矢量也可利用(1)式和(3)式得到

$$\chi_{o2} = \{rt / [(1 + \delta_q) + 2j\theta_q]\} \cdot [(-1 + j \tan \theta_2 \tan x_2) / (\tan \theta_2 + j \tan x_2)]. \quad (5)$$

这样, 由 χ_{oi} ($i=1,2$) 矢量可以得到表示出射光偏振态的方位角 ψ_i 和椭圆率角 ε_i ^[19]:

$$\tan 2\psi_i = \frac{2 \operatorname{Re}(\chi_{oi})}{1 - |\chi_{oi}|^2}; \quad \sin 2\varepsilon_i = \frac{2 \operatorname{Im}(\chi_{oi})}{1 + |\chi_{oi}|^2}. \quad (6)$$

4 光学混频误差分析

利用出射光偏振态(6)式代入(1)式可获得频率 f_1 、 f_2 的出射激光干涉信号的总场强, 其正比于四个激光场强分量之和, 即: $E \propto A \exp[-j(2\pi f_1 t + \varphi_A)] + B \exp[-j(2\pi f_2 t + \varphi_B)] + \alpha \exp[-j(2\pi f_1 t + \varphi_\alpha)] + \beta \exp[-j(2\pi f_2 t + \varphi_\beta)]$, 式中 φ_A, φ_B 是激光入射到微探针表面产生的相差, 而 $\varphi_\beta, \varphi_\alpha$ 则是激光入射到参考镜产生的相差; A, B 分别为频率 f_1, f_2 的出射双频激光幅值, α, β 分别为频率 f_1 到 f_2 和频率 f_2 到 f_1 产生频率混叠的幅值^[10]。考虑了振幅和相位后得到各参量幅值分别为

$$\begin{aligned} A &= E_1 \exp(-j\varphi_m) (\cos \psi_1 \cos \varepsilon_1 - j \sin \psi_1 \sin \varepsilon_1), \\ \beta &= E_2 \exp(-j\varphi_m) (-\sin \psi_2 \cos \varepsilon_2 - j \cos \psi_2 \sin \varepsilon_2), \\ B &= E_2 (\cos \psi_2 \cos \varepsilon_2 - j \sin \psi_2 \sin \varepsilon_2), \\ \alpha &= E_1 (\sin \psi_1 \cos \varepsilon_1 + j \cos \psi_1 \sin \varepsilon_1), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 φ_m 为测量光和参考光之间由于微探针振动的多普勒频移而产生的理想相位差。

光电探测器经检偏接收到的信号光强正比于 E^2 , 其中 E^2 的直流分量和零拍调制信号被滤掉而只接收到拍频信号, 光电探测器输出的干涉信号复矢量可表示为^[10]

$$(s, \varphi) = (1, \varphi_m) + (|\alpha|/|A|, \varphi_\alpha - \varphi_\beta) + (|\beta|/|B|, \varphi_A - \varphi_B) + (|\alpha| \cdot |\beta| / |A| \cdot |B|, \varphi_\alpha - \varphi_\beta), \quad (8)$$

式中 s 是测量得到的拍频信号幅值, φ 是实际测得的与探针振幅相关的相位差。 $(|\alpha|/|A|, \varphi_\alpha - \varphi_\beta) + (|\beta|/|B|, \varphi_A - \varphi_B)$ 为一阶误差, 式中第四项为二阶误差。由(7)式和(8)式, 再考虑到 $\psi_1, \psi_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 很小, 可以忽略它们的高阶项以及二阶误差项, 则得到实际干涉信号全矢量的表达式为

$$(s, \varphi) = (1, \varphi_m) + \left[(\tan^2 \varepsilon_1 + \tan^2 \psi_1)^{1/2}, \arctan\left(\frac{\tan \varepsilon_1}{\tan \psi_1}\right) \right] + \left[(\tan^2 \varepsilon_2 + \tan^2 \psi_2)^{1/2}, -\arctan\left(\frac{\tan \varepsilon_2}{\tan \psi_2}\right) \right]. \quad (9)$$

由(9)式得到其相位误差复矢量图, 如图2所示。则被测相位误差 $\Delta\varphi$ 和幅值误差 ΔS 分别为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= C \sin(\xi - \varphi_m) = C \sin \xi \cos \varphi_m - C \cos \xi \sin \varphi_m, \\ \Delta S &= C \cos(\xi - \varphi_m) = C \sin \xi \sin \varphi_m + C \cos \xi \cos \varphi_m, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $C \sin \xi$ 是一阶误差项的垂直分量, 由图2得到其值为 $(|\tan \varepsilon_1| - |\tan \varepsilon_2|)$, $C \cos \xi$ 是一阶误差项的水平分量, 其值为 $(|\tan \psi_1| - |\tan \psi_2|)$ 。所以, 由相位复矢量图可以得到相位误差:

$$\Delta\varphi = (|\tan \varepsilon_1| - |\tan \varepsilon_2|) \cos \varphi_m - (|\tan \psi_1| - |\tan \psi_2|) \sin \varphi_m. \quad (11)$$

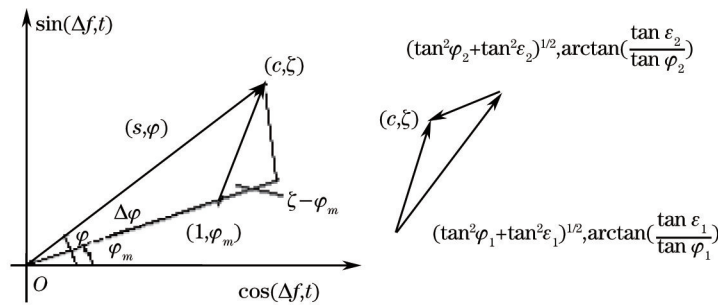


图2 相位误差复矢量图

Fig.2 Complex vectorgraph of measurement phase error

以上对光学混频误差进行了分析推导, 其相位误差结果可以利用给出的初始条件, 由(4)、(5)、(6)和(11)式联合求解得到, 再由相位差与光程差关系确定位移测量误差。下面分别对光源椭偏化和光束非正交、PBS 偏振泄漏、1/4 波片相位延迟和它们都存在时的实际情况进行数值分析。

图3为光源椭偏化和光束非正交时, 取PBS的 $r=s=0.01$, 1/4波片的 $\delta_q=0$ 和 $\theta_q=0$ 进行数值计算。其中, 曲线1、2表示入射正交双频激光 f_1, f_2 的椭率角在0.02到0.05变化时, 位移测量误差最大值在0.101 nm到0.126 nm间变化; 曲线3、4表示实际光源非正交双频激光方位角误差由 0.5° 到 1° 变化时, 位移测量误差最大值在0.134 nm到0.169 nm间变化。计算结果表明光源椭偏化和光束非正交是位移测量误差因素之一。

图4为PBS存在偏振泄漏时, 取正交双频激光椭率角为0.02、0.04而1/4波片的 $\delta_q=0$ 和 $\theta_q=0$ 进行数值

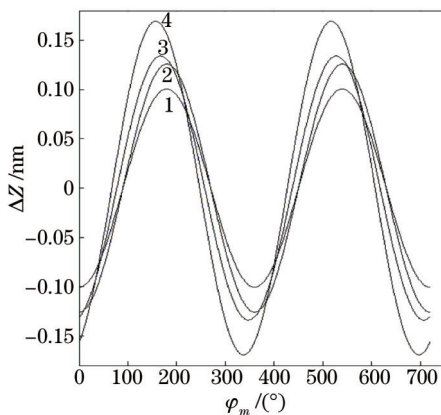


图3 光源非理想的测量误差

Fig.3 Amplitude measurement error with changing of measurement phase difference at nonideal laser sources

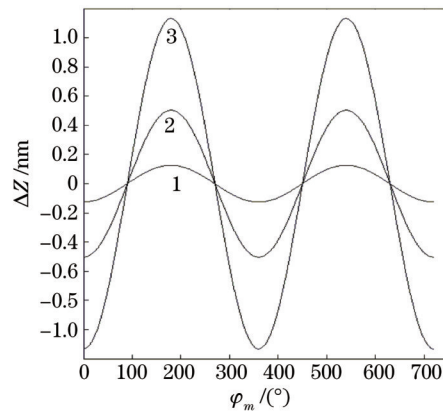


图4 PBS偏振泄漏的测量误差

Fig.4 Amplitude measurement error with changing of measurement phase difference at polarization leakage of PBS

计算。其中,曲线1表示PBS的 $r=s=0.01$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.126 nm;曲线2表示 $r=s=0.02$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.503 nm;曲线3表示 $r=s=0.03$ 时的情况,其最大位移测量误差为1.132 nm。结果表明位移测量误差随偏振分光镜的偏振泄漏增加而增大。由此可知,目前系统使用的双频激光头偏振混迭小于2%^[20],若选择高质量的PBS,则其位移测量误差小于亚纳米量级,这样再对被测相位差采取逐点补偿,可以极大提高系统测量精度。

图5为1/4波片存在相位延迟时,取正交双频激光椭圆率角为0.02、0.04而PBS的 $r=s=0.01$ 进行数值计算。其中,曲线1表示1/4波片在取 $\theta_q=0.083^\circ$ 、 $\delta_q=0.5^\circ$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.126nm;曲线2表示在 $\theta_q=0.083^\circ$ 、 $\delta_q=1.5^\circ$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.131 nm;曲线3表示在 $\theta_q=0.083^\circ$ 、 $\delta_q=3.5^\circ$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.136 nm。进一步计算非正交双频激光在 $\delta_q=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 时最大位移测量误差,所有结果如表1所示。把它们与图3的计算结果比较表明,测量系统控制 δ_q 小于 5° 时,1/4波片的相位延迟对位移测量误差影响较小。

图6为光学系统的光源和光学器件都存在非理想时,取双频激光方位角误差、椭圆率角分别为 $\theta_1=0^\circ$ 、 $x_1=0.02$ 和 $\theta_2=1^\circ$ 、 $x_2=0.04$ 而1/4波片 $\theta_q=0.083^\circ$ 、 $\delta_q=0.5^\circ$ 进行数值计算。其中,曲线1表示PBS在 $r=s=0.01$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.169 nm;曲线2表示PBS在 $r=s=0.02$ 时的情况,其最大位移测量误差为0.669 nm;曲线3表示PBS在 $r=s=0.03$ 时的情况,其最大位移测量误差为1.508 nm。把它们与图4的计算结果列表比较如表2,结果表明偏振分光镜PBS的偏振泄漏相对而言对位移测量误差影响最大。

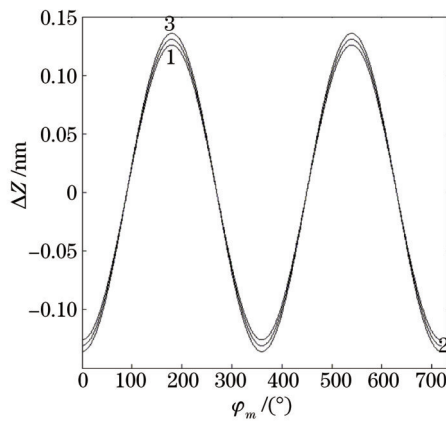


图5 1/4波片相位延迟的测量误差

Fig.5 Amplitude measurement error with changing of measurement phase difference at phase retardation of 1/4 wave plate

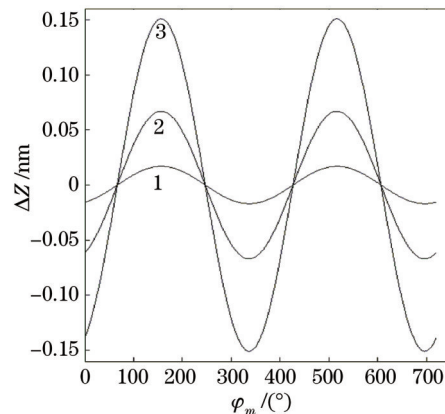


图6 光学系统的测量误差

Fig.6 Amplitude measurement error with changing of measurement phase difference at composite error factors of system

表1 不同的1/4波片相位延迟和激光方位角时的位移测量误差

Table 1 Amplitude measurement error at difference phase retardation of 1/4 wave plate and azimuth angle of laser

(θ_1, θ_2)	$\Delta z / \text{nm}$						
	$\delta_q=0.5^\circ$	$\delta_q=1.5^\circ$	$\delta_q=3.5^\circ$	$\delta_q=5^\circ$	$\delta_q=10^\circ$	$\delta_q=15^\circ$	$\delta_q=25^\circ$
$(0^\circ, 0^\circ)$	0.126	0.131	0.136	0.136	0.151	0.171	0.221
$(0^\circ, 0.5^\circ)$	0.134	0.139	0.144	0.149	0.165	0.185	0.237
$(0^\circ, 1^\circ)$	0.169	0.176	0.180	0.187	0.203	0.230	0.302

表2 位移测量误差比较

Table 2 Amplitude measurement error comparison

$r=s$	$\Delta z / \text{nm}$	
	Polarization leakage	Composite error factors
0.01	0.126	0.169
0.02	0.503	0.669
0.03	1.132	1.508

5 结 论

利用琼斯矩阵分析了同时存在激光光源椭圆偏振化和方位角误差以及光学器件相位延迟和偏振泄漏引起的偏振态变化。分析表明,超精表面缺陷检测的光学混频误差是一阶非线性误差,双频激光光源非理想和偏振分光镜对位移测量误差影响较大而1/4波片的影响较小。所以在对系统进行设计及调试时,可以采取一些措施减少非线性误差:选择质量高的激光器,减少激光束的偏振混叠度;偏振分光镜相对而言是重要的位移测量误差因素,测量系统应选用反射率和透射率都高的偏振分光镜来减小其对混频误差的影响;正确安装、调试光源和光学器件,保证入射光束的方位误差最小,减少方位角误差等。

参 考 文 献

- 1 Liu Zhongyao. The Study on Heterodyne Interferometric Microscope for Profiles of Microelectronic Mask Surfaces Measurement [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.1-12.
柳忠尧. 用于掩模板表面形貌测量的外差干涉显微系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004. 1-12.
- 2 Song Kang, Zhao Yulong, Jiang Zhuangde. Laser profilometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2003,11(3): 245-249.
宋 康, 赵玉龙, 蒋庄德. 激光干涉微轮廓测量仪[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(3): 245-249.
- 3 Zhang Yimo, Jing Wencai, Zhang Hongxia, *et al.*. Computerized white light scanning interferometer and the application [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(6): 560-565.
张以谟, 井文才, 张红霞, 等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(6): 560-565.
- 4 Haoshan Lin, Yuhe Li, Dongsheng Wang, *et al.*. Nanoscale defect detection by Heterodyne interferometry [J]. Appl Opt, 2009, 48(8): 1502-1506.
- 5 Dejiao Lin, Hong Jiang, Chunyong Yin. Analysis of nonlinearity in a high-resolution grating interferometer [J]. Optics & Laser Technology, 2000, 32(2): 95-99.
- 6 Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao, *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer [J]. Opt Eng, 1999, 38(8): 1361-1365.
- 7 Wenmei Hou, Gunter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. Preci Eng, 1992, 14(2): 91-98.
- 8 Dai Gaoliang, Yin Chunyong, Xie Guangping. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometers [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 1697-1702.
戴高良, 殷纯永, 谢广平. 纳米精度外差干涉仪非线性漂移的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1697-1702.
- 9 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong, *et al.*. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(11): 987-992.
戴高良, 晁志霞, 殷纯永, 等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. 中国激光, 1999, 26(11): 987-992.
- 10 Zhao Huijie. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, 20(3): 166-171.
赵慧洁. 外差干涉仪频率混叠误差分析[J]. 计量学报, 1999, 20(3): 166-171.
- 11 Zhao Huijie, Zhang Guangjun. Factors affecting the precision of heterodyne interferometer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(2): 221-224.
赵慧洁, 张广军. 影响激光外差高精度计量的几个关键因素[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(2): 221-224.
- 12 Wenmei Hou. Optical parts and the nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. Preci Eng, 2006, 30(3): 337-346.
- 13 Ning Zhigao, Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 852-855.
宁志高, 程兆谷, 高海军. 外差干涉仪混频误差分析[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 852-855.
- 14 S J A G Cosijns, H Haitjema, P H J Schellekens. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. Preci Eng, 2002, 26(4): 448-455.
- 15 Qiu Zongming, Liu Jun, Guo Yanzhen. Nonlinear analysis and improvement of Zeeman laser heterodyne interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(11): 991-995.
邱宗明, 刘 君, 郭彦珍. 塞曼激光外差干涉仪的非线性分析及校正[J]. 光子学报, 1998, 27(11): 991-995.
- 16 V G Badami, S R Patterson. A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne

- interferometry [J]. *Preci Eng*, 2000, 24(1): 41-49.
- 17 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi, *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(9): 1281-1285.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志, 等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响 [J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1281-1285.
- 18 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(11): 1562-1566.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响 [J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1562-1566.
- 19 R M A Azzam, N M Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Liang Mingji, Yin Shubai, Zhang Fuchu, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 1986. 18-60.
R M A 阿查姆, N M 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 梁民基, 尹树百, 张福初等, 译. 北京: 科学出版社, 1986. 18-60.
- 20 PRETIOS. PT-1105C 双频激光头 [OL]. <http://www.pretios.com/document/pt1105bc.pdf>. [2014-12-16].

栏目编辑: 何卓铭