

抑制零级串扰的光栅横向剪切干涉测量

方超^{1,2}, 向阳^{1*}, 齐克奇^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为降低传统光栅横向剪切干涉仪中双方孔空间滤波器带来的加工和装调难度,设计了一种基于 9 步式零级相位误差标定的光栅横向剪切干涉测量方法,只需采用可变空间滤波器即可抑制零级串扰对相移相位复原的影响。针对数值孔径为 0.125 的投影光刻物镜,完成了参数设计和原理验证系统的搭建。通过剪切相位复原和波前重构,实现了该物镜的波像差检测。结果表明:其波像差小于 20.32 nm。最后对该光栅横向剪切干涉仪进行重复精度实验,其重复精度的方均根值为 0.1303 nm,系统性能良好。

关键词 测量; 光栅; 相位; 干涉; 串扰; 重复精度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0504002

Grating Lateral Shearing Interferometry for Suppressing Zero-Order Crosstalk

Fang Chao^{1,2}, Xiang Yang², Qi Keqi^{1,2}

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to reduce the difficulties in manufacture and assembly of the spatial filter with two square windows in image plane, we propose a grating lateral shearing interferometry based on a nine step phase shifting method, which is used to calibrate the zero-order phase error. The zero-order crosstalk could be eliminated only by a variable space filter. The parameters are designed and the principle verification system is completed for a projection lithography lens with numerical aperture of 0.125. Then the wavefront aberration measurement of this lens is achieved by the restoration of shearing phase and the reconstruction of wavefront. The results show that the wavefront aberration is less than 20.32 nm. The repeatability precision of the grating lateral shearing interferometer is measured. The root-mean-square value of the repeatability precision is 0.1303 nm, which shows the performance of this system is well.

Key words measurement; grating; phase; interference; crosstalk; repeatability precision

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 050.5080

1 引 言

投影光刻物镜是光刻机的核心部件^[1-4]。物镜系统波像差检测设备^[5-6]是客观评价光刻物镜成像质量的重要仪器,同时可以为光刻镜头精密装调和镜片精修提供定量依据。

横向剪切干涉法^[7-9]具有结构简单、能够实现亚纳米级超高精度检测等特点,被认为是最适用于高

精度投影光刻物镜波像差检测的方法,应用前景巨大。Hegeman 等^[10-12]提出一种工作在 193 nm 波长用于相移掩模测量的双光栅干涉仪。Miyakawa 等^[13-15]通过使用光栅横向剪切干涉技术测量投影光刻物镜的系统波像差,其测量精度的方均根值(RMS)可以达到 0.1 nm。

待测投影物镜像平面上的空间滤波器是光栅横向剪切干涉仪的重要组成部分,其主要功能是选择

收稿日期: 2017-11-08; 收到修改稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02202005)

作者简介: 方超(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: ciompfangchao@126.com

* 通信联系人。E-mail: xiangy@sklao.ac.cn

衍射光级次,利用多普勒效应,沿垂直于光栅刻线方向移动光栅实现相移剪切干涉。传统的像面空间滤波器由两个方孔组成,这种滤波器仅允许 ± 1 级的测量光通过,但是由于像面会聚点通常只有几十微米,故对该空间滤波器的制作要求极高。同时为保证零级光的滤除效果,须采用高精度五维调整结构,将像面空间滤波器中心与针孔空间滤波器中心对准。在光栅、空间滤波器和像面探测器组成的狭小空间内实现该调整方案的成本和难度极高。

为了解决上述问题,提出一种光栅横向剪切干涉仪的改进方案,使用可变空间滤波器代替固定式双方孔空间滤波器。可变空间滤波器是成熟的商业器件,其宽度可以调节。虽然采用可变式滤波器会引入零级衍射光,造成零级串扰误差,但是通过设计特殊的相移相位标定算法能够减少这种误差的影响,显著降低像面空间滤波器的调整难度和成本。本文针对一款数值孔径 NA 为 0.125 的投影光刻物镜,完成了光栅横向剪切干涉仪的改进设计。通过设计针对零级串扰误差的相移相位标定算法实现剪切干涉测量,并搭建了原理验证系统,完成测量系统波像差重复性精度实验。

2 光栅横向剪切干涉仪设计

2.1 原理结构

光栅横向剪切干涉仪的基本结构如图 1 所示。其测量原理是:针孔滤波器将照明光源模块发出的光衍射成一个理想球面波。该理想球面波经过待测投影物镜会聚后携带其系统像差信息形成测量光。测量光通过光栅衍射,在像面上分解为不同衍射级次的待测波前。具有级次选择功能的空间滤波器位于待测投影物镜像平面上,将高级次的衍射光作为干扰光滤除。利用多普勒效应,沿垂直于光栅刻线方向移动光栅实现相移剪切干涉。然后,对相移干涉图序列进行剪切相位复原和相位解包裹。对于剪切干涉测量,至少需要在正交的两个方向上进行两次干涉测量,再分别计算出两个正交方向上剪切相位,最后采用波前重构算法将两个剪切相位结果重构为待测投影光刻镜头的系统波像差信息。

2.2 参数设计

针对某款数值孔径为 0.125 的投影光刻物镜,进行光栅横向剪切干涉仪的参数设计工作。简化图 1,得到如图 2 所示的光栅横向剪切干涉仪的光学结构示意图。其中 S 为剪切量; T 为光栅常数;

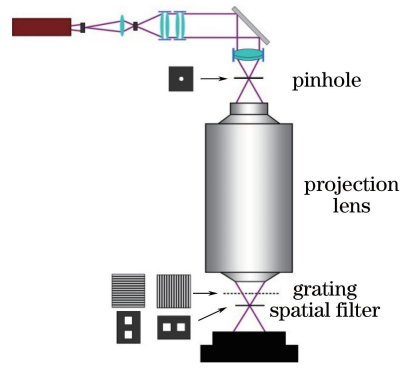


图 1 光栅横向剪切干涉仪的结构图

Fig. 1 Structure of the grating lateral shearing interferometer

D 和 X 分别为单级光斑和探测器的直径; d 为 ± 1 级衍射光的会聚点之间的距离; z_1 为像面与光栅的距离; z_2 为像面与探测器的距离。

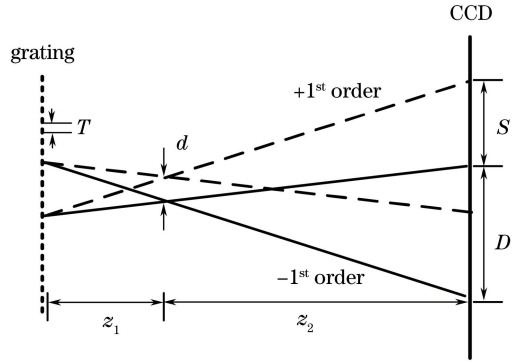


图 2 光栅横向剪切干涉仪的光学结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical structure of the grating lateral shearing interferometer

1) 会聚点间距

假设光栅衍射角为 θ , ± 1 级衍射光在探测器上形成的干涉条纹满足

$$d \sin \theta = m\lambda. \quad (1)$$

若探测器上的干涉条纹数为 N ,则在 NA 值和衍射角 θ 较小的条件下,干涉条纹最大的角度为

$$\theta_{\max} \approx \sin \theta_{\max} = NA = \frac{N\lambda}{2d}. \quad (2)$$

可知, ± 1 级衍射光的会聚点之间的距离为

$$d = \frac{N\lambda}{2NA}. \quad (3)$$

2) 像面-光栅距

各个级次的衍射光满足光栅方程:

$$T \sin \theta = m\lambda, \quad (4)$$

式中: m 为衍射级次; λ 为测试波长。

在衍射角 θ 较小时,有

$$d \approx 2z_1 \sin \theta = \frac{2z_1\lambda}{T}. \quad (5)$$

由(3)式和(5)式可知,像面和光栅之间的距离 z_1 表示为

$$z_1 = \frac{NT}{4NA} \quad (6)$$

3) 像面-探测器距

通常光栅横向剪切干涉仪中剪切量 S 很小,由图 2 可知,探测器边缘的条纹表示为

$$\tan \theta_{\max} = \frac{X}{2z_2} \approx NA \quad (7)$$

因此,像面与探测器的距离 z_2 可表示为

$$z_2 = \frac{X}{2NA} \quad (8)$$

对于可见光干涉检测设备,考虑光源的波长稳定性和能量稳定性,通常选择 He-Ne 激光器作为干

涉光源,其波长 λ 为 $0.6328 \mu\text{m}$ 。考虑探测器的量子效率、空间分辨率等参数,结合实际空间尺寸等需求采用加拿大 DALSA 公司的 1M60 可见光 CCD 相机进行图像采集,其探测器尺寸为 12 mm 。光栅的设计须要考虑到光栅制备的难度以及相移器量程的范围,通常选用 $T=100 \mu\text{m}$ 。而在相移干涉测量中干涉条纹的数量与测量精度成反比,条纹数越少精度越高,在此采用 10 个条纹。

将上述数据代入到(3)、(6)、(8)式中,可以得到会聚点间距 d ,像面-光栅距 z_1 和像面-探测器距 z_2 。表 1 列出了所设计的干涉横向剪切干涉仪初始系统的主要参数。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

Parameter	Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	Numerical aperture NA	Size of detector X / mm	Grating constant $T / \mu\text{m}$	Number of interference fringes N	Distance between image plane and grating z_1 / mm	Distance between convergence points $d / \mu\text{m}$	Distance between image plane and detector z_2 / mm
Value	0.6328	0.125	12	100	10	2	25.31	48

2.3 空间滤波器设计

传统的光栅横向剪切干涉仪的空间滤波器一般采用双方孔设计,像面空间滤波器使用的基底材料为融石英,金属为铬,其结构如图 3 所示,一般需要特殊定制。从表 2 可知,像面会聚点的距离为 $25.31 \mu\text{m}$,在这么小的空间内准确制作出两个方孔来滤除零级衍射光的干扰,加工难度很高。同时从表 1 中可以看出,像面-光栅距离和像面探测器的距离分别是 2 mm 和 48 mm ,在狭小的空间内布置一个高精度的五维调整结构,实现像面空间滤波器中心与针孔空间滤波器中心对准,其调整成本和调整难度也很大。

商用可变式空间滤波器的宽度可以调节,用其

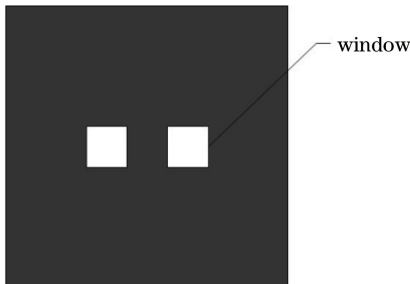


图 3 双方孔空间滤波器结构示意图

Fig. 3 Structure of spatial filter with two square holes

代替定制的固定式双方孔空间滤波器能够显著降低像面空间滤波器的调整成本和难度。可变式滤波器如图 4 所示。但采用可变式滤波器会引入零级衍射光,造成零级串扰误差。为了解决零级串扰误差的影响,需要将零级串扰误差作为主要误差源,设计特殊的相移相位复原算法来抑制这种误差的影响。

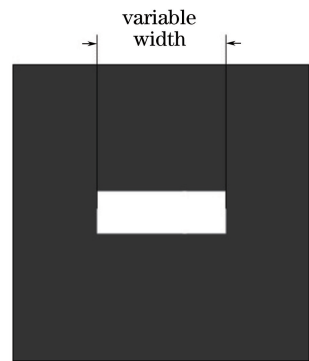


图 4 可变式空间滤波器

Fig. 4 Variable spatial filter

3 标定算法

光栅横向剪切干涉中,两束测量光的相移量 ϕ_j 可以写为

$$\phi_j = j4\pi x / T \quad (9)$$

式中: x 为光栅的位移量。则第 j 步相移干涉图强度 I_j 表示为

$$I_j = Q + V_1 \cos(\theta_1 + \phi_j) + V_2 \cos(\theta_2 + \phi_j/2) + V_3 \cos(\theta_3 + \phi_j/2), \quad (10)$$

式中: θ_1 为所需复原的相位; θ_2 和 θ_3 分别为零级光串扰与 ± 1 级光的剪切相位; Q 为背景光强; V_1 为待测波前的光强调制度; V_2 和 V_3 为零级串扰光与 ± 1 级光干涉的光强调制度。

在测量过程中,对于每一步任意相移量 ϕ_j ,每一帧的零级串扰误差的光强分布记为 I_{c_j} ,则有

$$I_{c_j} = V_2 \cos(\theta_2 + \phi_j/2) + V_3 \cos(\theta_3 + \phi_j/2). \quad (11)$$

令

$$\begin{cases} K_1 = V_2 \sin \theta_2 + V_3 \sin \theta_3, \\ K_2 = V_2 \cos \theta_2 + V_3 \cos \theta_3. \end{cases} \quad (12)$$

则(11)式可以改写为

$$I_{c_j} = K_2 \cos(\phi_j/2) - K_1 \sin(\phi_j/2), \quad (13)$$

式中: K_1 、 K_2 为标定常量,其值通过标定系统的零级串扰来确定,进而可以消除零级串扰光对相位复原的影响。

零级误差的标定采用 9 步算法来实现。设每一步的相移量为 $\pi/2$,则相移量 ϕ_j 表示为

$$\phi_j = j\pi/2, \quad (14)$$

式中: $j = -4, -3, \dots, 0, \dots, 3, 4$ 。由此可知,

$$\begin{cases} K_1 = V_2 \sin \theta_2 + V_3 \sin \theta_3 = \\ \quad -\frac{\sqrt{2}}{4}(I_1 - I_{-1}) - \frac{\sqrt{2}}{4}(I_3 - I_{-3}), \\ K_2 = V_2 \cos \theta_2 + V_3 \cos \theta_3 = -\frac{1}{4}(I_4 + I_{-4}) - 2I_0. \end{cases} \quad (15)$$

在标定得到 K_1 、 K_2 后,根据(11)式可以计算得到每一帧干涉图中相应相移量的零级串扰误差 I_{c_j} 。因此,每一帧用于测量的 ± 1 级光的干涉图强度可以表示为

$$I_{vj} = I_j - I_{c_j} = Q + V_1 \cos(\theta_1 + \phi_j). \quad (16)$$

该算法消除了零级串扰误差对横向剪切干涉测量的影响。在后续的相位复原中可以采用经典的相位复原算法^[16](如三步相移法、四步相移算法、Hariharan 相移法)实现剪切相位复原。

4 实验与结果

4.1 原理验证

根据图 1 所示的横向剪切干涉仪原理结构以及第 2 节的参数设计结果,搭建了基于空间可调滤波

器的横向剪切干涉仪的原理实验系统。通过高精度的装调,实现光源模块、针孔滤波器模块、剪切相移模块、像面空间滤波器模块和图像采集模块等的系统集成。

图 5 给出了原理验证实验的流程。1)控制移相器和探测器采集到 9 帧相移干涉图序列;2)采用 9 步标定算法计算标定常量 K_1 和 K_2 ,消除零级串扰光对剪切干涉的影响;3)采用相移相位复原算法获取剪切干涉相位信息,这里采用 Hariharan 相移法;4)采用相位解包裹算法对上述剪切相位进行去包裹化;5)采用 Rimmer 法将去包裹化的剪切相位重构为待测镜头的波前相位信息;6)将波前相位信息进行泽尼克函数拟合,去除离焦和倾斜项;7)将上述波前相关信息进行图像化输出。

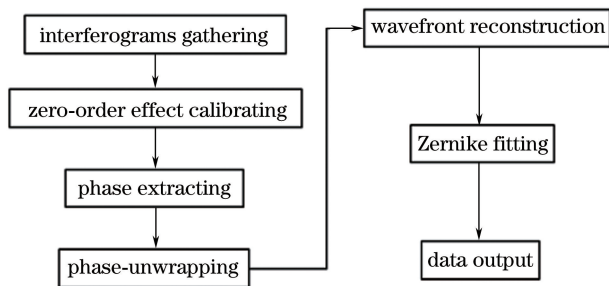


图 5 原理验证实验流程图

Fig. 5 Flow diagram of the principle verification test

针对某款数值孔径为 0.125 的投影光刻物镜,根据零级误差标定算法,按(14)式和(9)式确定相移量和光栅位移量,沿 x 和 y 两个相互垂直的方向分别采集 9 帧相移干涉图序列,其干涉图分别如图 6、7 所示。采用(15)式进行零级误差标定常量 K_1 和 K_2 。

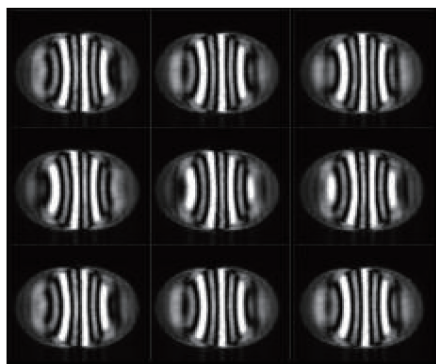


图 6 x 方向剪切干涉相移干涉图

Fig. 6 Shearing phase shift interferogram along the x direction

移除零级串扰误差后,采用 Hariharan 相移法获得剪切相位,再通过相位解包裹和波前重构,得到如图 8 所示的待测投影光刻物镜波前的相位信息。

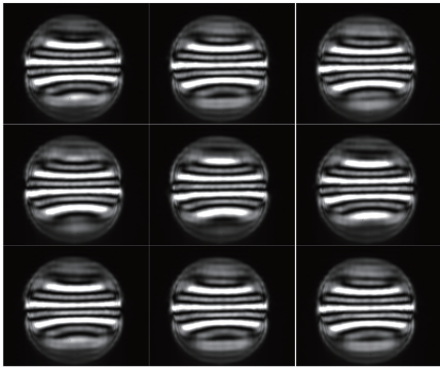


图 7 y 方向剪切相移干涉图

Fig. 7 Shearing phase shift interferogram along the y direction

该投影光刻物镜的波像差小于 0.0321λ , 即波像差优于 20.32 nm。

4.2 重复性精度

为验证该横向剪切干涉仪的整体性能, 开展重复性验证实验。对同一被检光刻物镜进行 10 组重

表 2 10 组波像差测试结果

Table 2 Results of ten wavefront aberration tests

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement result / ($10^{-2}\lambda$)	3.1595	3.1708	3.1659	3.1610	3.1842	3.1491	3.1862	3.2072	3.2099	3.1632
Measurement result / nm	19.993	20.064	20.033	20.002	20.149	19.927	20.162	20.295	20.312	20.016

4.3 比对实验

为了验证标定算法的有效性, 在相同条件下对同一光刻物镜开展比对实验。不采用标定算法, 直接使用 Hariharan 算法对干涉图相位复原, 进行 10 组重复测量实验, 每组测量 10 次。每组 10 次测量值的平均

表 3 10 组对比实验波像差测试结果

Table 3 Results of ten wavefront aberration contrast tests

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement result / ($10^{-2}\lambda$)	3.3267	3.3383	3.3209	3.2823	3.3523	3.3208	3.3624	3.3978	3.4085	3.2551
Measurement result / nm	21.051	21.124	21.014	20.770	20.770	21.213	21.014	21.277	21.568	20.598

5 结 论

为降低像面空间滤波器的调整难度和成本, 采用空间可变滤波器对光栅横向剪切干涉仪进行改进设计, 通过设计零级串扰的 9 步标定算法抑制零级误差的影响。针对一款数值孔径为 0.125 的物镜进行参数设计和原理验证平台的搭建, 并通过横向剪切干涉测量, 实现了该物镜的波像差检测, 其波像差小于 20.32 nm。通过重复精度实验, 验证了该改进型光栅横向剪切干涉仪的重复精度的 RMS 为 0.1303 nm, 表明系统性能良好。

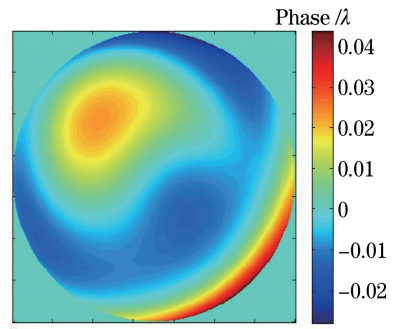


图 8 待测波前相位图

Fig. 8 Phase of the wavefront

复测量实验, 每组测量 10 次。每组 10 次测量值的平均值作为一次测试结果。测量结果如表 2 所示, 可以看出 10 组测量的测试结果十分接近, 波像差测量值散落在 19.927 nm 到 20.312 nm 之间, 测试差异不超过 1.9%, 重复性精度的 RMS 为 0.1303 nm。因此, 该横向剪切干涉仪的重复精度较高, 系统性能良好。

值作为一次测试结果。比对实验测量结果如表 3 所示。与 4.2 节结果对比, 对比实验的重复性精度的 RMS 为 0.2984 nm, 标定算法的重复性精度的 RMS 仅为 0.1303 nm。对比结果表明, 标定算法可以有效地抑制零级串扰误差对干涉仪整体性能的影响。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Wang X, Ma M, *et al.* Aberration measurement of projection optics in lithographic tools by use of an alternating phase-shifting mask [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(2): 281-287.
- [2] Cai Y M, Wang X Z, Bu Y, *et al.* Optical design of Fourier transform lens for measurement of illumination pupil of lithography tools [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0416001.
蔡燕民, 王向朝, 步扬, 等. 光刻机照明光瞳测量用傅里叶变换物镜光学设计 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0416001.

- [3] Yao C C, Gong Y. Research on temperature distribution of deep ultraviolet lithographic projection objective[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0516001.
姚长呈, 巩岩. 深紫外光刻投影物镜温度特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0516001.
- [4] Xu M F, Pang W B, Xu X R, *et al.* Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 740-746.
徐明飞, 庞武斌, 徐象如, 等. 高数值孔径投影光刻物镜的光学设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 740-746.
- [5] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, *et al.* High-order aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0412003.
诸波尔, 王向朝, 李思坤, 等. 超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0412003.
- [6] Fang W, Tang F, Wang X Z, *et al.* Measurement of wavefront aberration of extreme ultraviolet lithographic projection lens based on Ptychography [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1012002.
方伟, 唐锋, 王向朝, 等. 基于 Ptychography 的极紫外光刻投影物镜波像差检测技术 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1012002.
- [7] Fang C, Xiang Y, Qi K Q, *et al.* An 11-frame phase shifting algorithm in lateral shearing interferometry [J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28325-28333.
- [8] Dai F, Li J, Wang X, *et al.* Exact two-dimensional zonal wavefront reconstruction with high spatial resolution in lateral shearing interferometry [J]. Optics Communications, 2016, 367: 264-273.
- [9] Hasegawa M, Ouchi C, Hasegawa T, *et al.* Recent progress of EUV wave-front metrology in EUVA [C]. SPIE, 2004, 5533: 27-36.
- [10] Hegeman P, Christmann X, Visser M, *et al.* Experimental study of a shearing interferometer concept for at-wavelength characterization of extreme-ultraviolet optics [J]. Applied Optics, 2001, 40(25): 4526-4533.
- [11] Futterer G, Lano M, Lindelein N, *et al.* Lateral shearing interferometer for phase-shift mask measurement at 193 nm [C]. SPIE, 2002, 4691: 541-551.
- [12] Futterer G, Schwider J. Uncertainty analysis for phase measurement on PSM with a 193 nm common-path shearing interferometer [C]. SPIE, 2005, 5858: 321-333.
- [13] Miyakawa R, Naulleau P. Extending shearing interferometry to high-NA for EUV optical testing [C]. SPIE, 2015, 9422: 94221J.
- [14] Miyakawa R, Naulleau P. Lateral shearing interferometry for high-resolution EUV optical testing [C]. SPIE, 2011, 7969: 796939.
- [15] Zhu Y, Sugisaki K, Ouchi C, *et al.* Lateral shearing interferometer for EUVL: theoretical analysis and experiment [C]. SPIE, 2004, 5374: 824-832.
- [16] Hariharan P. Digital phase-stepping interferometry: effects of multiply reflected beams [J]. Applied Optics, 1987, 26(13): 2506-2507.