

引用格式: ZHANG Jinpeng, GAO Fen, LI Bing. Transient Interferometry of Ultra Precision Surface Based on Small Hole Point Diffraction[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0412004

张金鹏,高芬,李兵. 基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉测量技术[J]. 光子学报,2022,51(4):0412004

基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉测量技术

张金鹏¹,高芬¹,李兵²

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要:为解决时域相移小孔点衍射干涉仪中移相依赖昂贵压电陶瓷相移器,且长时间采集易受环境干扰影响的问题,提出一种基于偏振同步相移的小孔点衍射瞬态干涉检测方法。构建反射式结构的小孔点衍射干涉测量光路得到两束正交的圆偏振光,利用棋盘位相光栅分光与偏振片阵列移相,在 CCD 上同时获得 4 幅不同相移量的干涉图像,对单次采集的 4 幅瞬时干涉图像进行处理即可直接获得被测面形信息。搭建实际测量系统,通过基于琼斯矩阵的偏振态分析及与 ZYGO 干涉仪的比对实验,从理论及实验两方面验证了所提方法的正确性,多次多组实验结果表明该系统稳定,有着良好的重复测量精度。

关键词:干涉测量;面形检测;点衍射干涉仪;同步相移;瞬态检测

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225104.0412004

0 引言

随着我国光刻技术由深紫外向极紫外领域发展,对光刻物镜面形提出了纳米以下甚至亚纳米的检测精度需求^[1-2],商用化泰曼-格林和菲索干涉仪的检测精度因受限于其自身标准参考镜面形精度,已经无法满足上述超精度检测发展需求。点衍射干涉测量法^[3-5]利用微米级小孔衍射产生近乎理想的球面波作为参考波,摆脱了标准参考镜对测量精度的限制,为光刻领域的超精面形检测开辟了有效途径。

点衍射法于 19 世纪初被提出,美国和日本已经研发了光纤点衍射^[3]与小孔点衍射干涉仪^[4]的成型设备。国内对于点衍射干涉仪的研究起步较晚,特别是在小孔点衍射干涉测量领域,目前研究多处于实验室阶段^[6-9],其中制约其精度提高及成型设备发展的一个最重要原因在于其相移问题。现有的小孔点衍射干涉仪^[6-9]多采用高精度的压电陶瓷相移器(Piezoelectric Transducer, PZT)带动被测件进行多次移动,采集多幅干涉图像进行相位提取。这种时域多步相移技术的实现,一方面依赖于进口昂贵的 PZT,另一方面干涉图像长时间采集过程中易受环境干扰的影响,导致实际检测精度尤其是重复性精度低。若能将同步相移技术引入点衍射干涉测量中,通过一次测量即能获得多幅具有不同移相量的干涉图像,实现超精面形的瞬态检测,将有望解决点衍射干涉仪发展中的上述瓶颈问题。

目前国内外已基于传统斐索和泰曼-格林干涉检测光路发展了多种同步相移技术^[10-13],部分已商业化,如美国 ESDI 公司采用 3 独立 CCD 设计的 Dimetior VB 型动态斐索干涉仪;美国 4D 公司基于全息光学器件和微偏振阵列相位掩模板设计的泰曼-格林和菲索型动态干涉仪^[12];南京理工大学的朱文华等^[13]借助二维光栅分光构建四点源阵列构成的瞬时斐索和泰曼格林干涉仪等。已有的这类空域瞬时相移技术的一个普遍特点是均基于传统干涉测量光路,其实际检测精度仍无法摆脱参考光路中实物标准参考镜误差限制。近年来,一些瞬态检测技术也被逐步应用到小孔点衍射中,2017 年周翔等^[14]提出采用激光打孔技术,在金属纳

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 52005383, 51975448)

第一作者:张金鹏(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为点衍射干涉测量。Email:2858488945@qq.com

导师(通讯作者):高芬(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为精密光学检测技术。Email:gaofen8128@163.com

收稿日期:2021-10-25;录用日期:2021-11-24

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

米线栅偏振片上制备小孔,再结合二维光栅分光加波片组相位延迟阵列,实现对透镜波前质量的瞬态检测,该方法中激光加工的小孔质量对测量精度影响较大,且系统光路较为复杂,测试口径小。2020年王晨等^[15]提出一种基于偏振相机的点衍射干涉测量系统,用于实现球面面形的动态测量,该系统有良好的条纹对比度且具有一定的抗振能力,但系统中直接使用偏振相机采集的干涉图经插值处理后数据量过大,且偏振相机本身成本较高。目前同步相移技术在小孔点衍射干涉测量中尚未有具体应用成果。

本文提出基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉测量方案,借助棋盘格位相光栅对点衍射测量系统中的测试光和参考光进行分光,将四束 ± 1 级衍射光通过 2×2 的偏振片阵列移相,在CCD上一次获得4幅不同相移量的干涉图像,实现点衍射瞬态检测。该方案中小孔通过刻蚀工艺易于获得高精度,系统结构简单、实现成本低,后续数据处理简单,仅通过常规的四步相移算法即可快速的复原出待测面形信息。通过研究有望为实用点衍射干涉仪的开发奠定一定的理论及技术基础。

1 测量原理

基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉测量系统光路布置如图1所示,基本测量原理为:由线偏振He-Ne激光器出射的光束经1/4波片(QWP1)后变为右旋圆偏振光,再经显微物镜聚焦至不透明小孔衍射板中央的小孔后衍射产生近乎理想的球面波。衍射的球面波被分为两部分,一部分作为测试光(下半部分),另一部分作为参考光(上半部分)。测试光经1/4波片(QWP2)后原右旋圆偏振光变为与激光器出射时振动方向相反的线偏振光,经被测镜反射后,携带被测相位信息的线偏振测试光再次经1/4波片(QWP2)后变为左旋圆偏振光。该光束汇聚到小孔衍射基板表面并由小孔基板表面再次反射至参考光路。

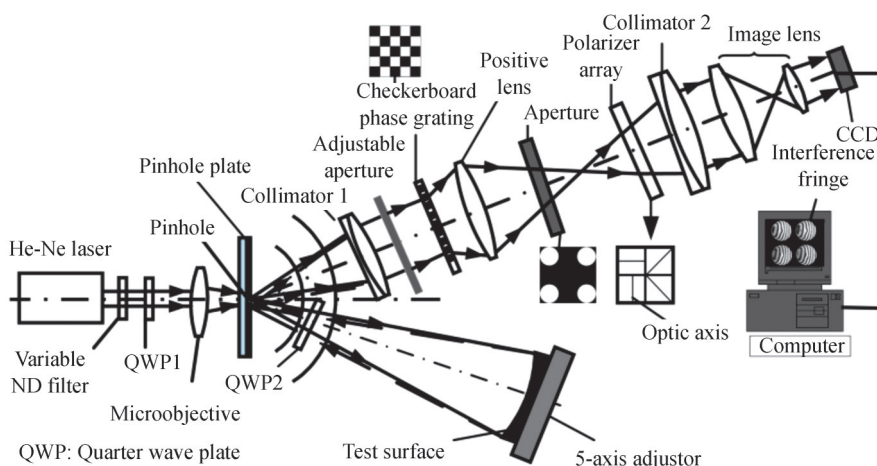


图1 基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉测量系统光路布置

Fig.1 Optical path layout of ultra precision surface transient interferometry system based on small hole point diffraction

此时,因携带被测信息的测试光为左旋圆偏振光,而参考光为右旋圆偏振光,两者开始不产生干涉。两路光束同时经透镜准直后平行入射至棋盘位相光栅发生衍射分光, $(\pm 1, \pm 1)$ 级的四束衍射光经正透镜缩束并由 2×2 的窗口光阑进行孔径限制后,分别入射到偏振阵列上四个透振方向不同的区域,因偏振阵列每个区域的透振方向与光轴夹角不同,条纹的明暗将会发生移动,相当于干涉条纹引入了不同相移量,该相移量是偏振角度的两倍,最后在CCD像面上同时获得4幅不同相移量的干涉图像。对一次采集的4幅瞬时干涉图像经图像预处理后,利用四步相移算法进行相位提取,即可复原出被测面形信息。

2 基于琼斯矩阵的偏振态分析

图1所述系统的偏振态是否满足要求,通过偏振阵列中不同区域偏振态的变化是否可获得既定的相移量是确定所提方法是否可行的重要依据。在光学测量理论中,关于偏振光学器件和偏振态的变化常用琼斯矩阵描述,这种方法具有形式简明、运算方便的优点,可以更直观地表现系统中偏振态与相位的变化关系。本文基于琼斯矩阵理论展开系统偏振态分析及验证。

设 He-Ne 激光器出射的线偏振光为 E_0 , 其琼斯矩阵表示为 $E_0 = [1 \ 0]^T$, T 为矩阵的转置。与 E_0 偏振光轴呈 45° 放置的 $1/4$ 波片的琼斯矩阵为 $G_{\lambda/4}$, 其中 λ 为激光器的工作波长, $G_{\lambda/4}$ 表示为

$$G_{\lambda/4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

衍射后的光被分为参考光和测试光两路, 设参考光为 E_r , 测试光为 E_t , r 代表参考光路, t 代表测试光路, 因经小孔衍射后光束的偏振态不发生变化, 则不经过任何器件前测试光和参考光的琼斯矩阵表示为

$$E_r = E_t = G_{\lambda/4} \cdot E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2)$$

若测试光 E_t 经 $1/4$ 波片后的琼斯矩阵为 E_{t1} , 经待测镜反射后的琼斯矩阵为 E_{t2} , 待测镜的矩阵为 F , φ 为待测面形相位信息, 再次经 $1/4$ 波片后测试光的琼斯矩阵为 E_{t3} , 则有

$$E_{t1} = G_{\lambda/4} \cdot E_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \exp(i\varphi) \quad (4)$$

$$E_{t2} = F \cdot E_{t1} = \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix} \exp(i\varphi) \quad (5)$$

$$E_{t3} = G_{\lambda/4} \cdot E_{t2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix} \exp(i\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \exp(i\varphi) \quad (6)$$

携带被测面形相位信息的测试光 E_{t3} , 经小孔板上反射膜反射至参考光路, 与参考光 E_r 发生干涉。由琼斯矩阵原理可知, 相互正交的两偏振光, 其中一个矩阵的转置共轭 (用 * 表示矢量的转置共轭) 与另一个矩阵的点乘结果为 0, 由式 (7) 的点乘结果可知, 测试光 E_{t3} 和参考光 E_r 符合正交偏振状态。

$$E_r^* \cdot E_{t3} = \frac{1}{\sqrt{2}} [1 \ i] \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

因参考光和测试光为一对正交偏振光, 可进一步叠加运算, 合成的正交偏振光 E_n 为

$$E_n = E_r + E_{t3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + \exp(i\varphi) \\ -i + i\exp(i\varphi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

正交偏振光经过棋盘位相光栅后, 发生衍射分光, 经光阑限制选取 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光, 再经偏振片阵列可以得到不同偏振方向出射光的琼斯矩阵 E_θ , 偏振片阵列的琼斯矩阵的一般形式为 M_θ , θ 为偏振片的偏振角度, θ 的取值为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 则有

$$M_\theta = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \frac{1}{2}\sin 2\theta \\ \frac{1}{2}\sin 2\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$E_\theta = M_\theta \cdot E_n = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & 1/2\sin 2\theta \\ 1/2\sin 2\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \exp(i\varphi) \\ -i + i\exp(i\varphi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据偏振片阵列不同区域的偏振角度的不同, 由式 (10) 可以得到

$$\begin{cases} E_{0^\circ} = M_{0^\circ} \cdot E_n = \frac{1}{\sqrt{2}} [1 + \exp(i\varphi)] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ E_{45^\circ} = M_{45^\circ} \cdot E_n = \frac{1}{2} [(1-i)(1 + \exp[i(\varphi + \pi/2)])] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ E_{90^\circ} = M_{90^\circ} \cdot E_n = \frac{1}{\sqrt{2}} [(-i)(1 + \exp[i(\varphi + \pi)])] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ E_{135^\circ} = M_{135^\circ} \cdot E_n = \frac{1}{2} [(-1-i)(1 + \exp[i(\varphi + 3\pi/2)])] \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

由式(12)的计算结果可以看出,偏振角度 θ 取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$,引入的相移量分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$,相移变化量为角度变化量的2倍,满足偏振同步相移原理。

由电场方向的琼斯矩阵结果,根据电场矢量 E_θ 与光强 I_θ 的关系

$$I_\theta = E_\theta \cdot E_\theta^* \quad (12)$$

计算得4幅瞬时相移干涉条纹图的光强为

$$\begin{cases} I_{0^\circ} = 1 + \cos\varphi \\ I_{45^\circ} = 1 - \sin\varphi \\ I_{90^\circ} = 1 - \cos\varphi \\ I_{135^\circ} = 1 + \sin\varphi \end{cases} \quad (13)$$

进一步由四步相移算法可以计算出待测相位 φ

$$\varphi = \arctan \left[\frac{I_{135^\circ} - I_{45^\circ}}{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}} \right] \quad (14)$$

进而可求得对应的被测面形偏差 $\Delta W = \varphi/4\pi \cdot \lambda$ 。通过上面的分析过程及分析结果可以看出所提方法理论上可行。

3 实验及结果分析

依据图1搭建的小孔点衍射瞬态干涉测量实验系统如图2所示。系统采用线偏振He-Ne激光器作为光源,激光器工作波长为632.8 nm,光束直径为0.7 mm,输出功率为2 mW;采用矩形渐变衰减片实现衍射场光强调整,衰减片透过率可调范围为1%~83%;采用10×的显微物镜将光束聚焦至衍射小孔。小孔衍射板以石英玻璃为基底,表面镀有不透光铬膜,衍射板中央小孔通过刻蚀加工而成,小孔直径为2.5 μm ,对应的衍射全角约 35° ,可用于测试光路的有效数值孔径 NA_{test} 不超过0.152。系统中所用棋盘位相光栅的有效尺寸为25.4 mm×25.4 mm,周期为40 μm ,刻蚀深度为720 nm。偏振片阵列的尺寸为20.1 mm×20.1 mm,四个区域的偏振角度依次为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° ,光轴精度在 2° 以内。CCD有效像素为1 280×1 024,单个像元尺寸为4.8 μm ×4.8 μm ,帧频为210 fps。

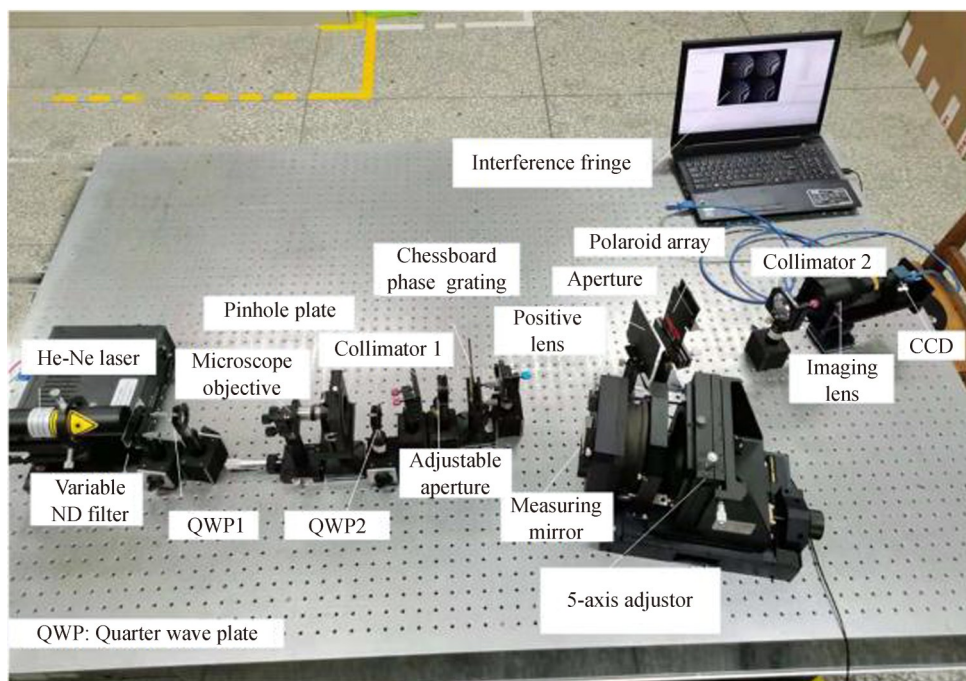


图2 小孔点衍射瞬态干涉测量实验系统

Fig. 2 Experimental system of pinhole point diffraction transient interferometry

基于上述实验装置对一直径 $D=50\text{ mm}$,曲率半径 $R=400\text{ mm}$ 的凹面球面反射镜进行检测,图3为某次采集到的单帧4幅瞬时相移干涉图像, I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 、 I_{135° 分别对应 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振方向的干涉条纹。

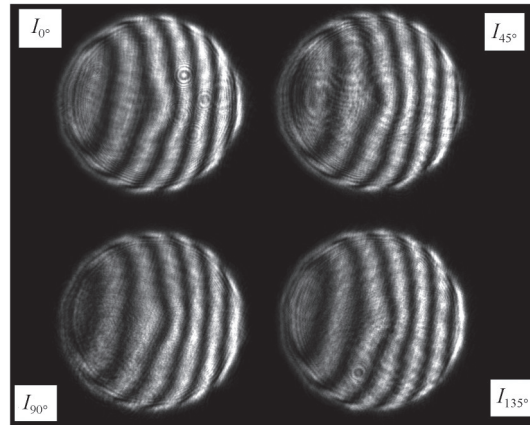


图3 实验采集的某单帧4幅瞬时相移干涉条纹

Fig. 3 Four instantaneous phase-shift interference fringes in a single frame which collected in experiment

为得到较好质量的相移条纹,复原出高精度的面形信息,对采集的点衍射瞬态干涉图像相位提取前进行了预处理过程,主要包括图像分割、降噪滤波、边缘提取、圆域提取、图像配准等。对预处理得到的图像四步相移算法提取相位信息、区域增长法相位解包裹及49项Zernike多项式面形拟合,面形检测结果取有效口径的95%,最终得到被测面形检测结果如图4(a)所示。为了验证本文所提方法的正确性,在相同的实验条件下,采用ZYGO球面干涉仪对同一凹面反射镜样品进行检测,面形测量结果同样取有效口径的95%,检测结果如图4(b)所示。表1给出了两者的其峰-谷误差(Peak to Valley, PV)和均方根误差(Root Mean Square, RMS)比对结果。

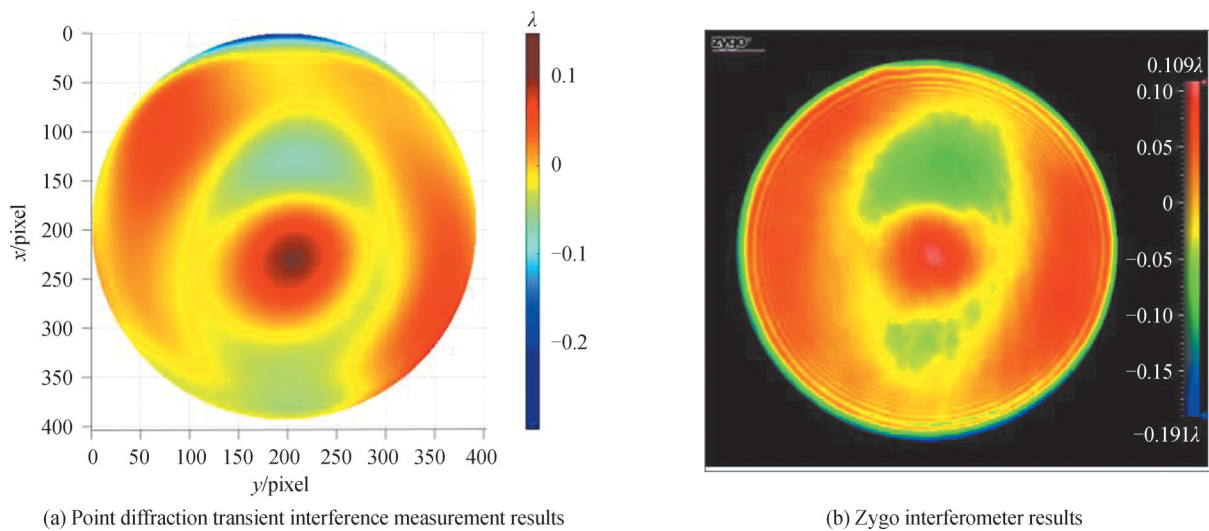


图4 面形检测结果

Fig. 4 Surface measurement results

表1 点衍射瞬态干涉测量系统与ZYGO球面干涉仪检测结果比较

Table 1 Comparison of measurement results between point diffraction transient interferometry system and ZYGO spherical interferometer

Surface error/ λ	Our Point diffraction transient interferometry	ZYGO spherical interferometer	Difference/ λ
PV	0.314	0.299	0.015
RMS	0.042 2	0.047	0.004 8

比较图4及表1中点衍射瞬态干涉测量系统与ZYGO球面干涉仪检测结果可知:两者面形特征吻合度高,两者测量结果非常接近,PV的差值仅 0.015λ ,RMS的差值仅为 0.0048λ ,由此验证本文所提方法可行。

为进一步验证所提点衍射瞬态干涉测量系统的稳定性,基于上述实验装置对同一被测件在多天内进行了10组重复性测量,得到被测面形误差的PV和RMS值如图5所示,10次测量结果的PV和RMS均值分别为 0.321λ 和 0.0428λ ,PV的重复性精度为 0.005λ (优于 $\lambda/200$),RMS的重复性精度为 0.0006λ (优于 $\lambda/1600$);ZYGO球面干涉仪10次测量结果的PV和RMS均值分别为 0.301λ 和 0.048λ ,PV的重复性精度为 0.005λ (优于 $\lambda/200$),RMS的重复性精度为 0.0005λ (优于 $\lambda/2000$);从两种测量方法的实验数据表明所提的点衍射瞬态测量系统具有较好的重复性测量精度。

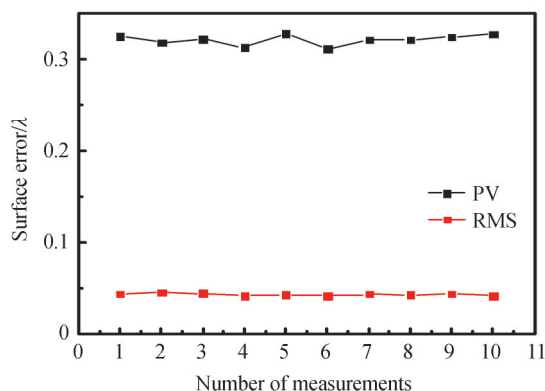


图5 10组重复性实验测得PV值和RMS值分布

Fig. 5 The distribution of PV and RMS values in 10 groups of repetitive experiments

4 结论

本文提出了一种基于小孔点衍射的超精面形瞬态干涉检测方法,从理论分析、比对实验两方面进行了系统可行性验证。基于琼斯矩阵理论的系统偏振态理论分析结果表明,偏振阵列的偏振角度 θ 分别取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 时,引入的相移量分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$,满足四步相位提取算法对相移量的要求,系统通过棋盘位相光栅进行分光配合该偏振片阵列移相,可以实现瞬态检测;与ZYGO干涉仪的比对实验结果表明,利用所提系统可获得与ZYGO干涉仪接近的测量结果,PV的重复性精度优于 $\lambda/200$,RMS的重复性精度优于 $\lambda/1600$,实验验证系统可行且具有较好的稳定性。所提系统兼顾了点衍射的高精度和同步相移抗干扰能力强的优点,原理简单、易于实现,研究成果有利于推进小孔点衍射干涉测量法从实验研究走向仪器开发的进程。

文中仅基于现有实验条件对所提方法进行了初步实验验证,要构建实用的点衍射瞬态干涉测量系统,获得更高精度的测量结果,还需进一步改进和优化系统,减小各误差源对测量的影响。如光路中使用的偏振片阵列光轴的精度仅在 2° 以内,光轴的精度将直接影响相移量,从而对最终的测量结果产生重要影响,另外光栅刻蚀误差及其空间几何光程误差对测量系统的影响。如何评估光轴精度与位相光栅对测量的影响,并进行该项误差的消除或者补偿将是后续的一项重要研究内容,该部分工作将另文进行探讨。

参考文献

- [1] MING Ming, WANG Jian Li, MA Peili. A new method for testing the whole lens group of large optic system[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(3): 419-423.
明名, 王建立, 马佩立. 一种检测大口径光学系统中透射镜组的新方法[J]. 光子学报, 2011, 40(3): 419-423.
- [2] MAO Shanshan, LI Yanqiu, LIU Ke, et al. Optical design of high numerical aperture extreme ultraviolet lithography objective with freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8): 0814002.
毛姗姗, 李艳秋, 刘克, 等. 高数值孔径自由曲面极紫外光刻物镜光学设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 0814002.
- [3] SOMMARGREN G E, PHILLION D W, JOHNSON M A, et al. 100-picometer interferometry for EUVL[C]. SPIE, 2002: 316-328.
- [4] JOHNSON M A, PHILLION D W, SOMMARGREN G E, et al. Construction and testing of wavefront reference sources

- for interferometry of ultra-precise imaging systems[C]. SPIE, 2005, 5869:58690P.
- [5] LI Junsheng, FAN Qi, MO Weidong, et al. A method for getting the best fitting spheric surface parameters for aspheric surface point diffraction measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(12): 1865-1869.
李均盛, 范琦, 莫卫东, 等. 用于非球面点衍射检测的最佳匹配球参量获取方法研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(12): 1865-1869.
- [6] WANG Daodang, YANG Yongying, CHEN Chen, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [7] SUN Yue, SHEN Hua, LI Xuan, et al. Wavelength-tuning point diffraction interferometer resisting inconsistent light intensity and environmental vibration: application to high-precision measurement of a large-aperture spherical surface[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): 1253-1260.
- [8] ZHAO Zhuo, LI Bing, KANG Xiaoqin, et al. Precision optical path alignment system for point diffraction interferometer based on image information[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(14): 3703-3711.
- [9] GAO Fen, ZHAO Zixin, JIANG Zhuangde, et al. Measurement of aspheric surface combining point diffraction interferometry and annular subaperture stitching[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(1):014102.
- [10] ZONG Yi, DUAN Mingliang, ZHU Rihong, et al. Dynamic low-coherence interferometry using a double Fizeau cavity[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9):2051-2054.
- [11] SUN Qinyuan, CHEN Lei, ZHENG Donghui, et al. Dynamic Fizeau interferometer with short coherent light source[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0220001.
孙沁园, 陈磊, 郑东晖, 等. 采用短相干光源的动态斐索干涉仪[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0220001.
- [12] MILLERD J E, WYANT J C. Simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer; U.S. Patent7,230,718[P]. 2007-6-12.
- [13] ZHU Wenhua, CHEN Lei, YANG Ying. 600-mm aperture simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 104:26-32.
- [14] ZHOU Xiang. Research on dynamic wavefront measurement based on point diffraction interference[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2018.
周翔. 基于点衍射干涉的波前动态测试技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [15] WANG Chen, ZHOU You, LU Qi. Research on reflective polarization phase-shifting dynamic point diffraction interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10):1004003.
王晨, 周游, 鲁棋. 反射式偏振相移动态点衍射干涉技术的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1004003.

Transient Interferometry of Ultra Precision Surface Based on Small Hole Point Diffraction

ZHANG Jimpeng¹, GAO Fen¹, LI Bing²

(1 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the development of lithography technology in China from deep UV to extreme UV, the detection accuracy of lithography objective lens surface shape below nano or even sub nano is required. The detection accuracy of the commercial Tyman-Green and Fizeau interferometers is limited by their own standard reference mirror shape accuracy, which has been unable to meet the development needs of the above-mentioned ultra-precision detection. The point diffraction interferometry uses the micro aperture diffraction to produce an almost ideal spherical wave as the reference wave, which gets rid of the limitation of the measurement accuracy of the standard reference mirror, and opens up an effective way for the ultra-fine surface shape detection in the field of lithography. The point diffraction method was proposed in the early 19th century and developed rapidly abroad, and the United States and Japan have developed molding equipment for point diffraction interferometers. The research on point diffraction interferometer in China started late, especially in the field of small hole point diffraction interferometry. At present, the research is mostly in the laboratory stage. One of the most important reasons restricting the improvement of its accuracy and the development of forming equipment is its phase shift. The existing small hole point diffraction interferometers mostly use high-precision piezoelectric ceramic phase shifter to drive the measured part to move for many times, and collect multiple interference images for phase extraction. The

realization of this kind of time-domain multi-step phase-shifting technology relies on the import of expensive PZT on the one hand, and on the other hand, the interference image is easily affected by environmental interference during the long-term acquisition of interference images, resulting in low actual detection accuracy, especially low repeatability accuracy. In order to solve the problem that the phase shift depends on the piezoelectric ceramic phase shifter in the small hole point diffraction interferometer and the measurement is affected, a super precision surface transient interference detection method based on small hole point diffraction is proposed, and the system feasibility is verified from two aspects of theoretical analysis and comparative experiment. Two orthogonal circularly polarized beams are obtained by constructing a small hole diffraction interferometry optical path with reflective structure. The checkerboard phase grating is used to split the light and the polarizer array is phase-shifted, and four interference images with different phase shifts are simultaneously obtained on the CCD. The shape information of the measured surface can be obtained directly by processing the four instantaneous interference images collected at a single time. The theoretical analysis results of the system polarization state based on Jones matrix theory show that when the polarization angles of the polarization array are 0° , 45° , 90° and 135° , the introduced phase shifts are 0 , $\pi/2$, π and $3\pi/2$ respectively, which meet the requirements of the four-step phase extraction algorithm. The system can realize the transient detection by splitting the light through the chessboard phase grating and phase shifting with the polarizer array; Compared with the Zygo interferometer, the experimental results show that the measurement results of the proposed system are close to those of the Zygo interferometer, and the repeatability and accuracy of PV are better than those of the Zygo interferometer $\lambda/200$, the repeatability accuracy of RMS is better than $\lambda/1600$. The experimental results show that the system is feasible and has good stability. The proposed system takes into account the advantages of high precision of point diffraction and strong anti-interference ability of synchronous phase shift. The principle is simple and easy to implement. The research results are conducive to promoting the process of small hole point diffraction interferometry from experimental research to instrument development.

Key words: Interferometry; Surface measurement; Point diffraction interferometer; Synchronous phase shift; Transient detection

OCIS Codes: 120.3180; 120.6650; 240.5440