

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108658

用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜*

吕鑫¹,王道档^{1,2},阮旻¹,孔明¹,许新科¹

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 浙江大学温州研究院 温州 325036)

摘要:基于 PZT 移相的传统 Mirau 干涉显微镜存在采样时间间隔长、易受外界环境扰动影响以及对对比度不可调等问题,提出了用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜。系统利用线栅偏振片作为偏振分束器,实现偏振分光 and 条纹对比度的可调,以满足不同反射率被测对象的检测需求;利用偏振相机瞬时获取四幅偏振相移干涉图,可有效降低外界环境扰动影响。对系统采用的偏振元件进行了建模分析,得到实际的偏振像差分布,并将其作为系统误差予以剔除。同时针对偏振相机存在的视场误差,研究了基于相位插值的视场误差校正方法。通过分析系统中各个器件特性对测量结果精度的影响,提出相应的误差校正方法。对所提出的 Mirau 偏振干涉显微镜的精度和可行性进行了实验论证,实验结果表明,其测量精度优于 $1/100\lambda$,重复性精度优于 0.1 nm。该测量系统具有对比度可调、瞬态测量以及结构紧凑等优点,为各类元件表面微观轮廓以及微小结构的在线检测提供了一种可行方法。

关键词: Mirau 干涉显微镜; 可调对比度; 偏振相机; 误差校正; 瞬态检测

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing

Lyu Xin¹, Wang Daodang^{1,2}, Ruan Yang¹, Kong Ming¹, Xu Xinke¹

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325036, China)

Abstract: The traditional Mirau interference microscope based on the PZT phase shifter has problems of long sampling interval, environmental disturbance sensitivity and non-adjustable fringe contrast. To address these issues, a polarization Mirau interference microscope is proposed for transient microscopic profile testing. To meet the testing requirements for various tested objects with different reflectivity, a linear grid polarizer is employed as a polarized beam splitter in the system. In this way, the polarization splitting and adjustable fringe contrast is achieved. Four polarization phase-shifted interferograms are instantaneously obtained with a polarization camera. In which, the influence of environmental disturbance is effectively reduced. The measurement error introduced by the polarization components is modeled and analyzed, and the actual polarization aberration is obtained to eliminate the corresponding systematic error. To remove the field of view (FOV) error in the polarization camera, the FOV error calibration method based on phase interpolation is also studied. Based on the analysis of the influence of system components on the measurement accuracy, the corresponding error calibration method is proposed. The accuracy and feasibility of the proposed polarization Mirau interference microscope are demonstrated by experiments. Experimental results show that the measurement accuracy and repeatability are better than $1/100\lambda$ and 0.1 nm, respectively. The measurement system has advantages of adjustable fringe contrast, transient measurement and compact in structure, which provides a feasible method for online testing of micro profiles and micro structures of various components.

Keywords: Mirau interference microscope; adjustable fringe contrast; polarization camera; error calibration; transient measurement

0 引言

随着精密制造技术的不断发展,各种微小结构器件层出不穷,广泛运用于航天航空、生物医疗、通信等领域。针对处于加工阶段的微小光学元件而言,通常需要测得其表面微观轮廓信息,进而对其中高频表面加工特性进行评价反馈。干涉显微镜将干涉技术和显微成像技术结合起来,具有高精度、非接触、快速测量的优点,在元件微观表面形貌检测应用方面受到了广泛关注^[1-5]。

干涉显微镜根据干涉腔结构的不同,可分为 Linnik 型^[6]、Michelson 型^[7]和 Mirau 型^[8]3种分光束光路^[9]。Linnik 型干涉显微镜为了更好的校正球差和色差,将两个完全相同、高精度的显微物镜结合,易受干扰且结构复杂。Michelson 型干涉显微镜只使用一个显微物镜,在显微物镜和被测表面间放置分光器件,需要较长工作距离的显微物镜,只适用于较小的数值孔径的系统中。Mirau 型干涉显微镜是 Michelson 型干涉显微镜的一种改进方式,其近似共路的结构不易引入附加光程差,具有结构紧凑、抗干扰能力强和空间分辨率高等优点^[2]。微观表面形貌检测容易受到外界环境的干扰,如系统光源不稳定和环境振动等因素,都将限制测量系统的检测精度。传统的 Mirau 型干涉显微镜是通过压电陶瓷纵向移动显微物镜来实现移相功能^[10],对于机械振动等环境干扰很敏感,同时检测精度也会受到压电陶瓷移动精度限制;同时,其不具备条纹对比度可调的功能,难以满足不同反射率、尤其是低反射率表面高精度检测要求。

为了有效降低微观表面形貌测量中外界扰动因素的影响^[11-14],同时满足不同反射率表面高精度检测需要,本文提出了一种用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜。利用线栅偏振片进行偏振分光,可实现条纹对比度的可调;同时通过偏振相机对测量系统光束偏振态调制,实现偏振干涉场的瞬态多步移相高精度的面形重构。对所涉及的关键系统元件的选择、布局设计以及主要误差因素进行了建模分析,并利用所搭建的原理样机对所提出测量系统方案的可行性进行了实验论证。该测量系统具有对比度可调、瞬态测量以及结构紧凑等优点,在表面微观轮廓和微小结构的在线检测具有较好的应用。

1 Mirau 偏振干涉显微镜测量原理

1.1 系统布局

提出的 Mirau 偏振干涉显微镜系统布局如图 1 所示,来自 LED 光源的光经过准直透镜后变为准直光束,再经一个线偏振片变为所需振动方向的线偏振光。线偏

振光经分光棱镜 (beam splitter, BS) 反射后进入 Mirau 偏振干涉物镜。此偏振干涉物镜是由显微物镜、偏振分光板以及参考镜组成。其中,参考镜的玻璃基底选择与偏振分光板相同的基底材料和厚度,以补偿偏振分光板玻璃基底引入的像差。线偏振光分别经过显微物镜和偏振分光板后分为反射 s 偏振光和透射 p 偏振光,其中 s 偏振光作为参考光,经参考镜反射回来后,再经偏振分光板反射;p 偏振光作为检测光,经待测样本反射返回后,再经偏振分光板透射。s 偏振参考光和 p 偏振检测光沿原路返回并汇合后,分别经分光棱镜 BS 和 1/4 波片 (quarter wave plate, QWP),变成两个旋向相反的圆偏振光。两束圆偏振光经成像透镜,在偏振相机的 4 个通道可同时得到相移量为 $\pi/2$ 的移相干涉条纹。利用四步移相算法即可计算得到与待测样本表面微观轮廓信息相对应的瞬态波前分布,进而实现待测表面轮廓的瞬态检测。

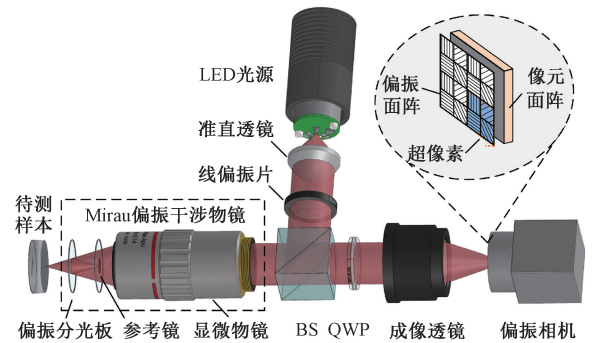


图1 Mirau 偏振干涉显微镜系统布局

Fig. 1 System layout of polarization Mirau interference microscope

采用偏振相机实现瞬时多步移相不仅能有效克服外界扰动的影响,也极大减少了与移相有关元件的使用数量,从而使得系统结构更加紧凑。由图 1 可知,偏振相机是在传统象元面阵的基础上加上一个由 2×2 超像素单元组成的偏振面阵,其中超像素单元是由 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4 个透光轴方向相邻的线偏振器组成。因此利用一帧图像即可同时获得 4 个偏振通道对应的图像信息^[15]。

1.2 测量原理

可用琼斯矩阵来表示光束在系统光路中的传播过程和偏振状态,由图 1 可知,经过 QWP 之后的检测光 E_i 和参考光 E_r 的偏振态可以表示为:

$$\begin{cases} E_i = E_{QWP} \cdot E_{PBS,p} \cdot E_T \cdot E_{PBS,p} \cdot E_p \\ E_r = E_{QWP} \cdot E_{PBS,s} \cdot E_M \cdot E_{PBS,s} \cdot E_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{QWP} 、 E_T 、 E_M 和 E_p 分别表示 QWP、参考镜、被测样本和线偏振光的琼斯矩阵; $E_{PBS,p}$ 和 $E_{PBS,s}$ 分别表示偏振分光板透射 p 偏振光和反射 s 偏振光的琼斯矩阵。

经过偏振相机偏振面阵后的干涉检测光 $E_{i,j}$ 和参考光 $E_{r,j}$ 分别为:

$$\begin{cases} E_{i,j} = A_j \cdot E_i \\ E_{r,j} = A_j \cdot E_r \end{cases} \quad (2)$$

$j = 1, 2, 3, 4$

式中: A_j 为偏振相机中线偏振器的琼斯矩阵, 分别对应线偏振器为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振方向; 检测光 $E_{i,j}$ 和参考光 $E_{r,j}$ 的相干叠加为 $E = E_{i,j} + E_{r,j}$, 偏振相机中接收到的各通道光强为 $I_j = |E_{i,j}|^2 + |E_{r,j}|^2$ 。利用四步移相算法得到待测波前的相位差分布 $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right) \quad (3)$$

2 误差因素分析

图1所示的 Mirau 偏振干涉显微镜主要误差来源包括偏振分光板分光不理想引入的误差、不同波长的光在 QWP 处引入的色差、QWP 入射角引入的像差和偏振相机视场误差等。尤其是对于来自于 LED 的光束, 实际的 LED 光源可以看作一个扩展光源, 光源发光面上每一点出射的发散光束经过准直透镜成方向各不相同的平行光束, 会使得实际准直光束存在一定的发散情况, 如图2所示, H 和 H' 分别为该准直透镜的物、像方主平面。

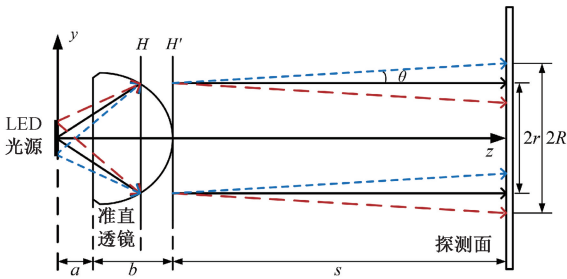


图2 LED光源准直原理

Fig. 2 Collimation schematic diagram of LED light source

LED 准直后的发散角 θ 满足关系式(4)。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R - r}{s} \right) \quad (4)$$

式中: R 为探测面对应的光斑半径; r 为准直透镜通光孔径的半径; s 为准直透镜的像方主平面 H' 与探测面的距离。系统中实际测得 LED 光源经准直后的发散角为 3.34° , 其对偏振分光板的光分性能和 QWP 的相位延迟误差的影响分析如下。

2.1 偏振分光板

偏振分光板的作用是分离 p 偏振光和 s 偏振光, 理想的偏振分光板中透射光和反射光的琼斯矩阵分别为 $E_{PBS,p} = [1, 0; 0, 0]$ 和 $E_{PBS,s} = [0, 0; 0, 1]$, 透射光中的

s 偏振光和反射光中的 p 偏振光都可以忽略不计。在实际应用过程中无法做到理想情况, 本文采用的偏振分光板在中心 627 nm 的 s 偏振光反射率 ρ_s 和透射率 τ_s 约为 83.0% 和 0.0%, p 偏振光反射率 ρ_p 和透射率 τ_p 约为 5.0% 和 82.0%。同时考虑到 LED 光源发散角对偏振分光板的光分影响, 将数值代入菲涅尔公式:

$$\begin{cases} \rho_p = r_p^2, & \tau_p = \frac{n_2 \cos \theta_2 t_p^2}{n_1 \cos \theta_1} \\ \rho_s = r_s^2, & \tau_s = \frac{n_2 \cos \theta_2 t_s^2}{n_1 \cos \theta_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为入射折射率和出射折射率; θ_1 、 θ_2 分别为入射角和折射角; r_p 、 t_p 分别为 p 偏振光的振幅反射系数和振幅透射系数; r_s 、 t_s 分别为 s 偏振光的振幅反射系数和振幅透射系数。

可以得出偏振分光板中透射光和反射光的琼斯矩阵为:

$$\begin{cases} E_{PBS,p} = [t_p, 0; 0, t_s] \\ E_{PBS,s} = [r_p, 0; 0, r_s] \end{cases} \quad (6)$$

偏振分光板的光分性能受到入射角度和偏振光反射透射率影响, 其不理想的光分性能所引入的波前误差分布如图3所示, 对应 627 nm 中心波长及 3.34° 入射角度的波前测量误差峰谷值 (PV) 与均方根值 (RMS) 分别为 0.75、0.19 nm, 因而可以忽略其对测量结果的影响。

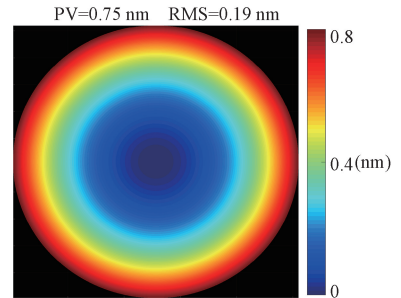


图3 偏振分光板引入波前测量误差

Fig. 3 Wavefront error introduced by the polarized beam splitter

2.2 QWP

系统利用 QWP 将振动方向相互垂直的两个线偏振检测光和参考光转换为旋向相反的圆偏振光。单个波片的双折射率受波长和入射角影响大, 其相位延迟量等光学特性表现出色散特性、视场效应等。为了减小波长对波片相位延迟量的影响, 系统选用 350~850 nm 宽波段的消色差 QWP, 对应中心光波长的相位延迟量为 0.2416λ , 而零级波片在中心光波长的相位延迟量为 0.2199λ 。消色差 QWP 与零级 QWP 所引入的相位误差分布曲线如图4所示, 其对应 627 nm 中心波长消色差 QWP 和零级 QWP 引

入的波前误差 PV 值分别为 0.14、1.88 nm,因此选用消色差 QWP,可忽略色差对测量结果的影响。

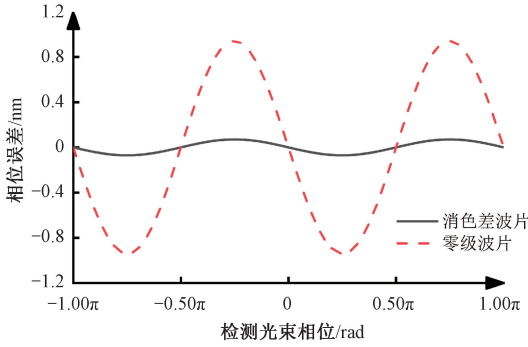


图 4 QWP 中心波长消色差前后的相位误差

Fig. 4 Phase error before and after achromatic correction at center wavelength of QWP

在 QWP 使用中需要对使得偏振光垂直入射到波片。但是在实际光路系统中,由于 LED 光束的发散性,两束偏振光实际会以一定的入射角入射到 QWP 波片,进而会引入额外的相位延迟误差。图 5 所示为波片三维偏振像差分析模型。

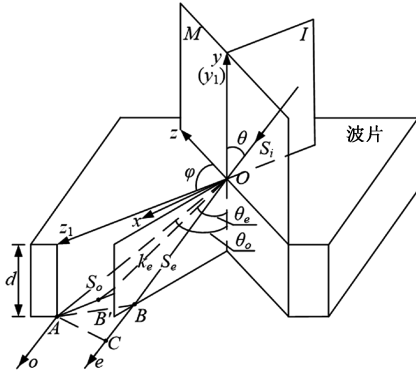


图 5 波片三维偏振像差分析模型

Fig. 5 Three-dimensional polarization aberration analysis model of wave plate

由图 5 可知,波片对于 o 、 e 光之间引入的相对相位延迟量取决于波法线的光程差,根据光线入射角 θ 和方位角 φ 计算入射光引入的相位延迟量 $\delta(\theta, \varphi)$:

$$\delta(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} |\overline{B'O} \cdot n_e''(\theta, \varphi) + \overline{BC} - \overline{AO} \cdot n_o| \quad (7)$$

式中: \overline{BC} 为 e 光比 o 光在空气中多走的光程差; $\overline{B'O} \cdot n_e''(\theta, \varphi) - \overline{AO} \cdot n_o$ 为 e 光比 o 光在晶体中多走的光程差; $n_e''(\theta, \varphi)$ 为波法线折射率。波法线折射率 n_e'' 为:

$$n_e'' = n_e \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) (\cos\varphi \sin\theta)^2} \quad (8)$$

式中: n_e 、 n_o 分别为 e 光与 o 光的折射率。

系统中选用的消色差 QWP,是将单轴石英波片的快轴与双折射氟化镁波片的慢轴对准而构成的复合波片,其相位延迟量 δ 为:

$$\delta = \varphi_{x'} - \varphi_{y'} = \arctan \left[\frac{\sin\delta_1 \cos\delta_2 - \cos\delta_1 \sin\delta_2}{\sin\delta_1 \sin\delta_2 + \cos\delta_1 \cos\delta_2} \right] = \delta_1 - \delta_2 \quad (9)$$

由式(9)得出此复合波片的实际延迟量就等于两个独立波片的相位延迟量之差。

根据宽波段消色差波片中两独立波片的相位延迟关系,引入的波前误差分布如图 6 所示,其对应系统中 QWP 波片入射角度范围 3.34° 引入的波前误差 PV 值与 RMS 分别为 120.95、27.03 nm。测量中可利用高精度干涉仪测得波片引入的波前误差并作为系统误差,在最后被测结果中加以校正消除。

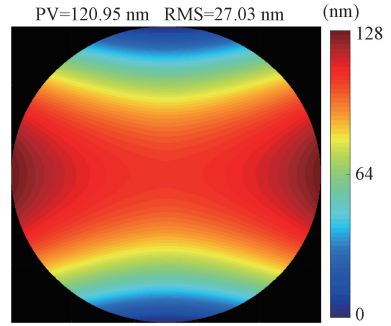


图 6 消色差 1/4 波片入射角引入的波前测量误差
Fig. 6 Wavefront error introduced by the incident angle of quarter-wave plate

2.3 偏振相机

偏振相机是本文实现瞬态检测的基础,利用偏振相机单帧采集得到四通道相移量为 $\pi/2$ 的干涉条纹。但在实际测量中,偏振相机偏振阵列自身性能的不完善同样会导致测量误差。在根据式(3)对偏振相机采集的 4 个通道移相干涉条纹进行相位求解时, 2×2 象元的同一超像素单元内的相位近似认为恒定不变,但实际上由于入射波前不同导致偏振相机中存在的视场误差发生变化。偏振相机视场误差会随着波前斜率的增大而增大,从而产生一定的测量误差。 3×3 相邻重构象元的加权平均线性插值方法^[16-17]如图 7 所示对偏振相机视场误差进行校正。以 3×3 相邻象元相位加权平均线性插值校正为例,各个通道的强度 I_j ($j=1, 2, 3, 4$, 分别对应 0° 、 45° 、 90° 和 135° 透光轴方向) 计算公式为:

$$\begin{cases} I_1 = I_{m,n} \\ I_2 = (I_{m-1,n} + I_{m+1,n})/2 \\ I_3 = (I_{m-1,n-1} + I_{m-1,n+1} + I_{m+1,n-1} + I_{m+1,n+1})/4 \\ I_4 = (I_{m,n-1} + I_{m,n+1})/2 \end{cases} \quad (10)$$

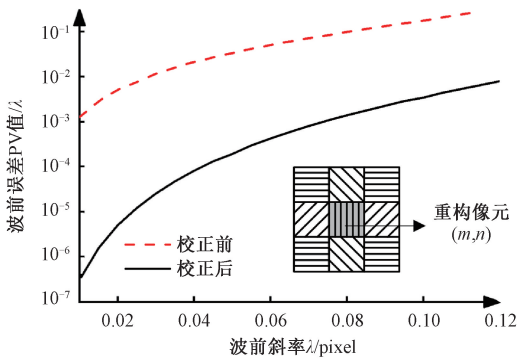


图7 偏振相机视场误差影响

Fig. 7 Error of field of view in polarization camera

由图7可知,偏振相机视场误差会随着波前斜率的增大而快速增大,对应 $0.10 \lambda/\text{pixel}$ 的波前斜率,其引入的波前误差PV值为 0.1720λ ;利用相邻象元相位加权平均线性插值法^[11]可实现偏振相机视场误差的有效校正,校正后对应 $0.10 \lambda/\text{pixel}$ 的波前斜率引入的波前误差PV值仅约为 $3.0 \times 10^{-5} \lambda$ 。

3 实验测量

为了验证所提出用于瞬态微轮廓检测的Mirau偏振干涉显微镜的可行性,根据图1搭建了相应的系统样机,系统基本尺寸为 $450 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,如图8所示。系统采用的偏振相机象元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,像素数为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。采用经标定过的台阶高度分别为 200.2 、 129.4 、 64.1 nm 的3块纳米台阶和一块标称值为 $1.9939 \mu\text{m}$ 标准微米台阶对系统误差进行标定,得到误差补偿方程,在此基础上利用所搭建的Mirau偏振干涉显微镜对标称值为 $1.9939 \mu\text{m}$ 的微米台阶进行实测。测量金刚石车削平面镜的表面粗糙度与Wyko NT9100轮廓仪对比,并对系统的性能进行测试,验证其可行性。

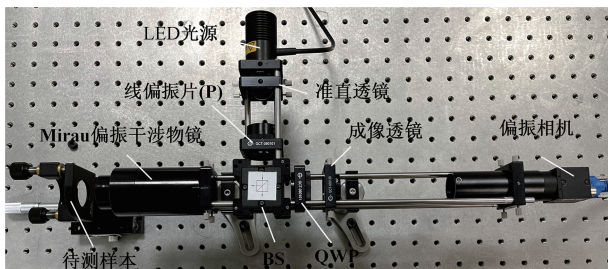
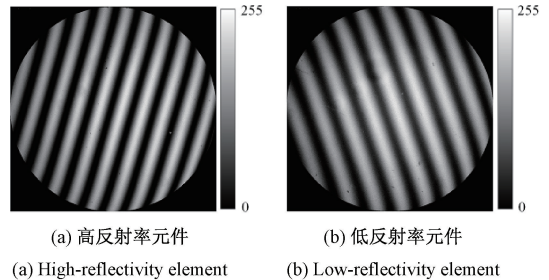


图8 系统样机照片

Fig. 8 Photo of experimental device

系统在光源模块的设计中,采用偏振片P,旋转器透光轴方向,获得不同偏振方向的偏振光,结合偏振显微干

涉物镜中的偏振分光板,可实现任意可调的分光比。实验中分别对一个平面反射镜和透射平行平板两种不同反射率的元件表面进行了检测,采集的干涉条纹图如图9所示,测试结果表明系统在极高反射率元件测量或者极低反射率元件测量中,能通过 $1\% \sim 99\%$ 大范围分光比调节,实现很好的干涉条纹对比度效果。



(a) High-reflectivity element (b) Low-reflectivity element

图9 分光比可调验证实验

Fig. 9 Adjustable split ratio verification experiment

采用经标定过的台阶高度分别为 200.2 、 129.4 、 64.1 nm 的3块纳米台阶和一块标称值为 $1.9939 \mu\text{m}$ ($78.5 \mu'' = 1.9939 \mu\text{m}$)的标准微米台阶对系统进行标定,台阶实物如图10所示。



(a) Photo of calibrated nano-steps (b) Photo of standard micron-step

图10 台阶标准件实物

Fig. 10 Step standard parts measurement

对图10中每个台阶的10个不同位置进行重复测量,得到表1的测量实验数据。以测量的台阶高度值作为输入,标准台阶的高度值作为输出进行拟合,得到拟合如图11所示,误差补偿方程为:

$$y = 0.000003131 \cdot x^2 + 0.9969 \cdot x + 7.905 \quad (11)$$

系统经误差补偿后,对标称值为 $1.9939 \mu\text{m}$ 的微米台阶进行测量,测得的平均台阶高度为 1989.7 nm ,如图12所示,与标称值的偏差约为 4.2 nm ,在LED光源中心光波长 627 nm 处能优于 $1/100 \lambda$ 。

利用Mirau偏振干涉显微镜和Wyko NT9100轮廓仪对金刚石车削平面镜表面粗糙度进行测量。Wyko NT9100轮廓仪的垂直分辨率 $< 0.1 \text{ nm}$,横向空间采样率 $0.1 \sim 13.2 \mu\text{m}$ 。如图11所示,测量区域为 $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 时,Mirau偏振干涉显微镜和Wyko NT9100轮廓仪测得表面粗糙度的PV值、RMS值和算术平均粗糙度Ra值分别为 331.4 、 18.4 、 13.7 和 309.9 、 16.8 、 12.2 nm ,

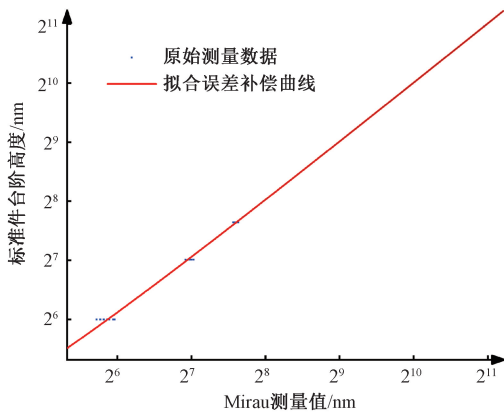


图 11 系统误差补偿拟合结果

Fig. 11 System error compensation fitting results

表 1 4 块标准台阶测量数据

Table 1 Measurement results of four standard steps

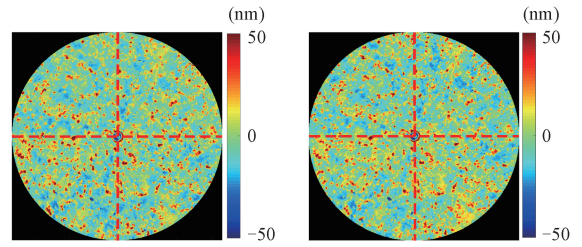
序号	nm			
	200.2 nm 台阶高度测量值	129.4 nm 台阶高度测量值	64.1 nm 台阶高度测量值	1 993.9 nm 台阶高度测量值
1 号	189.2	124.4	59.4	1 981.7
2 号	195.6	124.1	54.5	1 979.8
3 号	193.2	121.0	52.7	1 978.7
4 号	194.0	121.0	61.6	1 981.2
5 号	190.0	128.2	62.4	1 984.3
6 号	198.3	127.6	61.9	1 983.2
7 号	195.4	130.6	56.4	1 985.8
8 号	193.3	126.2	54.7	1 982.8
9 号	194.7	124.2	56.3	1 980.5
10 号	195.0	125.7	58.2	1 980.4

吻合,表明了所提出 Mirau 偏振干涉显微镜的可行性与高精度。

表 2 表面粗糙度测量结果对比

Table 2 Surface roughness measurement comparison

测量结果	results		
	PV	RMS	Ra
Wyko	331.4	18.4	13.7
Mirau	309.9	16.8	12.2

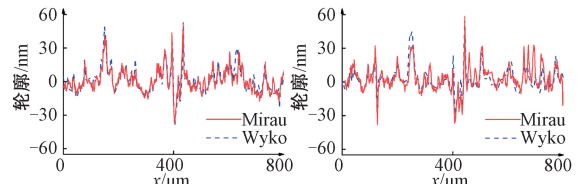


(a) Mirau 显微镜测量结果

(b) Wyko 干涉仪测量结果

(a) Measurement result of Mirau

(b) Measurement result of Wyko



(c) x 方向线轮廓对比

(d) y 方向线轮廓对比

(c) Line profile comparison in x direction

(d) Line profile comparison in y direction

图 13 表面粗糙度测量对比结果

Fig. 13 Surface roughness measurement comparison results

对 Mirau 偏振干涉显微镜系统进行重复性测试,在室内环境较稳定的条件下,以普通平面反射镜作为测量对象,连续进行两次扫描式显微测量,测得表面形貌重复性分布如图 14 所示,重构表面 STR 值(即两次测量形貌点对点之差的 RMS 值的根号 1/2)为 0.09 nm,表明该系统具有极高的稳定性。

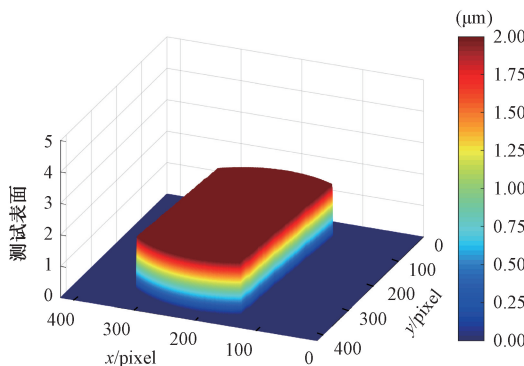


图 12 标准高度台阶测量结果

Fig. 12 Step measurement result on step height standard

如表 2 所示。PV 值的偏差主要是由环境中的微尘导致。两种测量系统在 x 与 y 方向上的线轮廓比较如图 13(c) 和 (d) 所示,可以看出两者测得的轮廓曲线非常

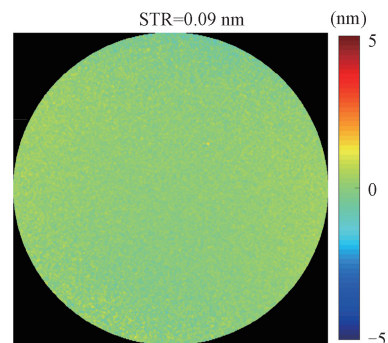


图 14 表面形貌重复性分布

Fig. 14 Surface topography repeatability distribution

4 结 论

针对基于 PZT 移相的 Mirau 干涉显微镜测量中存在采样时间间隔长、易受外界环境扰动影响的问题,本文提出一种用于瞬态检测的 Mirau 偏振干涉显微镜,该系统利用偏振相机同时获取 4 幅相移量为 $\pi/2$ 的干涉条纹图,通过四步移相算法得到与待测样本表面信息相对应的瞬态波前分布,进而实现待测样本表面的瞬态检测,很大程度上降低了系统测量中复杂环境扰动的影响。本文对系统中各关键元件测量误差因素及其影响进行定量分析,并给出了相应的校正方法。采用经高度标定过的 3 块纳米台阶和 1 块标准微米台阶对系统误差进行标定,得到误差补偿方程。在此基础上再对标称值为 $1.9939\ \mu\text{m}$ 的微米台阶测量实验中,实现了优于 $1/100\ \lambda$ 的表面测量精度。将该系统和 Wyko NT9100 轮廓仪测量的金刚石车削平面镜表面粗糙度的测量结果进行对比,两种测量系统测得的轮廓曲线非常吻合。通过性能测试,该系统能实现 $0.09\ \text{nm}$ 的重构表面 STR 值,且在不同反射率元件测量中都能实现 $1\% \sim 99\%$ 范围内的分光比调节。该系统基于瞬态波前检测,对环境扰动不敏感,在微小元件表面面形特性检测中具有广泛应用。

参考文献

- [1] BHUSHAN B, WYANT J C, KOLIOPOULOS C L. Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry [J]. Applied Optics, 1985, 24(16): 1489-1497.
- [2] DE GROOT P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 1-65.
- [3] SCHREIBER H, BRUNING J H. Phase shifting interferometry [C]. Optical Shop Testing, Newyork: Wiley,2007: 547-666.
- [4] WANG D D, YANG Y Y, CHEN C, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [5] WANG D D, CHEN X X, XU Y B, et al. High-NA fiber point-diffraction interferometer for three-dimensional coordinate measurement [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25550-25559.
- [6] YE S W, TAKAHASHI S, MICHIHATA M, et al. Modified Linnik microscopic interferometry for quantitative depth evaluation of diffraction-limited microgroove[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 54011-54019.
- [7] GANG T T, HU M L, QIAO X G, et al. Fiber-optic Michelson interferometer fixed in a tilted tube for direction-dependent ultrasonic detection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88: 60-64.
- [8] KASSAMAKOV I, LECLER S, NOLVI A, et al. 3D Super-resolution optical profiling using microsphere enhanced mirau interferometry [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3683.
- [9] STEDMAN M, LINDSEY K. Limits of surface measurement by stylus instruments[C]. Proceedings of SPIE, 1989: 56-61.
- [10] LU S H, CHANG C J, KAO C F. Full-field optical coherence tomography using immersion Mirau interference microscope [J]. Applied Optics, 2013, 52 (18): 4400-4403.
- [11] MASSIG J H. Interferometric profilometer sensor; US, 5166751[P]. 1992-11-24.
- [12] WIERSMA J T, WYANT J C. Vibration insensitive extended range interference microscopy [J]. Applied Optics, 2013, 52(24): 5957-5961.
- [13] CREATH K, GOLDSTEIN G. Dynamic quantitative phase imaging for biological objects using a pixelated phase mask [J]. Biomedical Optics Express, 2012, 3(11): 2866-2880.
- [14] 王朝,王道档,朱其幸,等. 用于瞬态三维测量的点

衍射干涉系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 42(2): 93-100.

WANG CH, WANG D D, ZHU Q X, et al. Transient point-diffraction interferometric system for three-dimensional measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 42(2): 93-100.

[15] MILLERDILLERD J, BROCK N, HAYES J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C]. Proceedings of SPIE, 2004, : 304-314.

[16] NOVAK M, MILLERD J, BROCK N, et al. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer [J]. Applied Optics, 2005, 44(32): 6861-6868.

[17] 付翔宇, 王道档, 吴振东, 等. 用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 78-84.

FU X Y, WANG D D, WU ZH D, et al. Compact transient interferometric measurement system used for online testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 78-84.

作者简介



吕鑫, 2020年于中国计量大学获学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为光电精密检测技术及仪器。

E-mail: lvxin1203@163.com

Lyu Xin received her B. Sc. degree from China Jiliang University in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at China Jiliang University. Her main research interests include photoelectric precision testing technology and instrumentation.



王道档 (通信作者), 2007年于中国计量大学获学士学位, 2012年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为光学计量及光电精密检测技术。

E-mail: wangdaodang@sina.com

Wang Daodang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2007, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2012. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interests include optical metrology and optoelectronic precision testing technology and instrumentation.