

## 偏振相移点衍射干涉波像差检测技术研究

冯鹏<sup>1,2</sup>, 李中梁<sup>1,2\*</sup>, 王向朝<sup>1,2</sup>, 步扬<sup>1,2</sup>, 卢云君<sup>1,2</sup>, 郭福东<sup>1</sup>, 李思坤<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 面向光学系统及光学车间现场波像差检测、长焦成像系统波像差检测等复杂易受外部干扰的应用场景, 本团队提出了一种基于偏振同步相移的双光纤点衍射干涉技术, 用于光学成像系统波像差的实时动态检测。该技术采用短相干长度光源与单模保偏光纤产生两个点源, 这两个点源可以输出正交线偏振光; 在光路中加入四分之一波片, 采用微偏振阵列相机实现了基于单幅干涉图的空间同步相移。通过衰减器调节两束光的光强比, 可以实现干涉条纹对比度的调节。搭建了基于该技术的实验装置, 并采用该装置对 5X 透射式微缩投影物镜波像差进行了测量, 测得其波像差均方根(RMS)为 10.49 nm。在低频振动噪声环境下进行了 32 次重复性测量, 重复测量精度为 0.17 nm, 实现了待测投影物镜波像差的高精度实时动态检测。实验结果验证了所提检测技术的有效性。

**关键词** 测量; 点衍射; 偏振相移; 波像差检测; 干涉测量

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2104001

## 1 引言

波像差是评价光学系统成像质量的重要参数。随着现代光学技术的快速发展, 现代光学系统对成像系统的波像差提出了越来越高的要求<sup>[1-3]</sup>。相移点衍射干涉仪(PS/PDI)是高精度检测光学成像系统波像差的仪器<sup>[4-5]</sup>。美国劳伦斯伯克利国家实验室的研究表明, PS/PDI 的检测精度均方根(RMS)可以优于 0.1 nm<sup>[6-11]</sup>。在 PS/PDI 中, 相移包括分步相移和同步相移, 其中: 分步相移在时间序列上改变参考光的相位并记录相对应的干涉图, 即分别记录不同时刻的多幅相移图; 同步相移的实现方法是将一个 CCD 相机的记录靶面分割成多份, 并在单次曝光情况下实现多幅不同相移量干涉图的同时记录<sup>[12-17]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所提出了一种双光纤点衍射干涉仪, 该仪器在系统成像光路外利用步进驱动实现分步相移, 从而实现高精度波前检测<sup>[18]</sup>。但是分步相移测量法较为依赖外界环境, 易受到周围环境振动及气流的干扰, 难以应用于复杂环境下具有较高精度要求的现场检测<sup>[19-22]</sup>。

本团队提出的偏振相移点衍射干涉技术将偏振同步相移技术应用于双光纤点衍射干涉, 使干涉仪中两个点源输出正交线偏振光。在光路中加入四分之一波片, 就可以采用微偏振阵列相机实现基于单幅干涉图的空间同步相移。空间同步相移技术具有对力学振动和空

气扰动不敏感的特点。本团队基于该技术搭建了实验装置, 并利用该实验装置对待测成像系统进行了波像差及重复性测量, 测量结果验证了所提技术的有效性。

## 2 基本原理

## 2.1 偏振相移点衍射干涉波像差检测原理

图 1 为本文提出的偏振相移点衍射干涉波像差测量原理图。光源采用工作波长为 532 nm 的短相干长度激光器, 采用短相干长度光源可以消除成像系统中部分多次反射寄生干涉的影响。激光器输出光被分束器分为两路, 分别通过衰减器和光纤阵列后进入准共光路干涉仪结构。光路中的衰减器为可调衰减器, 可以分别控制两路光的输出光强。

物面光纤阵列中两根保偏光纤的快轴方向相互垂直即可输出两束偏振方向相互正交的线偏振光。两束线偏振光经过待测成像系统后到达成像系统的像面。像面掩模包含测量光窗和衍射针孔, 一束光经过光窗后携带有被测系统的波像差信息(作为测量光), 另一束光经过衍射针孔产生参考光, 两束光干涉形成点衍射测量模式。两束光均经过光窗则形成系统误差测量模式。两束光经过像面掩模后, 再经过一个主轴方向与二者偏振方向成 45° 的四分之一波片, 变成两束相互正交的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 再经过偏振片尺寸与 CCD 像素单元尺寸相同且一一对应的微偏振阵列后, 由 CCD 采集单幅干涉图样。

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61971406, 81927801)、中国科学院青年创新促进会资助项目

通信作者: \*lizhongliang@siom.ac.cn

对采集的单幅干涉图样进行抽样组合,将干涉图样中具有相同相移量的像素单元提取出来,就可以获

得固定附加相位差分别为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$  的 4 幅相移干涉图像。

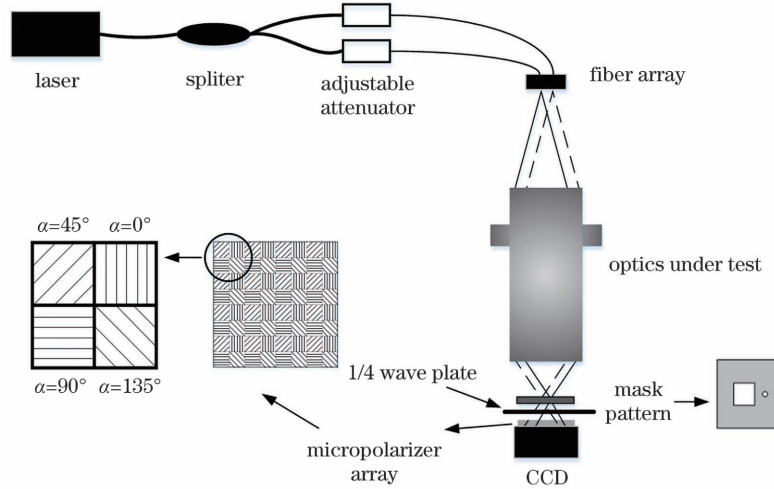


图 1 偏振相移点衍射干涉测量原理

Fig. 1 Principle of polarization phase-shifting point diffraction interferometry

偏振相移法通过改变光波的偏振态从而改变光波相位实现相移。在上述干涉测量系统中,物面光纤出射两束相互正交的线偏振光。设两束光沿光轴方向(光的前进方向,  $z$  方向)传输,它们的电场分量分别沿水平方向( $x$  方向)和竖直方向( $y$  方向)振动,则两束光经过待测成像系统与像面掩模(测量模式)后可以由琼斯矩阵表示为

$$\begin{cases} \mathbf{O}(x, y) = A_O \exp(i\varphi_O) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}(x, y) = A_R \exp(i\varphi_R) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $A_O$  和  $A_R$  分别为测量光和参考光的振幅;  $\varphi_O$  和  $\varphi_R$  分别为测量光和参考光的相位;  $i$  表示虚数单位。然后,两束光经过一个主轴方向与二者偏振方向成  $45^\circ$  的四分之一波片,形成左旋圆偏振光和右旋圆偏振

光,它们可用琼斯矩阵表示为

$$\begin{cases} \mathbf{O}'(x, y) = \mathbf{T}_{QW} \mathbf{O} = \frac{-1+i}{2} A_O \exp(i\varphi_O) \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}'(x, y) = \mathbf{T}_{QW} \mathbf{R} = \frac{-1+i}{2} A_R \exp(i\varphi_R) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{T}_{QW}$  为四分之一波片对应的琼斯矩阵,其表达式为

$$\mathbf{T}_{QW} = \frac{1+i}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

如图 1 中微偏振片阵列所示,阵列中每相邻 4 个偏振片组成一个相移单元,每个相移单元中的 4 个偏振片的偏振方向分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。相互正交的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光经过微偏振阵列的相移单元后变为偏振方向相同的线偏振光,此时,测量光和参考光可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{O}''(x, y) = \mathbf{T}_p \mathbf{O}' = \frac{\sqrt{2}}{2} A_O \exp \left[ i \left( \varphi_O - \alpha + \frac{\pi}{4} \right) \right] \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}''(x, y) = \mathbf{T}_p \mathbf{R}' = \frac{\sqrt{2}}{2} A_R \exp \left[ i \left( \varphi_R + \alpha - \frac{\pi}{4} \right) \right] \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{T}_p$  是偏振方向与水平方向成  $\alpha$  角 ( $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) 的偏振片对应的琼斯矩阵,其表达式为  $\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin(\alpha) \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \cos(\alpha) & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$ 。此时,经过微偏振阵列后偏振方向相同的测量光和参考光在 CCD 面发生干涉,由 CCD 记录的干涉图强度分布可以表示为

$$I(x, y) = (\mathbf{O}'' + \mathbf{R}'')^T \cdot (\mathbf{O}'' + \mathbf{R}'') = \frac{1}{2} [A_O^2 + A_R^2 - 2A_O A_R \sin(\varphi - 2\alpha)], \quad (5)$$

式中:  $I(x, y)$  是与一个相移单元对应的 CCD 像素记录的干涉光强;上标 T 表示转置;  $A_O^2$  和  $A_R^2$  分别表示

测量光和参考光的光强;  $\varphi$  表示测量光与参考光之间的相位差。两束光发生干涉, CCD 探测器每相邻 4 个像素单元记录的干涉光强可以表示为

$$\begin{cases} I(0^\circ) = \frac{1}{2} [A_O^2 + A_R^2 - 2A_O A_R \sin(\varphi)] \\ I(45^\circ) = \frac{1}{2} [A_O^2 + A_R^2 + 2A_O A_R \cos(\varphi)] \\ I(90^\circ) = \frac{1}{2} [A_O^2 + A_R^2 + 2A_O A_R \sin(\varphi)] \\ I(135^\circ) = \frac{1}{2} [A_O^2 + A_R^2 - 2A_O A_R \cos(\varphi)] \end{cases}. \quad (6)$$

CCD 采集单幅图像,将图中具有相同相移量的像素单元提取出来,通过抽样重组的方法对其进行重建,获得 4 幅具有不同相移量的干涉图样。B、A、C、D 分别代表相移量为  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$  的像素单元,如图 2 所示。

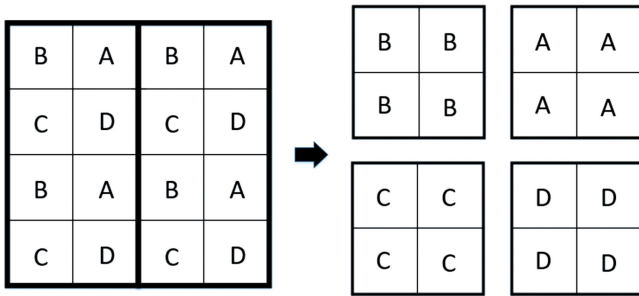


图 2 干涉图样重组

Fig. 2 Restructuring interference patterns

利用公式

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{I_D - I_A}{I_B - I_C} \right], \quad (7)$$

计算得到相位差  $\varphi$ ,再通过相位恢复算法即可得到待测物的波像差信息。

### 2.2 系统误差去除

本干涉测量方法通过两种测量模式进行系统误差的去除,即点衍射测量模式和系统误差测量模式。图 3(a)所示为点衍射测量模式示意图,在该模式下可测得点衍射测量结果  $W_t$ ,测量结果包含了测试光和点衍射光的几何光程误差、波片引入的系统误差、探测器倾斜误差。采用系统误差测量模式可以快速方便地标定这些系统误差。图 3(b)是系统误差测量模式示意图,在该模式下利用像面双窗掩模代替孔窗掩模可测得系统误差数据  $W_s$ 。

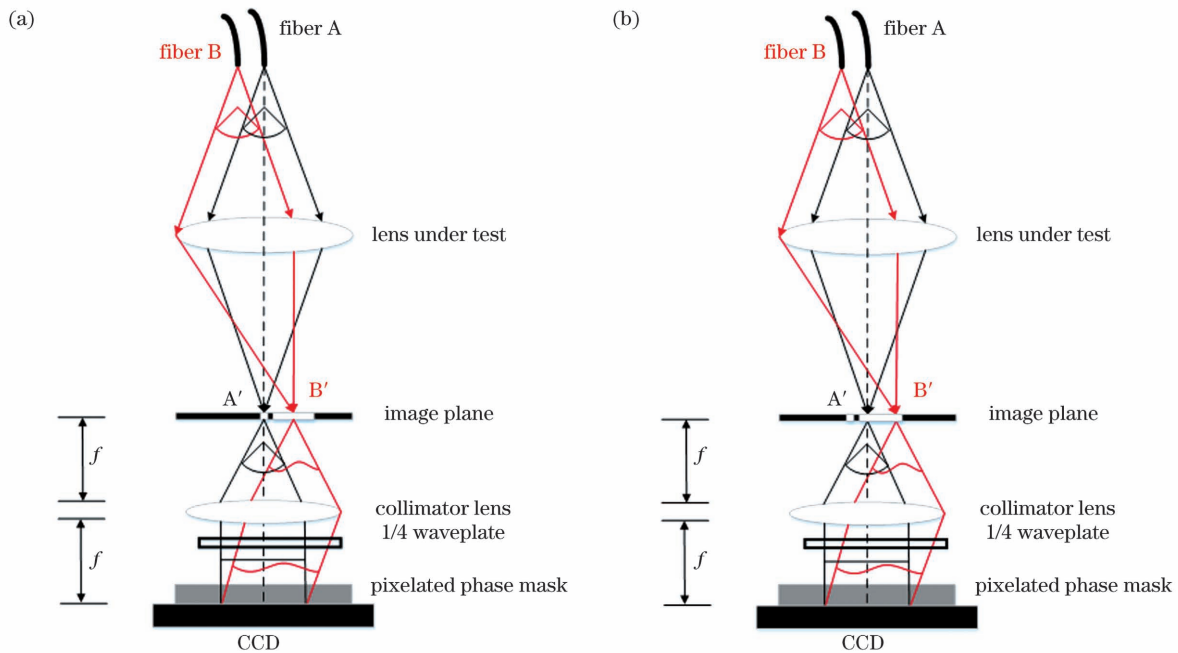


图 3 系统误差去除示意图。(a)点衍射测量模式;(b)系统误差测量模式

Fig. 3 Schematics of system errors calibration. (a) Point diffraction measurement mode; (b) system errors measurement mode

在点衍射测量结果  $W_t$  中去除系统误差测量结果  $W_s$ ,就可以得到待测成像系统的波像差信息,用公式可以表示为

$$W = W_t - W_s = W_{\text{lens}} + W_{\text{fiber A}} - W_{\text{pinhole}}. \quad (8)$$

在得到的系统波像差结果中,  $W_{\text{lens}}$  表示待测成像系统的波像差信息,  $W_{\text{fiber A}}$  表示物面细径光纤产生的波前误差,  $W_{\text{pinhole}}$  表示像面衍射小孔产生的波前误差。本干涉测量系统的工作波长  $\lambda$  为 532 nm, 光纤芯径为 2  $\mu\text{m}$ , 像面小孔直径为 700 nm, 系统误差去除后的测量不确定度 RMS 可以达到  $1.42\lambda \times 10^{-4}$  [18]。

## 3 实 验

### 3.1 偏振相移点衍射实验及误差分析

图 4 是搭建的偏振相移点衍射干涉波像差检测系统。被测物镜为 5X 透射式微缩显微物镜,像方数值

孔径(NA)为 0.3,物方数值孔径为 0.06,设计波像差 RMS 优于  $\lambda/20$ 。选用工作波长为 532 nm、相干长度约厘米量级、输出光功率为 30 mW 的短相干长度多纵模固体激光器。可调衰减器的分辨率为 0.01%。物面光纤采用芯径为 2  $\mu\text{m}$  的单模保偏光纤。像面掩模板采用硅基底,其上覆盖有遮光层(200 nm 厚 SiN 膜+500 nm 厚 Cr 膜),针孔直径为 700 nm,光窗尺寸为 100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。在实验中,限于像面空间尺寸,须将四分之一波片放入物面光纤端面后,但这样做就无法通过本文所述系统误差标定方法去除四分之一波片带来的误差,因此实验测量结果中包含着四分之一波片带来的误差。后面本文将对其影响作进一步分析。

在第 2 节基本原理的推导中,本文假设所有光学元件的质量及位置为理想状态,但实际上,实验中各器件的参数及位置都会不可避免地会存在各种误差。通



通过对实验系统进行分析可知本文同步相移干涉系统的测量误差源主要包括以下几个方面:1)四分之一波片制造误差会导致延迟量发生偏离,线偏振光经过四分之一波片后转变为椭圆偏振光而非圆偏振光;2)四分之一波片置于物面光纤端面后,光束非垂直入射至四分之一波片会引入相位延迟误差;3)四分之一波片快轴方向与水平轴应为  $45^\circ$  角,但实际调整时可能会存在方位角误差;4)微偏振阵列的 4 个偏振片的透振方向理论上应依次相差  $45^\circ$ ,但实际实验时会存在方位角偏差。

为此,接下来分析以上误差源对测量结果的影响。实验中采用的四分之一波片是 Thorlabs 公司的 WPQ10E-532 聚合物零级四分之一波片,其相位延迟量小于  $\lambda/100$ ,在  $3.5^\circ$  入射角下的延迟量偏离小于 1% (待测投影物镜的物方数值孔径为 0.06,换算成角度为  $3.43^\circ$ )。经仿真计算,延迟量小于  $0.014\lambda$  ( $\sqrt{(0.01\lambda)^2 + (0.01\lambda)^2}$ ) 时,测量误差的最大值在  $\lambda/800$  以内,对测量结果的影响可以忽略。四分之一波片采用手动转台(转台精度为  $0.1^\circ$ ) 调节,会导致方位角误差。经仿真计算,方位角误差小于  $1^\circ$  时,测量误差的最大值不大于  $\lambda/500$ ,对测量结果的影响较小。实验中采用的 CCD 相机是 4D 科技公司生产的 PolarCam 商用微偏振阵列集成相机,其有效像素为  $640 \times 460$ ,帧频为 259 frame/s,微偏振片和像元的尺寸大小相同,均为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ ,偏振片透振方向的方位角偏差为  $\pm 1^\circ$ 。经仿真计算可知 CCD 相机引

入的测量误差不大于  $\lambda/100$ <sup>[23]</sup>。

采用图 4 所示的实验装置对待测物镜的波像差进行测量,得到的相移干涉图如图 5 所示。图 5(a) 是 CCD 相机采集的点衍射测量模式下的单幅干涉图像;图 5(b) 是将不同透振方向单元抽样组合得到的 4 幅分辨率相同、相移量不同的干涉条纹图样,它们的相移量分别为  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ,干涉对比度分别为 0.59、0.66、0.64、0.58。

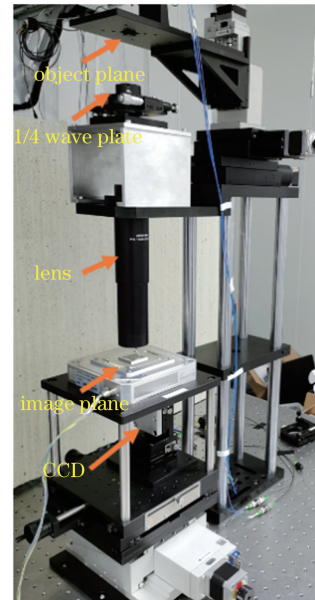


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic of experimental step

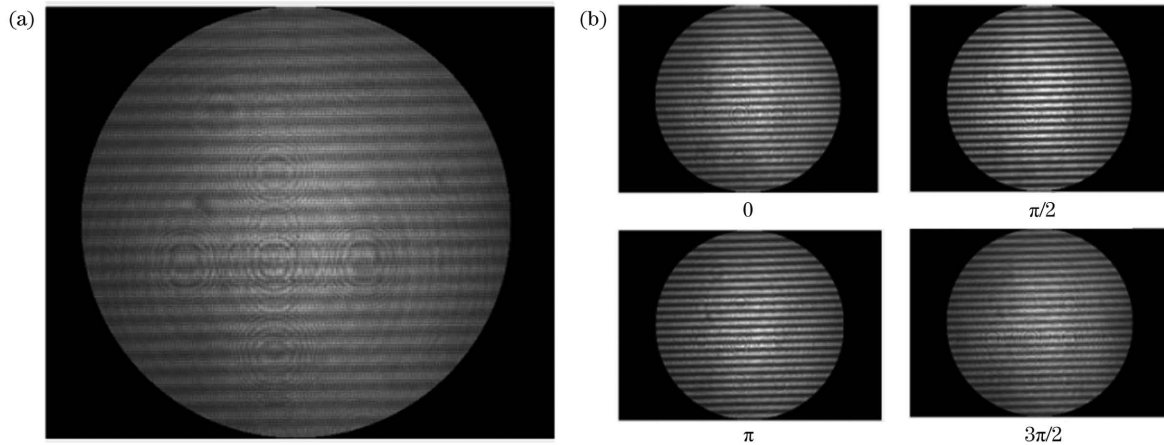


图 5 实验采集的干涉图。(a)单幅干涉图;(b)相移干涉图

Fig. 5 Interferograms collected in experiment. (a) Single interferogram; (b) phase-shifting interferograms

采用四步相移算法及相位解包裹算法恢复待测物镜的波像差信息。图 6 为投影物镜波像差测量结果经 37 项 Zernike 多项式拟合的相位分布图。图 6(a) 和图 6(b) 为去掉直流项、倾斜项和离焦项后的点衍射测量结果和系统误差测量结果,点衍射测量结果的 RMS 值为 41.67 nm,系统误差测量结果的 RMS 值为 41.07 nm。图 6(c) 为被测投影物镜的波像差测量结果,其 RMS 值为 10.49 nm。在图 6(a) 所示的

Zernike 多项式拟合结果中,主要像差成分有  $Z_5$  项像散(47.85 nm)和  $Z_8$  项彗差(70.89 nm);在图 6(b) 所示的 Zernike 多项式拟合结果中,主要像差成分有  $Z_5$  项像散(54.28 nm)和  $Z_8$  项彗差(67.75 nm);在图 6(c) 所示的 Zernike 多项式拟合结果中,主要像差成分由  $Z_5$  项像散(9.78 nm)和  $Z_8$  项彗差(-4.09 nm),已无明显的像散和彗差成分,表明系统误差已被有效去除。

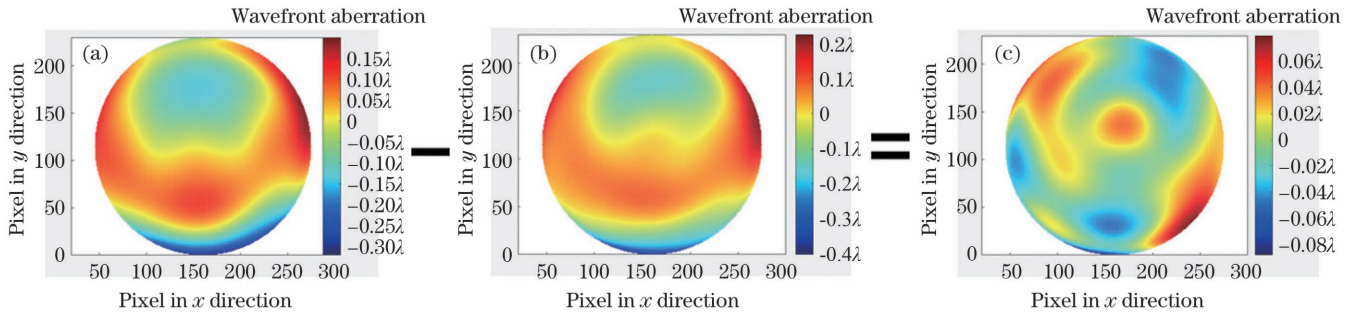


图 6 投影物镜波像差测量结果(都已去除了 Zernike 多项式的  $Z_1 \sim Z_4$  项,即去除了直流项、 $x$  方向倾斜项、 $y$  方向倾斜项、离焦项)。(a)点衍射测量结果,其 RMS 值为 41.67 nm;(b)系统误差测量结果,其 RMS 值为 41.07 nm;(c)波像差测量结果,其 RMS 值为 10.49 nm

Fig. 6 Wavefront aberration detection results of measured objective lens (all measurement results remove  $Z_1 \sim Z_4$  terms of Zernike polynomials, that is, measurement results remove piston,  $x$ -tilt,  $y$ -tilt, and defocus). (a) Point diffraction measurement results with measurement RMS of 41.67 nm; (b) systematic errors measurement results with measurement RMS of 41.07 nm; (c) wave aberration detection results with measurement RMS of 10.49 nm

### 3.2 测量重复性

测量重复性是干涉仪测量精度的一个重要指标,影响干涉仪测量重复性的主要因素之一是振动。振动主要来自地面传播的振动和周围气流的流动,包含各种频率和振幅的振动信号。影响干涉测量的主要是 150 Hz 以下的低频振动,它们的振幅往往很大,会使干涉条纹发生移动进而使干涉条纹变得模糊,从而影响干涉测量的重复性。本次实验选用无隔振系统且周围有振动源的平台对待测投影物镜进行 32 次连续测量(单次测量未平均),测量时的平台振动频谱图如图 7 所示。其中低频振动的振幅比较大,频率为 1 Hz 时振幅为 11.35  $\mu\text{m}$ ,频率为 47 Hz 时振幅为 7.81  $\mu\text{m}$ ,频率为 50 Hz 时振幅为 20.60  $\mu\text{m}$ ,频率为 100 Hz 时振幅为 7.19  $\mu\text{m}$ 。

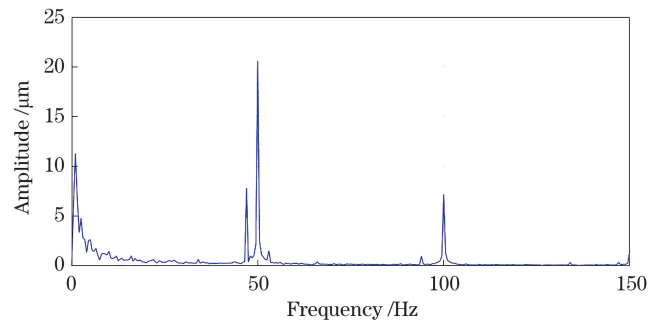


图 7 平台振动频谱图

Fig. 7 Vibration spectrum diagram of platform

在图 7 所示振动情况下连续进行了 32 次波像差测量,测量结果如图 8(a)所示,32 次重复测量精度(标

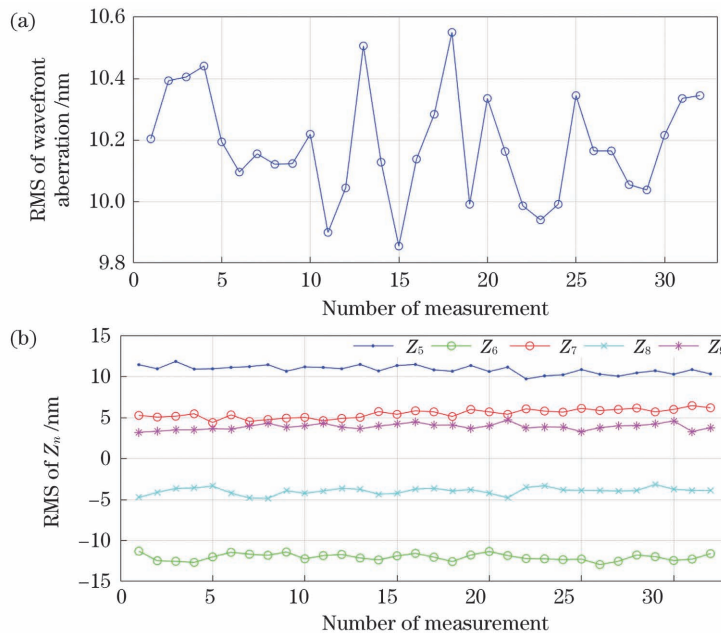


图 8 振动环境下 32 次波像差测量结果。(a)32 次波像差测量的重复性;(b)测量结果经 Zernike 多项式拟合后, $Z_5 \sim Z_9$  项的测量重复性

Fig. 8 Thirty-two wavefront aberration measurement results under vibration environment. (a) Repeatability of 32 wavefront aberration measurements; (b) measurement repeatability of  $Z_5 \sim Z_9$  after measurement results are fitted with Zernike polynomial

准差  $\sigma$ ) 为 0.17 nm。图 8(b) 给出了 32 次测量结果经 Zernike 多项式拟合后,  $Z_5 \sim Z_9$  项 ( $Z_5 \sim Z_9$  项分别为  $0^\circ$  像散、 $45^\circ$  像散、 $x$  方向彗差、 $y$  方向彗差、球差) 的测量重复性, 可以看出重复测量精度(标准差  $\sigma$ ) 均小于 0.5 nm。这一结果表明, 该干涉测量系统具有较好的抗振能力, 在振动噪声环境下具有较高的重复测量精度。

## 4 结 论

本团队研究了基于偏振相移的双光纤点衍射干涉波像差检测技术。物面采用  $2\ \mu\text{m}$  芯径单模保偏光纤产生偏振态相互垂直的理想球面波; 像面采用直径为 700 nm 的针孔产生参考光, 在数值孔径为 0.3 时衍射波面偏差 RMS 小于  $\lambda/10^4$ , 能够满足高精度成像系统的波像差检测要求。利用四分之一波片和集成微偏振阵列的 CCD 相机采集单幅图后, 获得了 4 幅同步相移的干涉图, 提高了干涉仪在复杂环境条件下的抗振动干扰性能, 实现了成像系统波像差的高精度实时现场检测。干涉仪采用全光纤光路布局, 不仅精简了整体结构, 还具有干涉对比度可调节的优点。本团队搭建了偏振相移点衍射干涉实验平台, 并对设计波像差优于  $\lambda/20$  的 5X 透射式微缩投影物镜进行了测量, 测得的波像差 RMS 为 10.49 nm; 在低频振动噪声较大的环境下进行了 32 次重复性测试, 重复测量精度为 0.17 nm, 验证了本文所提检测技术的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Shirai T, Barnes T H, Haskell T G. Adaptive wave-front correction by means of all-optical feedback interferometry[J]. Optics Letters, 2000, 25(11): 773-775.
- [2] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] Miyakawa R. Wavefront metrology for high resolution optical systems [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2011.
- [4] Smartt R N, Steel W H. Point-diffraction interference microscopy[J]. Applied Optics, 1985, 24(10): 1402-1403.
- [5] Meddecki H, Tejnill E, Goldberg K A, et al. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1526-1528.
- [6] Goldberg K A, Naulleau P P, Denham P E, et al. At-wavelength alignment and testing of the 0.3 NA MET optic[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(6): 2956.
- [7] Naulleau P P, Goldberg K A, Lee S H, et al. Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wave-front metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy[J]. Applied Optics, 1999, 38(35): 7252-7263.
- [8] Sugisaki K, Hasegawa M, Okada M, et al. EUVA's challenges toward 0.1 nm accuracy in EUV at-wavelength interferometry [M]//Osten W. Fringe 2005. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 252-266.
- [9] Murakami K, Saito J, Ota K, et al. Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 257-264.
- [10] Hasegawa T, Ouchi C, Hasegawa M, et al. EUV wavefront metrology system in EUVA[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5374: 797-801.
- [11] 刘克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2923-2927.  
Liu K, Li Y Q. A new calibration method of systematic errors in phase-shifting point diffraction interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2923-2927.
- [12] 王晨, 周游, 鲁祺, 等. 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.  
Wang C, Zhou Y, Lu Q, et al. Research on reflective polarization phase-shifting dynamic point diffraction interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1004003.
- [13] 张美玲, 郜鹏, 温凯, 等. 同步相移数字全息综述(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 0709001.  
Zhang M L, Gao P, Wen K, et al. A comprehensive review on parallel phase-shifting digital holography (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 0709001.
- [14] Liang D, Zhang Q, Wang J, et al. Single-shot Fresnel incoherent digital holography based on geometric phase lens[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(2): 92-98.
- [15] Tahara T, Awatsuji Y, Kaneko A, et al. Parallel two-step phase-shifting digital holography using polarization[J]. Optical Review, 2010, 17(3): 108-113.
- [16] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5531: 1-11.
- [17] Yoneyama S, Kikuta H, Moriwaki K. Simultaneous observation of phase-stepped photoelastic fringes using a pixelated microretarder array [J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083604.
- [18] Feng P, Tang F, Wang X Z, et al. Dual-fiber point diffraction interferometer to measure the wavefront aberration of an imaging system[J]. Applied Optics, 2020, 59(10): 3093-3096.
- [19] Kihm H, Kim S W. Oblique fiber optic diffraction interferometer for testing spherical mirrors [J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 125601.
- [20] Wang D D, Wang F M, Yang Y Y, et al. Modified polarization point diffraction interferometer with extended measurable NA for spherical surface testing[J]. Optik, 2013, 124(22): 5481-5485.
- [21] 高芬, 倪晋平, 李兵, 等. 多步相移中被测件径向相移不均匀引入误差比较及校正[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412002.  
Gao F, Ni J P, Li B, et al. Comparison and correction of errors caused by radial phase-shifting nonuniformity of test optics in multi-step phase-shifting[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412002.
- [22] Yang Z M, Gao Z S, Yuan Q, et al. Radius of curvature measurement based on wavefront difference method by the point diffraction interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 35-40.
- [23] 徐晨. 动态干涉测试技术与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 61-67.  
Xu C. Study of dynamic interferometry technology and application [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009: 61-67.



# Polarization Phase-Shifting Point Diffraction Interferometry for Measuring Wavefront Aberration

Feng Peng<sup>1,2</sup>, Li Zhongliang<sup>1,2\*</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>, Bu Yang<sup>1,2</sup>, Lu Yunjun<sup>1,2</sup>,  
Guo Fudong<sup>1</sup>, Li Sikun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

## Abstract

**Objective** Wavefront aberration is a crucial parameter for describing the properties of an imaging optical system. With the quick development of optical technology, the requirement for aberration quality of imaging systems is increasing. Phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI) is a high-precision instrument for detecting wave aberration in an optical imaging system. A recent study from the Lawrence Berkeley National Laboratory demonstrated that the root means square (RMS) of PS/PDI detection accuracy could be better than 0.1 nm. The PS/PDI classical technique is to change the reference light's phase step by step and record the interferograms to achieve high-precision detection. However, because of its dependence on the external environment, the conventional phase-shifting measurement approach is susceptible to interference from ambient vibration and airflow. Thus, its application in high-precision detection in a complicated environment is challenging. In this paper, we report a polarization phase-shifting point diffraction interferometer that has the benefit of being insensitive to mechanical vibrations and air disturbances. We hope that our study will aid wavefront aberration detection in complicated scenarios with interference, including optical workshops and telephoto imaging systems.

**Methods** A polarization phase-shifting point diffraction interferometer (PPS/DHPDI) was proposed in this study. The polarization synchronous phase-shifting technique was employed in double fiber point diffraction interferometry. A multi-longitudinal mode diode-pumped solid-state laser operating at 532 nm was employed. The coherence length of the laser was several centimeters. It produced two orthogonal linearly polarized lights from two beams. The two beams passed through the imaging system under test, and the object points were imaged on the image plane. The image mask comprised a measurement window and a diffraction pinhole. The measurement light was generated by one beam passing through the window, whereas the reference light was generated by the other beam passing through the diffraction pinhole. After the two beams passed through the mask, they passed through a 1/4 wave plate whose principal axis direction is 45° to the polarization direction of the two beams, and they became left and right circularly polarized light. Subsequently, they passed through a micro polarization array of the same size as a charge-coupled device (CCD) pixel unit, and the CCD collected a single interference pattern. Four phase-shifting interference images with fixed additional phase differences (0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ , and  $3\pi/2$ ) were achieved by sampling a combination of the single interference patterns. Two measurement modes, point diffraction, and a system error measurement mode were designed based on the interferometer. Two beams passed through the window form the point diffraction measurement mode. One beam passed through the window, and the other beam passed through the pinhole form the system error measurement mode. The measurement findings of the point diffraction measurement mode included geometrical path error of the test light and point diffraction light, system error introduced by the wave plate, and detector tilt error. These systematic errors can be calibrated quickly and conveniently using system error mode measurement.

**Results and Discussions** A dual-fiber point diffraction interference system based on a polarization phase-shifting system was built for assessing the wavefront aberration of a 5X demagnification transmission projection objective lens. The measurement findings and experimental error were examined. With high vibration noise at low frequencies, 32 repeatability tests were conducted in a vibration environment. Among the 37 Zernike fitting coefficients, the measurement repeatability (RMS) of  $Z_5$  to  $Z_9$  was less than 0.5 nm. These findings reveal that the system has good vibration resistance and repeatability in a vibration environment.

**Conclusions** We investigated a dual-fiber point diffraction interference approach based on polarization phase-shifting to measure the imaging system's wavefront aberration. Single-mode polarization-maintaining fiber is employed to generate

ideal spherical waves whose polarization states are perpendicular to each other on the object plane. On the image plane, we employ a pinhole to produce the reference light. A  $1/4$  wave plate and a CCD camera with an integrated micro polarization array is employed to form and collect a single image and obtain four phase-shifting interferograms. The interferometer's antivibration performance is enhanced and realized in the high-precision real-time detection of the imaging system's wave aberration. The transmission microprojection objective lens verifies the validity of the detection technology proposed in this study.

**Key words** measurement; point diffraction; polarization phase-shifting; wave aberration detection; interferometry