

引用格式: GONG Yuting, LYU Xin, LIU Wei, et al. Multi-wavelength Polarization Mirau Interference Microscope for Micro Profile Transient Measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0111001

龚玉婷, 吕鑫, 刘维, 等. 基于多波长干涉的瞬态轮廓检测 Mirau 显微镜[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0111001

基于多波长干涉的瞬态轮廓检测 Mirau 显微镜

龚玉婷, 吕鑫, 刘维, 孔明

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要:针对单波长 Mirau 干涉显微镜存在测量范围小和 2π 模糊等问题, 提出了多波长 Mirau 偏振干涉显微镜, 以实现微观轮廓的大动态范围测量的和表面粗糙度等显微结构的瞬态检测。系统利用 R、G、B 三个单色 LED 光源实现多波长干涉; 利用彩色偏振相机获取瞬态相移干涉条纹图, 降低实时瞬态检测中复杂的环境扰动影响; 利用线栅偏振片调节条纹对比度, 满足不同被测对象的反射率检测要求。为验证系统方案的可行性, 经过系统误差补偿校准后测量标称值为 $1.9939\ \mu\text{m}$ 的标准微米台阶, 结果与标称值的偏差约为 $5.4\ \text{nm}$ 。利用该方法与 Wyko 干涉仪对金刚石车削凸面反射镜表面微观轮廓和表面粗糙度进行测量, 表面粗糙度测量结果均方根值偏差为 $3.7\ \text{nm}$, 验证了该系统可实现高精度的大动态范围测量。

关键词:多波长干涉; 瞬态检测; 偏振成像; Mirau 干涉显微镜; 误差校正

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20245301.0111001

0 引言

随着光学加工技术向着精密化和复杂化的方向发展, 越来越多具有复杂面形、高设计自由度的微小光学元件广泛应用于光学系统的设计和制造中。微小光学元件的加工阶段决定其性能指标, 在该阶段需要对不同空间频率的表面进行测量。相移干涉显微镜因非接触、测量精度高而广泛应用于元件微观表面轮廓检测^[1-4]。

单波长 Mirau 干涉显微镜测量精度高、测试重复性好, 但其测量范围小。从干涉条纹图像中求解得到的相位信息分布在 $[0, 2\pi]$ 区间, 当被测物体表面对应的相位跃变超出 2π 时, 将发生混叠现象, 出现 2π 相位模糊问题, 使得包裹相位图缺少连续性。因而要求相邻两像素点间光程差需小于 $\lambda/2$, 这限制了单波长干涉测量的动态范围。微观表面轮廓检测系统的检测精度在实际测量中容易受到环境的干扰, 如环境振动和光源稳定性等^[5-8]。传统的单波长 Mirau 显微镜是通过压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT) 机械移动实现移相, 机械移动容易受环境振动的干扰, 移相采样时间间隔长, 无法实现瞬态测量; 同时由于条纹对比度不可调, 无法高精度测量具有不同反射率的待测表面^[9-12]。

为解决上述限制微观表面轮廓高精度检测的问题, 提出了一种多波长 Mirau 偏振干涉显微镜, 来实现不同动态范围的宏观面形和表面粗糙度等显微结构的瞬态检测。系统采用 R、G、B 三个单色光的发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 作为多波长光源; 通过线栅偏振片获得不同方向的线偏振光, 与偏振分光板组合可实现 $5\% \sim 95\%$ 大范围分光比调节, 从而调节条纹对比度; 偏振相机通过内部传感器上四个方向的线栅偏振片实现对系统中测量光束的偏振态调制, 达到基于四步移相的高精度面型重构, 避免了 PZT 移相存在的非线性、迟滞、蠕变等机械误差影响^[13-16]。该系统可高精度测量具有不同反射率大动态范围的微观轮廓, 能广泛应用于高自由度的微小光学元件表面轮廓测量。

基金项目: 浙江省自然科学基金 (No. LY21E050016), 国家自然科学基金 (No. 51775528)

第一作者: 龚玉婷, 1243897942@qq.com

通讯作者: 刘维, liuw@cjlu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-19; 录用日期: 2023-08-24

<http://www.photon.ac.cn>

1 多波长 Mirau 偏振干涉显微镜原理

1.1 系统布局

基于多波长干涉的瞬态轮廓检测 Mirau 显微镜系统布局如图 1, 其基本光路原理为: 系统利用分光棱镜聚集 R、G、B 三个单色光的 LED 作为多波长光源, 三个单色 LED 发出的光经准直透镜、线偏振片和分光棱镜汇聚成一束确定方向的线偏振光, 然后进入由显微物镜、偏振分光板以及参考镜组成的 Mirau 偏振干涉物镜。在到达偏振分光板时, 线偏振光被分为振动方向互相垂直的两部分, 一部分是透射光 p, 作为测试光透射至待测样本表面反射后回到偏振分光板, 另一部分是反射光 s, 为参考光经参考镜反射后回到偏振分光板与 p 光汇合, 这两束携带相位信息的线偏振光经偏振分光棱镜和 1/4 波片后变为左旋和右旋圆偏振光, 最后汇聚至彩色偏振相机。拍摄一幅图像即可分解得到 R、G、B 三个波长的彩色移相干涉条纹。通过四步移相算法对 R、G、B 三个波长的瞬态波前分布进行相位提取, 根据多波长干涉技术校正条纹级次, 可以得到每个像素点上参考光和检测光的准确光程差, 实现待测表面的高精度瞬态轮廓测量。

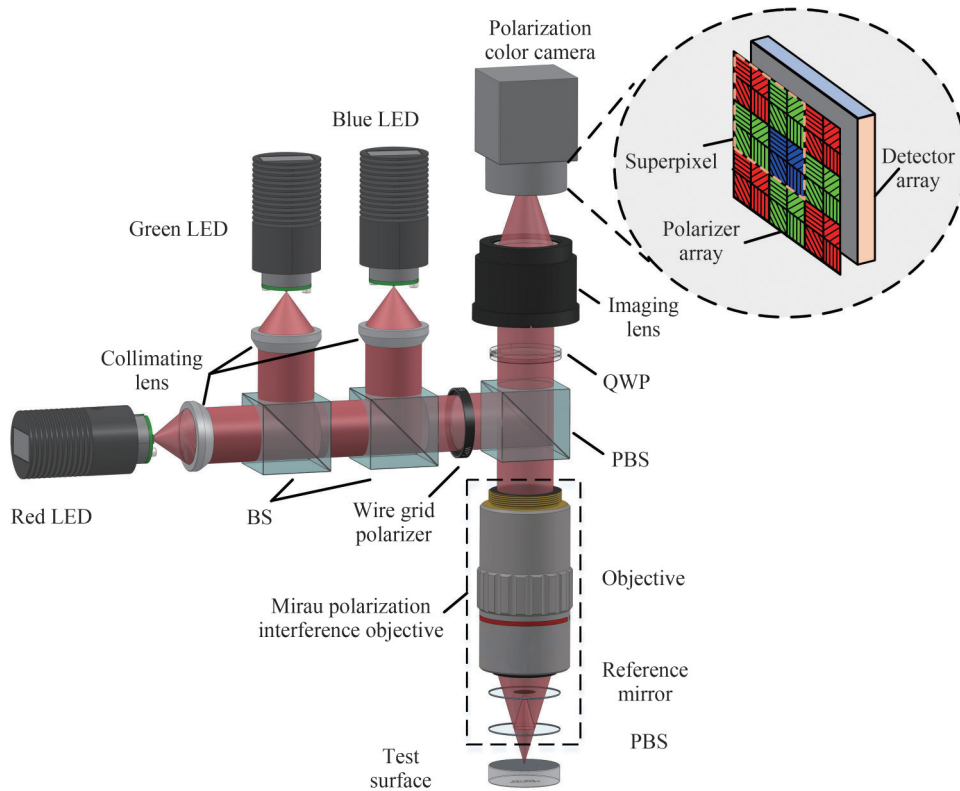


图 1 基于多波长干涉的瞬态轮廓检测 Mirau 显微镜系统光路

Fig. 1 Optical path of multi-wavelength polarization Mirau interference microscope for micro profile transient measurement

1.2 测量原理

光线在系统光路中传播时的偏振态可以通过琼斯矩阵来表示并推导偏振成像的基本原理, 由图 1 系统布局可知, 检测光 E_t 和参考光 E_r 在成像透镜处的偏振态为

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

式中, E_p 、 E_M 、 E_T 、 E_{QWP} 分别为线偏振光、被测样本、参考镜和四分之一波片的琼斯矩阵, $E_{PBS,s}$ 、 $E_{PBS,p}$ 分别为经

偏振分光板后反射光 s 和透射光 p 的琼斯矩阵。

偏振相机的线偏振器 A_j 含有 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个偏振方向,经过偏振面阵后的检测光 $E_{t,j}$ 和参考光 $E_{r,j}$ 可表示为

$$\begin{cases} E_{t,j} = A_j \cdot E_t \\ E_{r,j} = A_j \cdot E_r \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

根据光波叠加原理,检测光 $E_{t,j}$ 和参考光 $E_{r,j}$ 的合成矢量为 $E = E_{t,j} + E_{r,j}$ 。偏振相机的线偏振器 A_j 中四个通道接收到的光强分别为 $I_j = |E_{t,j}|^2 + |E_{r,j}|^2$, $j = 1, 2, 3, 4$, 利用四步移相算法得到待测波前的相位差分布 $\Delta\varphi$ 为

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

多波长干涉测量选取的三个波长为 λ_R 、 λ_G 、 λ_B (设 $\lambda_R > \lambda_G > \lambda_B$), 远波长等效波长 Λ_{RB} 和近波长等效波长 Λ_{GB} 分别表示为

$$\begin{aligned} \Lambda_{RB} &= \frac{\lambda_R \cdot \lambda_B}{|\lambda_R - \lambda_B|} \\ \Lambda_{GB} &= \frac{\lambda_G \cdot \lambda_B}{|\lambda_G - \lambda_B|} \end{aligned} \quad (4)$$

由多波长干涉测量得到的待测波前相位差分布 $\Delta\varphi$ 和等效波长 Λ_{eq} , 可得每个像素点上参考光和检测光的光程差 OPD, 从而得到待测物的面形。

$$OPD = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \Lambda_{eq} \quad (5)$$

式中, Λ_{eq} 为 λ_R 、 λ_G 、 λ_B 的等效波长, $\Lambda_{eq} = \frac{\Lambda_{RG} \Lambda_{GB}}{|\Lambda_{RG} - \Lambda_{GB}|}$ 。

2 误差分析

基于多波长干涉技术的微观轮廓瞬态测量系统解决了单波长测量小于四分之一波长的问題,可系统误差和噪声对于检测精度的影响也随之增加,即存在误差放大效应。除此之外,偏振相机存在的瞬时视场误差、固定模式噪声、微偏振器消光比不均匀、光子响应不均匀、微偏振方向失调等也会影响测量系统的测量精度。本系统中的彩色偏振相机在传统像元面阵的基础上增加了拜耳彩色滤波阵列和偏振面阵列,其中偏振面阵列由多个 4×4 的超像素单元组成,形成了 RGB 在 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个透光轴方向的 4×4 的超像素单元,使得微偏振方向失调和微偏振器消光比不均匀性影响可以忽略。

2.1 多波长误差放大效应

多波长移相干涉测量利用多个波长的光对被测元件表面进行测量,通过比对不同波长的测量结果可校正条纹级次差异。将三种不同波长的测量结果进行两两对比,可以弥补单波长测量存在的 2π 模糊问題并减少由于等效波长增大而放大的误差。测得的远波长 Λ_{RB} 和近波长 Λ_{GB} 的相位差分布表示为

$$\begin{cases} \varphi_{RB}(x, y) = \varphi_R(x, y) - \varphi_B(x, y) \\ \varphi_{GB}(x, y) = \varphi_G(x, y) - \varphi_B(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

根据图 2 所示的流程校正条纹级次以消除相位误差,先用 Λ_{GB} 的相位差校正 Λ_{RB} 的相位差结果,再由 Λ_{RB} 的相位差来校正单波长得到的相位差结果,从而得到被测表面的光程差分布。

利用单波长干涉和多波长干涉对金刚石车削平面镜进行测量,并对多波长干涉测量进行条纹级次校正,将单波长和多波长的测量结果进行比较可实现 PV 值差值小于 10 nm。这种利用不同波长测量结果互相校正条纹级次的方法,可实现误差补偿,达到高精度大动态范围的多波长移相干涉测量。

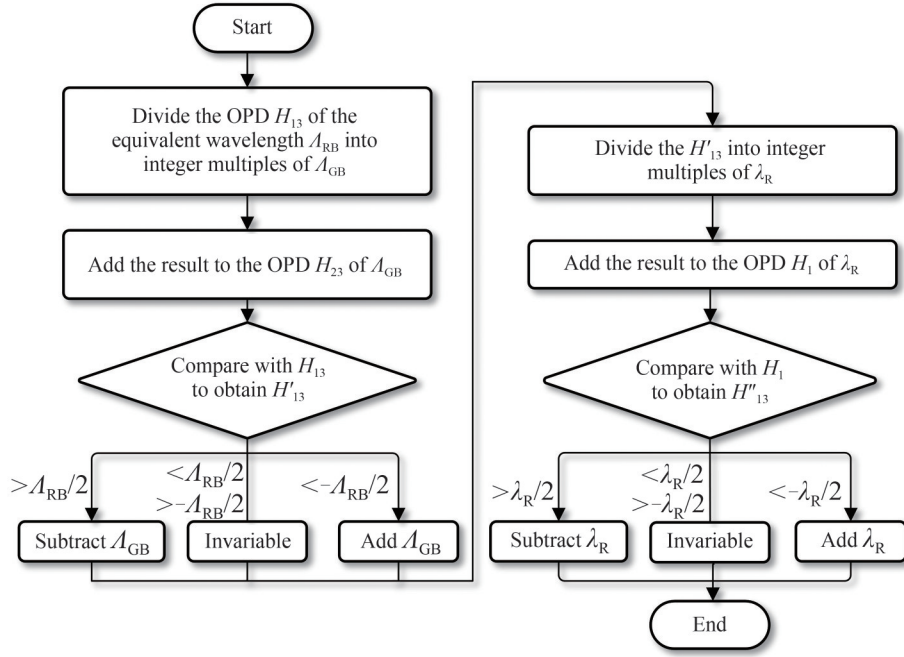


图2 多波长校正条纹级次流程
Fig. 2 Multi wavelength correction fringe order process

2.2 偏振相机

本系统基于偏振相机实现瞬态检测。偏振相机拍摄一次即可得到四幅相移量为 $\pi/2$ 的移相干涉条纹图，为瞬态检测提供基础数据。处理偏振相机数据处理时，通常认为位于同一超像素单元 ($4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$) 的干涉条纹的相位值近似相等，然而，由于偏振相机微偏振阵列和拜耳彩色滤波阵列的不完善，每个像元对不同方向的入射光具有不同的灵敏度，使得同一超像素单元的相位值也不相同，所以传统的近似处理会对移相干涉条纹图的相位求解造成误差，因此根据式(3)对偏振相机的瞬时视场误差进行校正。本文通过对相邻像元样条插值校正来减小视场误差，提高瞬态检测的准确性和可靠性。以图3所示 6×6 相邻重构像元的三次样条插值方法为例，各个通道的强度 $I_j(j=1,2,3,4)$ 表示为

$$\begin{cases} I_1 = t_1^2 I_{m-3,n-3} + t_1 t_2 (I_{m+1,n-3} + I_{m-3,n+1}) + t_2^2 I_{m+1,n+1} \\ I_2 = t_1 I_{m,n-3} + t_2 I_{m,n+1} \\ I_3 = I_{m,n} \\ I_4 = t_1 I_{m-3,n} + t_2 I_{m+1,n} \end{cases} \quad (7)$$

式中， t_1, t_2 分别为临近点与插值点的权重， $0 \leq t_1 \leq 1, 0 \leq t_2 \leq 1$ 。

通过式(7)计算R、G、B各通道不同波前倾角下的相位误差，经过三次样条插值校正后的彩色偏振相机各通道对应 $0.10 \lambda/\text{pixel}$ 的局部波前倾角的相位误差PV值由 0.1056λ 降至 0.0198λ 。结果表明，三次样条插值方法可有效实现瞬时视场误差校正，保证了偏振相机的移相准确性；使用校正矩阵完成相机的参数标定，可有效消除彩色偏振相机颜色串扰以及固定模式噪声(Fixed Pattern Noise, FPN)、光子响应不均匀(Photo Response Non-uniformity, PRNU)等误差问题，为系统实现精确的微观轮廓检测奠定实验基础。

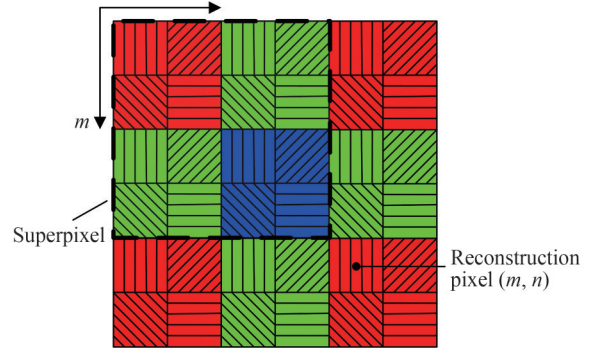


图3 彩色偏振相机重构像元示意
Fig. 3 Schematic pixel layout of color polarization camera

3 实验及结果分析

根据图1搭建的多波长 Mirau 偏振干涉显微镜实验系统结构如图4。实验系统中多波长 LED 光源、准直透镜、分光棱镜、偏振分光棱镜、线偏振片、偏振干涉显微物镜、四分之一波片、成像透镜以及偏振相机保持同轴装夹,待测样本安装在调整架上,可以实现纵向的平移以及倾斜调节。其中 LED 光源位于准直透镜的后焦距处,使出射光束为平行光束,偏振相机位于成像透镜的焦距处,使得条纹可以清晰成像。系统中 R、G、B 三个单色光的 LED 光源工作波长分别为 624、518、447 nm,其多波长等效波长为 $46.94 \mu\text{m}$ 。彩色偏振相机单个像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,四通道偏振角度依次为 0° 、 45° 、 90° 和 135° ,有效像素数为 $2\,448 \times 2\,048$,帧频为 22 帧/s。

当多波长 Mirau 偏振干涉显微镜实验系统搭建完成并设定好检测光路后,利用所搭建的实验系统对标定过的纳米台阶测量,获得系统误差并进行误差补偿。然后测量标称值为 $1.993\,9 \mu\text{m}$ 的微米台阶,测量结果与标称值的偏差约为 5.4 nm ,如图5所示,台阶测得的平均高度为 $1\,988.5 \text{ nm}$,表明多波长 Mirau 干涉显微镜可实现高精度测量。

利用所搭建的实验装置对金刚石车削凸面反射镜表面进行检测。实验中通过调整架将待测样本缓慢靠近偏振干涉显微物镜,直至出现条纹,通过倾斜旋钮可以调节条纹粗细,选择合适的条纹数量,将条纹调节至清晰时,偏振相机拍摄干涉条纹图。图6为偏振相机同时拍摄到的待测样本表面 R、G、B 三个通道的相移干涉条纹图,再通过四步移相算法和多波长干涉技术得到每个像素点上参考光和检测光的光程差。

将多波长 Mirau 显微镜和 Wyko NT9100 干涉仪对其表面微观轮廓的检测进行比较,Wyko 轮廓仪的垂直分辨率 $< 0.1 \text{ nm}$ 。Wyko 干涉仪的检测结果如图7(a),测量区域为 $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 时,检测结果显示金刚石车削凸面反射镜表面微观轮廓的 PV 值为 $1.687\,2 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.453\,1 \mu\text{m}$ 。

微观轮廓瞬态测量方法和 Wyko NT9100 干涉仪对金刚石车削凸面镜的检测结果如图7,实验结果汇总如表1。其中图7(b)为 Mirau 单波长(R)系统测量的结果,其 PV 值为 $3.597\,6 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.270\,8 \mu\text{m}$ 。由于单波长干涉测量时要求连续采样点的相位差小于 π ,否则无法获得真实相位,图像中出现轮廓突变,该检测结果与 Wyko 干涉仪检测结果相比,其 PV 值、RMS 值和面形轮廓都存在较大偏差,尤其是 PV 值偏差显著。

因此,通过多波长干涉技术利用不同波长的测量结果之间的差异级次进行校正,对金刚石车削凸面反射镜的检测结果如图7(c)和图7(d)。其中图7(c)为 Mirau 双波长(R+G)系统测量的结果,其 PV 值为 $2.025\,4 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.467\,6 \mu\text{m}$;图7(d)为 Mirau 三波长系统测量的结果,其 PV 值为 $2.013\,3 \mu\text{m}$,RMS 值

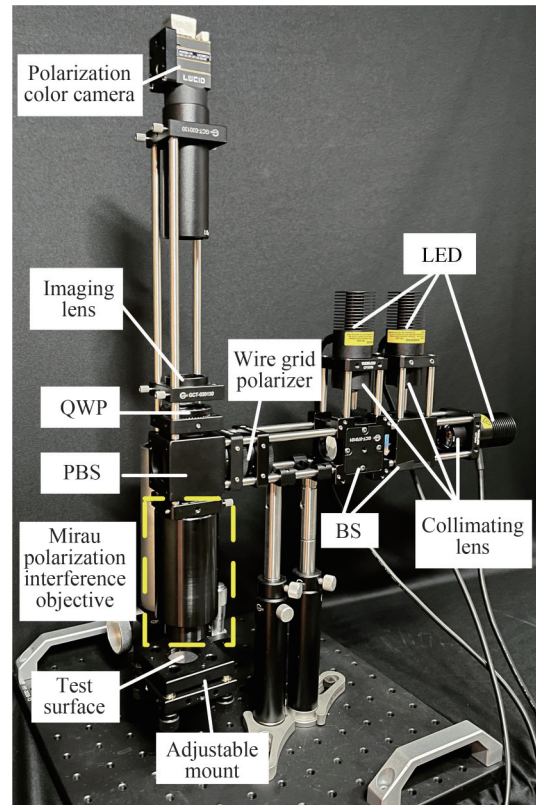


图4 实物装置样机
Fig. 4 Schematic of device prototype

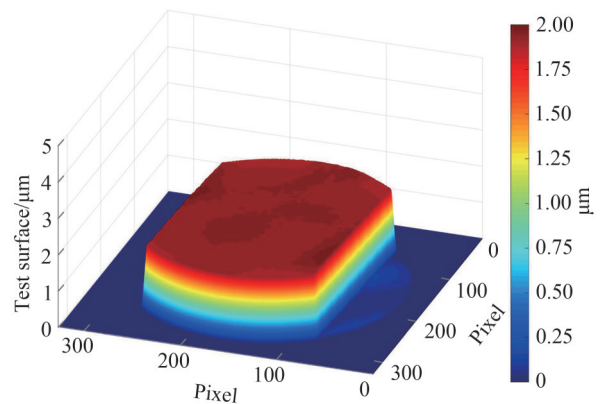


图5 标准台阶测量结果
Fig. 5 Measurement result of standard step

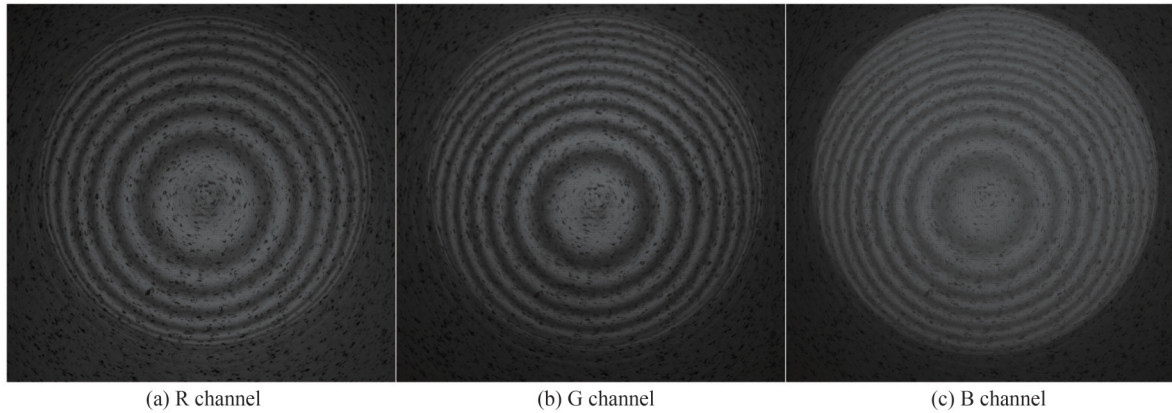


图6 R、G、B三通道相移干涉条纹图

Fig. 6 Phase shift interferometric fringe patterns of R, G and B channels

为 $0.4583 \mu\text{m}$ 。经多波长干涉技术校正后的检测结果与 Wyko 干涉仪的检测结果的表面微观轮廓分布十分接近,且数值上具有良好的的一致性,表明本微观轮廓瞬态测量系统具有实际可行性。

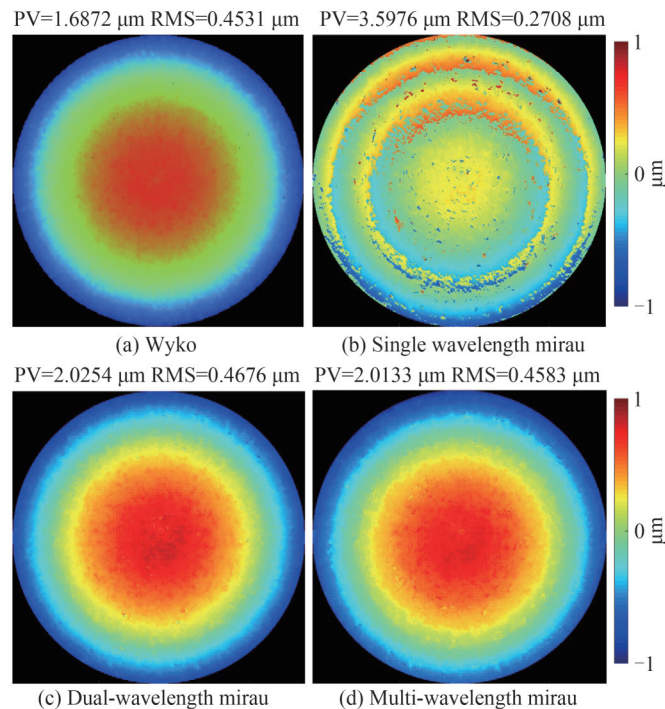


图7 微观轮廓测量结果

Fig. 7 Microcosmic profile measurement results

表1 金刚石车削凸面反射镜微观轮廓检测结果对比

Table 1 The microcosmic profile measurement results of diamond turning convex mirrors

Measuremen result	PV/ μm	RMS/ μm
Wyko	1.687 2	0.453 1
Single wavelength Mirau	3.597 6	0.270 8
Dual-wavelength Mirau	2.025 4	0.467 6
Multi-wavelength Mirau	2.013 3	0.458 3

利用多波长 Mirau 偏振干涉显微镜测量金刚石车削凸面反射镜的表面粗糙度,如图 8 所示,测量区域为 $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$,将多波长 Mirau 和 Wyko 干涉仪的测量结果汇总至表 2。Wyko 干涉仪和多波长 Mirau 偏振干涉显微镜测得的表面粗糙度的 PV 值、RMS 值和算术平均粗糙度 (R_a) 值分别为 302.9 nm 、 21.0 nm 、

15.2 nm 和 938.5 nm、24.7 nm、14.8 nm。图 8(c)和图 8(d)为 wyko 干涉仪和多波长 Mirau 干涉仪在 x 与 y 两个方向上的线轮廓比对结果,可知两种测量系统测得的轮廓曲线高度吻合,验证了所提出的测量系统可实现高精度的大动态范围测量。

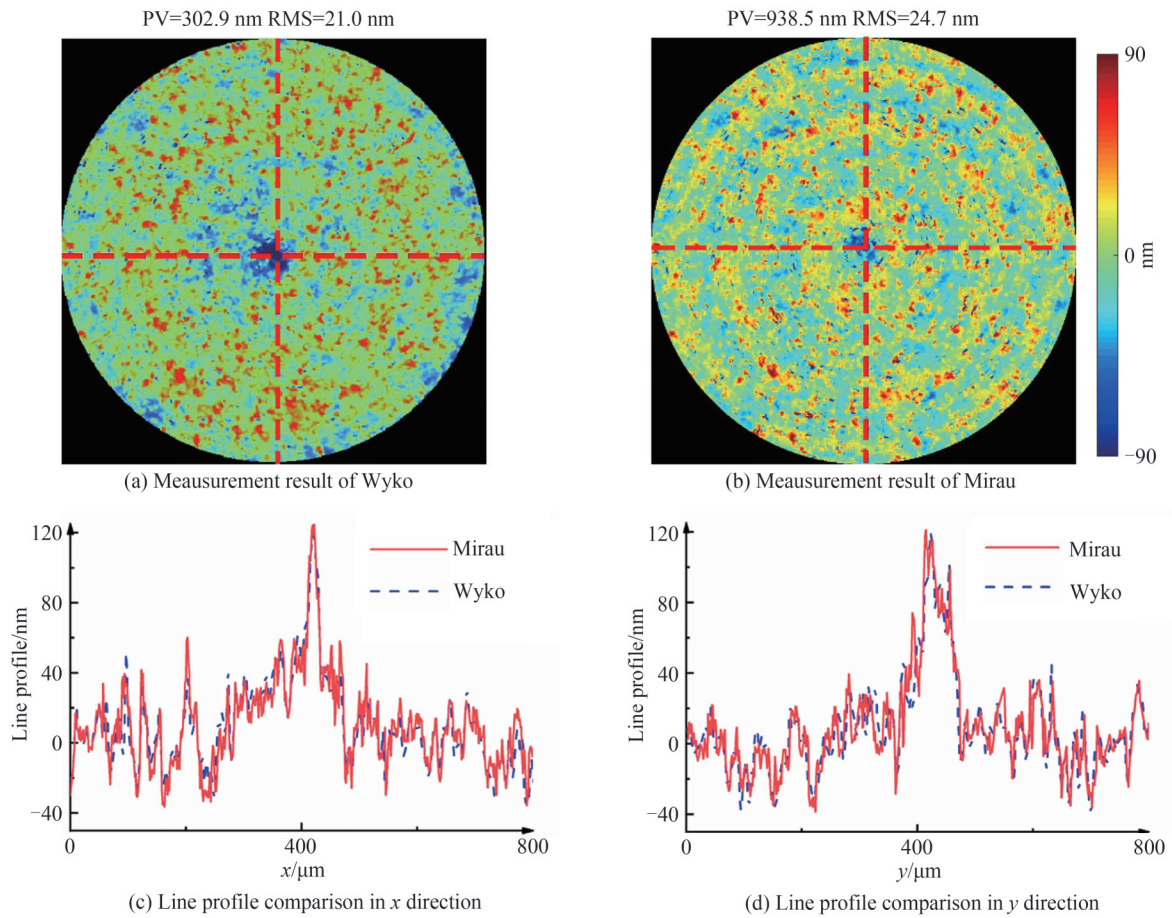


图 8 表面粗糙度测量结果
Fig. 8 Surface roughness measurement results

表 2 金刚石车削凸面反射镜表面粗糙度检测结果

Table 2 The surface roughness measurement results of diamond turning convex mirrors

Measuremen result	PV/ μm	RMS/ μm	$R_a/\mu\text{m}$
Wyko	0.302 9	0.021 0	0.015 2
Multi-wavelength Mirau	0.938 5	0.024 7	0.014 8

4 结论

针对单波长干涉显微镜存在的测量动态范围小和 2π 模糊等问题,提出了多波长 Mirau 偏振干涉显微镜,以实现微观轮廓的大动态范围测量的和表面粗糙度等显微结构的瞬态检测。利用偏振相机瞬时获取四幅偏振相移干涉图,可有效降低传统 PZT 移相采样时间间隔长、易受外界环境扰动的影响。对于多波长干涉产生的误差放大效应和偏振相机的瞬态视场误差,对其影响进行分析,并给出了相应的校正方法。利用多波长 Mirau 干涉显微镜对微米台阶进行了测量,证明其可实现高精度的表面测量。将该系统对金刚石车削凸面镜表面微观轮廓的单波长和多波长测量结果与 Wyko NT9100 干涉仪的测量结果进行对比,经多波长干涉技术校正后的检测结果与 Wyko 干涉仪的检测结果的表面微观轮廓分布十分接近,表明本微观轮廓瞬态测量系统具有实际可行性。对金刚石车削凸面镜表面粗糙度的测量结果进行对比,结果表明基于多波长干涉技术的微观轮廓瞬态测量方法相对于 Wyko 干涉仪测量结果的均方根值偏差为 3.7 nm,两种测量

系统测得的轮廓曲线高度吻合,验证该系统可实现高精度的大动态范围测量。

参考文献

- [1] KASSAMAKOV I, LECLER S, NOLVI A, et al. 3D super-resolution optical profiling using microsphere enhanced Mirau interferometry[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-7.
- [2] BAI C, LI J, XU Y, et al. Compact birefringent interferometer for Fourier transform hyperspectral imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1703-1725.
- [3] GUO Tong, HU Chunguang, HU Xiaodong, et al. Measuring nanoscale motions of microdevices using a Mirau interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(10): 1542-1545.
郭彤, 胡春光, 胡晓东, 等. 利用 Mirau 显微干涉仪测量微器件的纳米级运动[J]. 光子学报, 2005, 34(10): 1542-1545.
- [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 Chao, WANG Daodang, ZHU Qixing, et al. Transient point-diffraction interferometric system for three-dimensional measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 42(2): 93-100.
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.
- [6] YAN R S, CAI L Z, MENG X F. Correction of wave-front retrieval errors caused by the imperfect collimation of reference beam in phase-shifting interferometry [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125 (2) : 601-605.
- [7] KUMAR U P, HAIFENG W, MOHAN N K, et al. White light interferometry for surface profiling with a colour CCD[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(8): 1084-1088.
- [8] JIAO Guohua, LI Yulin, HU Baowen. Mirau phase-shifting interferometer for profile measurement of microlenses Array [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(10): 1924-1927.
焦国华, 李育林, 胡宝文. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形[J]. 光子学报, 2007, 36(10): 1924-1927.
- [9] CREATH K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1987, 26 (14): 2810-2816.
- [10] ZHAI Zhongsheng, HUANG Jiaojie, ZHAO Hang, et al. Intensity consistency control method for multi-wavelength micro-interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 114-121.
翟中生, 黄娇洁, 赵杭, 等. 多波长显微干涉的光强一致性控制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 114-121.
- [11] TIAN X, ZHANG Y, SOHN A, et al. Dual-mode snapshot interferometric system for on-machine metrology [J]. Optical Engineering, 2019, 58(4): 044104-044104.
- [12] WANG D D, TIAN X B, XU P, et al. Compact snapshot multiwavelength interferometer[J]. Optics Letters, 2019, 44 (18): 4463-4466.
- [13] LYU Xin, WANG Daodang, RUAN Yang, et al. Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 92-99.
吕鑫, 王道档, 阮阳, 等. 用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 92-99.
- [14] MILLERD J, BROCK N, HAYES J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. SPIE, 2004, 5531: 304-314.
- [15] 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.
- [16] WANG D D, LIANG R G. Simultaneous polarization Mirau interferometer based on pixelated polarization camera[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 41-44.

Multi-wavelength Polarization Mirau Interference Microscope for Micro Profile Transient Measurement

GONG Yuting, LYU Xin, LIU Wei, KONG Ming

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Micro-optical components have been widely adopted in intelligent device imaging, medical devices, and national defense security due to their high degree of freedom and arrayability. The inspection is particularly important to ensure processing accuracy prior to use. Interferometric microscopy is the authoritative high-precision micro-profile inspection technology. However, the measurement range of

single wavelength interferometry is limited by the wavelength, making it insufficient to detect optical devices with high degrees of freedom. Moreover, the traditional PZT phase shift is vulnerable to environmental disturbances and can cause drive hysteresis when measuring at multiple wavelengths.

The multi-wavelength polarization Mirau interference microscope for transient micro profile detection is proposed to address the issues of narrow measurement range and 2π ambiguity in single wavelength Mirau interference microscopes, enabling the testing of surface figure with large dynamic range and surface roughness of microscopic structures. It provides a simple and elegant solution to these problems that arise in the aforementioned interferometric microscopy measurements. This measurement system utilizes a splitter prism to gather three monochromatic LEDs as a multi-wavelength light source. In order 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 proposed system, to achieve polarization splitting and adjustable fringe contrast. The color polarization camera only needs to capture one image to decompose and obtain color phase-shifting interference fringes with a phase shift of $\pi/2$ in the three RGB channels. By using a four step phase shifting algorithm to calculate the transient wavefront distribution corresponding to the three wavelengths R, G, and B. Based on multi-wavelength interference technology, the accurate optical path difference between the reference light and the detection light at each pixel point can be obtained, thereby achieving instantaneous detection of the surface profile to be measured. Multi-wavelength phase shift interferometry can use measurement results of different wavelengths to correct the stripe order. By comparing the measurement results of three different wavelengths in pairs, it can simultaneously compensate for the shortcomings of single wavelength and dual-wavelength measurements. Using single wavelength interference and multi-wavelength interference to measure diamond turning convex mirrors, stripe order correction can be achieved through interference measurement results of different wavelengths, and the deviation in PV values between single wavelength and multi wavelength measurement results is less than 10 nm. The color polarization camera is the foundation for realizing transient detection in this system. In practical measurement, different incident wavefronts cause changes in the field of view error in the polarization camera and increase with the increase of wavefront slope, resulting in certain measurement errors. The cubic spline interpolation method using adjacent reconstructed pixels is adopted to correct the field of view error of the polarization camera. After correction, the PV value of phase error for the polarization camera is significantly reduced. Multi-wavelength polarization Mirau interference microscope was set up, and the micron step with the nominal value of $1.993\ 9\ \mu\text{m}$ was measured after correcting system error with calibration data, and the deviation from the nominal value was about 5.4 nm. Comparing the single wavelength and multi-wavelength measurement results of the diamond turning convex mirrors surface profile with the measurement results of the Wyko, the detection results corrected by multi-wavelength interference technology are close to the surface profile distribution of the Wyko, indicating the feasibility of this transient measurement system for micro profile. Comparing the measurement results of the surface roughness of diamond turning convex mirrors, the results show that the RMS value deviation of the micro profile transient measurement method based on multi-wavelength interference technology compared to the measurement results of Wyko interferometer is 3.7 nm. The profile curves measured by the two measurement systems are very consistent, verifying that the system can achieve high-precision and large dynamic range measurement.

Key words: Multi-wavelengths interferometry; Transient measurement; Polarization imaging; Mirau interference microscope; Error calibration

OCIS Codes: 120.3180; 120.4640; 120.6660; 120.5050