

# 光学学报

## 基于空间像主成分分析的光刻投影物镜波像差检测技术

雷威<sup>1,2</sup>, 李思坤<sup>1,2,3\*</sup>, 潘东超<sup>1,2</sup>, 江一鹏<sup>1,2</sup>, 佟桐<sup>1,3</sup>, 王向朝<sup>1,4\*\*</sup>, 步扬<sup>1</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 100044;

<sup>3</sup>上海大学微电子学院, 上海 200444;

<sup>4</sup>浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 基于空间像主成分分析的波像差检测技术是一种原位光刻机投影物镜波像差检测技术。本文对该技术的检测模型和工程技术进行了系统研究。分析了照明条件、检测标记、空间像扫描范围等影响因素对检测精度的影响。研究了空间像传感器模型,并通过仿真和实验验证了传感器模型的有效性。研究了空间像定心误差对检测精度的影响,对比了不同定心方法下波像差检测模型的性能表现。分析了不同降噪方法的空间像降噪效果,并基于空间像噪声模型,提出了一种新的空间像降噪方法。仿真与实验结果表明,在各种影响因素中,照明部分相干因子和 $F$ 方向采样范围对像差检测精度影响较大。定心方面,在 $X$ 方向上六项模型定心精度更高, $F$ 方向上三项模型与六项模型各有优劣。平均值降噪法可以有效滤除空间像噪声,提高像差求解精度。像差漂移量仿真测试结果表明,该技术可用于校正光刻机的短期像差漂移。本文对该技术还给出了工程应用建议。

**关键词** 仪器;测量与计量;光刻;波像差检测;空间像;传感器模型;定心;降噪

中图分类号 TN305.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230464

### 1 引言

光刻是极大规模集成电路制造的关键技术<sup>[1]</sup>。光刻投影物镜的成像质量直接影响集成电路的特征尺寸<sup>[2-3]</sup>。投影物镜的波像差会造成光刻成像质量下降,影响光刻分辨率<sup>[4-5]</sup>。因此,对光刻投影物镜波像差进行检测对提升光刻成像质量具有重要意义。

多年来,国内外的不同机构和组织都开展了大量关于波像差检测方面的研究<sup>[5-17]</sup>。基于空间像的波像差检测技术是一种常用的光刻机投影物镜波像差检测技术。荷兰 ASML 公司开发的 TAMIS 技术是一种基于空间像的波像差检测技术<sup>[9]</sup>。TAMIS 技术利用检测标记空间像的成像位置偏移量和最佳焦面偏移量提取波像差,需要多种照明模式,且只能对一些低阶像差进行测量,具有一定的局限性。

基于空间像主成分分析的光刻机投影物镜波像差检测 (AMAI-PCA) 技术是另一种基于空间像的波像差检测技术,具有过程快速、原位测量的特点<sup>[15-16]</sup>。该技术采用不同方向的检测标记,利用光刻仿真软件和数学分析方法建立检测模型,从空间像中提取投影物

镜波像差。然而,在实际的工程应用中,光刻机的照明条件、检测标记宽度、投影物镜的数值孔径、空间像的扫描范围等都对波像差检测的性能有影响。除此之外,探测器测得的空间像与实际光强分布不一致<sup>[16]</sup>,干涉仪的定位误差会导致空间像的偏心问题<sup>[18]</sup>,工件台的抖动会导致空间像产生噪声<sup>[19]</sup>。这些因素都会使得波像差检测的精度受到影响,从而影响该技术的实际应用效果。

本文在理论分析的基础上,利用美国新思科技公司的商用光刻仿真软件 Santaurus lithography (Synopsys) 进行仿真,研究了不同因素对波像差检测性能的影响。结合实际的传感器结构,研究了传感器参数对波像差检测精度的影响,通过空间像重构实验验证了传感器模型的有效性。分析了定心误差对波像差检测精度的影响,并对两种空间像定心方法进行了对比,分析了不同定心方法的适用情况,通过空间像重构实验和双传感器实验验证了定心方法的有效性。研究了不同降噪方法对空间像的降噪效果,并针对空间像独特的噪声类型,提出了平均值降噪法,给出了工程应用建议。通过像差漂移量仿真测试证明了该技术可

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-02-10; 录用日期: 2023-02-23; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (U22A2070)

通信作者: \*lisikun@siom.ac.cn; \*\*wxz26267@siom.ac.cn

用于校正光刻机短期的像差漂移。

## 2 理论分析

### 2.1 AMAI-PCA 技术介绍

AMAI-PCA 技术提取波像差的理论依据来自于

光刻成像原理。光刻成像的基本过程包括照明系统发出的准单色光照射掩模,经过掩模调制的衍射光进入投影物镜,最终通过投影物镜成像在像面,如图 1 所示。

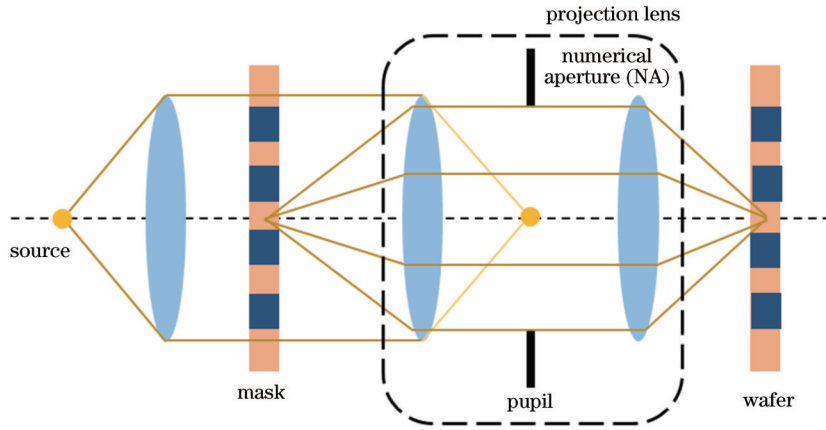


图 1 光刻投影系统光学结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical structure of a lithographic projection system

通过对该成像过程的公式推导可以得到像面的光强表达式为

$$I(x, y, z) = I_0(x, y, z) + I_1(x, y, z), \quad (1)$$

式中:  $I$  表示像空间的光强;  $x, y$  是像空间的坐标;  $z$  是离焦量;  $I_0$  为不受波像差影响的直流量;  $I_1$  为与波像差呈线性关系的分量,且光强分布直接反映投影物镜的波像差信息,从空间像可以提取出波像差<sup>[15-16]</sup>。

AMAI-PCA 技术可以分为建模和像差求解两个过程。在建模过程,针对需要求解的像差,利用统计抽样方式得到像差组合,并使用仿真软件生成空间像集合。对空间像集合进行主成分分析,将其分解为主成

分矩阵( $P$ )和主成分系数矩阵( $V$ ):

$$I = P \cdot V + I_{er}, \quad (2)$$

式中,  $I_{er}$  为主成分拟合残差。对主成分系数和 Zernike 系数( $Z$ )进行回归分析,即可得到回归矩阵  $R$  为

$$V = R \cdot Z + E_R, \quad (3)$$

式中,  $E_R$  为回归拟合残差。回归矩阵包含主成分系数和 Zernike 系数的线性关系。

在像差求解过程中,首先对待测空间像使用主成分矩阵拟合,得到待测像的主成分系数,再使用回归矩阵进行拟合,得到待测像的 Zernike 系数,即波像差。AMAI-PCA 技术流程如图 2 所示。

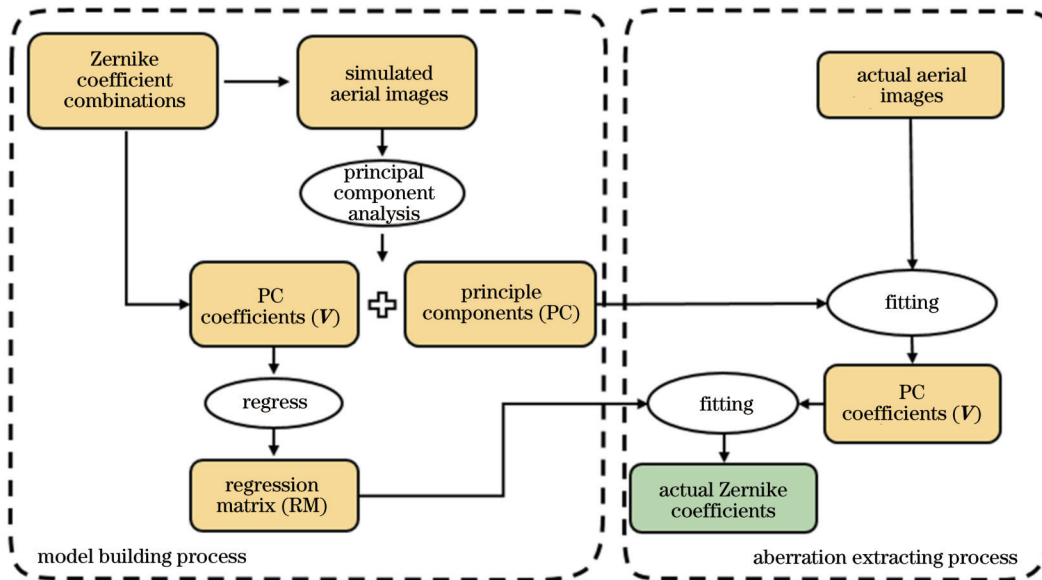


图 2 AMAI-PCA 技术流程

Fig. 2 Flow chart of AMAI-PCA technology

AMAI-PCA 技术从检测标记的空间像中提取波像差,理论上可以实现 33 项甚至更多项 Zernike 像差的检测。为了能够精确检测更多项 Zernike 系数,需要使用不同角度的掩模标记。掩模标记角度的改变实质上是对波像差进行光瞳面离散采样的过程,随着掩模标记角度不同,−1 级和 +1 级衍射光线也会相应地投射于光瞳的不同方位。使用两个方向的掩模标记可以检测 7 项波像差<sup>[15]</sup>。使用 6 个方向掩模标记可以检测 33 项波像差,检测精度优于 0.5 nm<sup>[20-21]</sup>。使用 8 个方向掩模标记可以检测 60 项波像差,检测精度优于

0.2 nm<sup>[22]</sup>。通过优化照明条件、建立高阶检测模型等方法可以进一步提升像差检测精度<sup>[21]</sup>。

### 2.2 空间像采集方法

使用集成在工件台上的空间像传感器(AIS)采集空间像。空间像传感器是一种狭缝扫描类型的光电探测器,能够捕捉空间中某一点的光强,即空间像的一个像素。工件台带动空间像传感器沿着图 3(a)所示的路径扫描,就可以获得一副二维的空间像,如图 3(b)所示。水平坐标指的是 X-Y 平面内的方向,焦向坐标指的是 Z 方向。

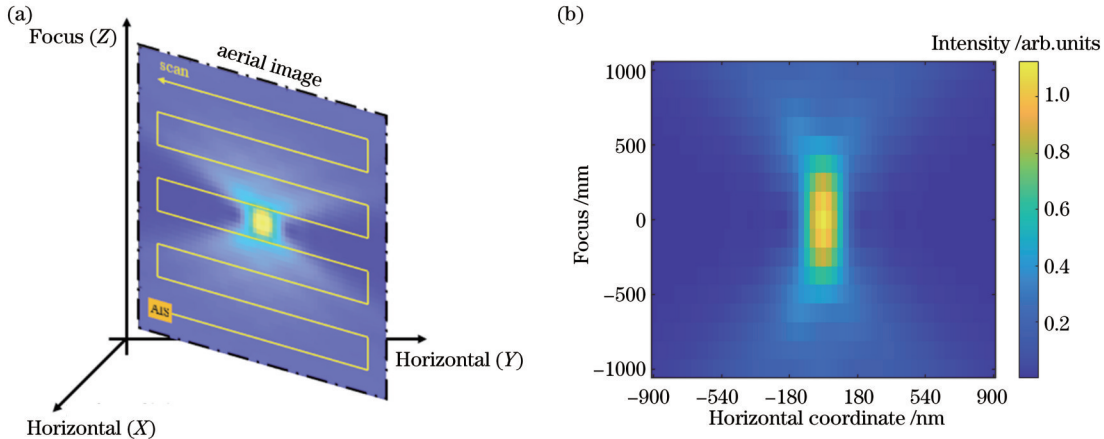


图 3 空间像及其获取示意图。(a)空间像扫描方法;(b)仿真空像

Fig. 3 Diagram of aerial image and its acquisition. (a) Scanning method of aerial image; (b) simulated aerial image

AMAI-PCA 技术从空间像的光强信息中提取波像差。因此,空间像的光强分布对波像差提取的结果有重要影响。除了像差以外,光刻机的照明条件、检测标记、空间像扫描范围等因素都会影响空间像的光强分布,导致像差求解结果发生变化,影响 AMAI-PCA 技术的检测精度。因此,有必要研究光刻过程中空间像强度分布的影响因素对波像差求解的影响。

### 2.3 传感器模型

由于空间像传感器对光强的响应取决于传感器上入射光的角度,因此硅片面实际的空间像光强与传感器测得的光强并不一致。为了能够从传感器测得的空间像数据中解出 Zernike 系数,就需要建立传感器模型来描述这种转换关系<sup>[16]</sup>。空间像传感器的结构如图 4 所示。

空间像传感器主要由三部分组成:光栅、熔石英和光电探测器。入射光在到达光电探测器之前,首先要经过由不透光的铬层构成的光栅。图中的黑色部分为铬层,厚度为  $D$ ,该厚度也对光的传播产生影响。光栅的透光区域尺寸为  $W$ ,该宽度与光波长基本相当。

传感器模型包含两部分,一部分是硅片面上的矩形透过函数,另一部分可以表示为传感器对光瞳上不同入射角的光线的响应函数,即空间像角度响应函数。透过率矩形函数与空间像之间的关系由下面的卷积关系表示:

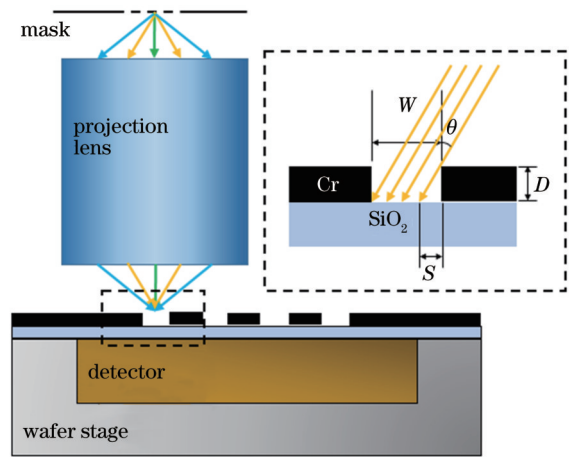


图 4 传感器结构示意图

Fig. 4 Diagram of sensor construction

$$I(x, z) = I_0(x, z) * \text{rect}\left(\frac{x}{W}\right), \quad (4)$$

式中: $*$ 表示卷积运算; $\text{rect}$ 表示矩形函数。空间像传感器的角度响应采用角谱理论可以推导得到,表示为

$$s(\theta) = \frac{W - S}{W} = 1 - \frac{D}{W} \cdot \frac{f}{\sqrt{1 - f^2}}, \quad |f| \leq NA, \quad (5)$$

式中, $f = \sin \theta$ 是入射光的空间频率。考虑到水平和垂直两个方向的标记,传感器测量的总的光强<sup>[16]</sup>可表示为

$$I_{\text{total}} = \iint_{u,v} s(u,v) \cdot h(u,v) \cdot dudv, \quad (6)$$

式中： $u$ 、 $v$  分别表示光线在  $x$ 、 $y$  两个方向衍射角的正弦； $s$ 、 $h$  表示两个方向标记的角度响应。

#### 2.4 空间像偏心问题

在使用软件仿真时,空间像的物理坐标是已知的,获得的空间像是名义坐标区域内的空间像。然而,在实测空间像时,总是先根据光强最大值来捕获空间像。由于像差的存在,光强最大值的位置并不是空间像名义区域的中心位置。因此,空间像的实际测量区域总是与名义区域产生一定的位置偏移,即空间像的偏心。空间像偏心示意图如图 5 所示。

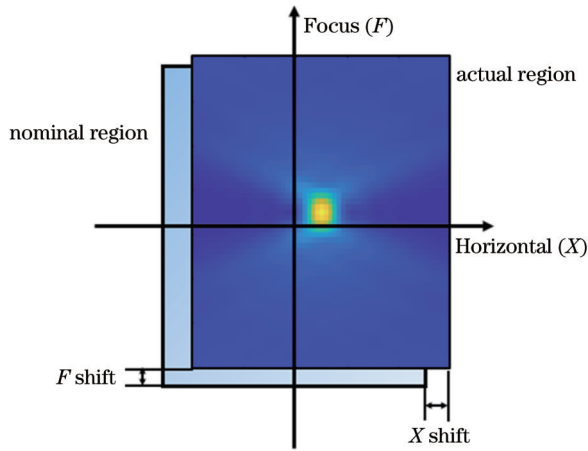


图 5 空间像偏心示意图

Fig. 5 Diagram of aerial image offset

空间像的偏心会给像差求解带来一定的误差。因此,分析空间像偏心对求解精度的影响,以及开发合适的定心方法进行补偿,对于完善像差检测模型具有重要意义。

#### 2.5 空间像噪声来源及模型

逐个像素扫描完成空间像采集。在实际采集过程中,由于工件台的抖动,单个像素点的实际探测位置会与名义位置存在一定的偏差。这个偏差等效于空间像的每一个像素点引入了一个高斯噪声,并且噪声的标准差与该点光强及其梯度有关。根据空间像噪声的特点,每个像素的噪声方差不同,具有异方差性<sup>[23]</sup>。

根据空间像采集误差的特点,假定噪声模型为

$$I' = I + I_{\text{noise}}, \quad (7)$$

式中： $I'$  为含有噪声的空间像光强分布； $I_{\text{noise}}$  为添加的噪声,该噪声符合  $\left[0, N_{\text{std}} \left( I, \frac{I}{H}, \frac{I}{F} \right) \right]$  高斯噪声的正态

分布,其标准差与像素位置的光强以及光强梯度有关,噪声的期望为零,  $N_{\text{std}}$  为噪声的标准差,表示为

$$N_{\text{std}} \left( I, \frac{I}{H}, \frac{I}{F} \right) = aaI + bb \left| \frac{I}{H} \right| + cc \left| \frac{I}{F} \right| + \epsilon, \quad (8)$$

式中： $I$  是不含噪声的理想空间像的光强； $aa$ 、 $bb$  和  $cc$

分别是  $I$  的系数、 $I$  对  $H$  方向偏导的系数和  $I$  对  $F$  方向偏导的系数,统称为噪声标准差的拟合系数； $|\cdot|$  算符是对其内各元素取正后得到的新矩阵； $\epsilon$  是模型残差,通过测量实际光刻机中的空间像噪声,可以准确地对这些系数进行标定。

### 3 仿真与分析

参照参考文献[16]设置仿真条件,具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation settings

Simulation parameter	Numerical value
Wavelength $\lambda$ /nm	248
Partial coherence $\sigma$	0.65
NA	0.75
CD /nm	250
Zernike coefficients range $m\lambda$	-20~20
Length of aerial image along X (Y) /nm	1800
Length of aerial image along Z /nm	7000
Sampling number along X (Y)	61
Sampling number along Z	57

接下来对照明条件、检测标记宽度、数值孔径及空间像采样范围四个影响因素进行研究,分析其对波像差检测精度的影响。采用传统照明模式,分析照明相干因子对波像差检测精度的影响,照明相干因子变化范围为 0.35~0.95。采用一维孤立空作为检测标记,宽度变化范围为 200~300 nm。设置数值孔径的变化范围为 0.55~0.90。对于空间像采样长度,可分为  $X$  方向采样长度和  $F$  方向采样长度两个维度,其中  $X$  方向采样长度变化范围为 900~1800 nm,  $F$  方向采样长度变化范围为 3000~7000 nm。具体变量设置如表 2 所示,在研究某个变量的影响时,其他变量的设置参照表 1。

表 2 变量设置

Table 2 Variable settings

Variable	Range of numerical value
Partial coherence $\sigma$	0.35~0.95
NA	0.55~0.90
CD /nm	200~300
Length of aerial image along X (Y) /nm	900~1800
Length of aerial image along Z /nm	3000~7000

对空间像传感器模型、定心方法和降噪方法进行分析所采用的仿真参数同表 1。使用 Santaurus lithography 商用光刻仿真软件进行空间像仿真。检测精度使用 30 幅含有不同随机像差的待测空间像求解误差的 ( $|\text{平均值}| + 3 \times \text{标准差}$ ) 表示。

AMAI-PCA 技术理论上可以实现 33 项甚至更多项 Zernike 像差的检测<sup>[20]</sup>。然而,由于现有实验条件只有 0°和 90°两种掩模标记,只能对低阶波像差进行检测。其中,具有代表性的是  $Z_5$  像散、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$  彗差以及  $Z_9$ 、 $Z_{16}$  球差。因此,本文基于七项波像差的检测开展研究。

### 3.1 不同影响因素对波像差检测精度的影响

照明部分相干因子(Partial coherence)、检测标记宽度(CD)、数值孔径(NA)、空间像采样长度对波像差检测精度的影响如图 6 所示。图 6(a)是照明相干因子对波像差检测精度的影响,随着照明相干因子增加,多

数像差的检测精度表现出先提高后降低的趋势。图 6(b)是 CD 对波像差检测精度的影响,随着 CD 增加,七项像差的检测精度全部表现出缓慢降低的趋势。图 6(c)是 NA 对波像差检测精度的影响,随着 NA 增大,多数像差的检测精度逐渐提高。图 6(d)是 X 方向采样长度对波像差检测精度的影响,随着 X 方向采样长度的增加,除  $Z_5$  项外,其余像差的检测精度逐渐提高。图 6(e)是 F 方向采样长度对波像差检测精度的影响,随着 F 方向采样长度的增加,几乎所有像差的检测精度都逐渐提高。

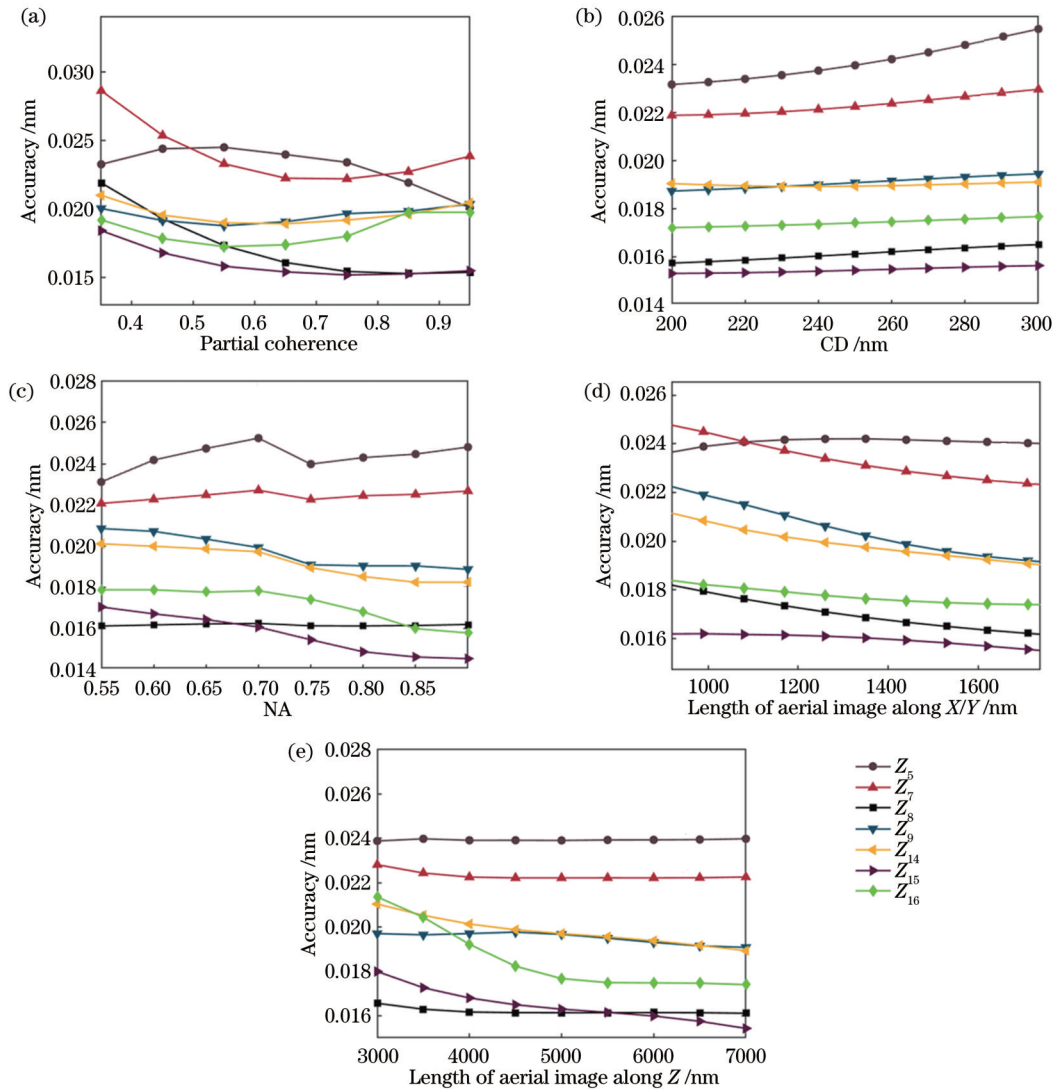


图 6 不同影响因素对波像差检测精度的影响。(a)照明部分相干因子;(b)检测标记宽度;(c)数值孔径;(d) X/Y 方向采样长度;(e) Z 方向采样长度  
 Fig. 6 Influence of different factors on wavefront aberration measurement accuracy. (a) Partial coherence; (b) CD; (c) NA; (d) length of sampling length along X/Y; (e) length of sampling length along Z

从以上分析可以看出,对波像差检测精度影响较大的主要是照明部分相干因子和 F 方向的空间像采样长度。其中,照明部分相干因子在 0.5~0.8 范围内较好,F 方向空间像采样长度在 5000 nm 以上较好。

### 3.2 传感器模型分析

为了评估传感器模型参数的影响,通过仿真对比了传感器不同宽度情况下的检测精度,结果如图 7 所示。

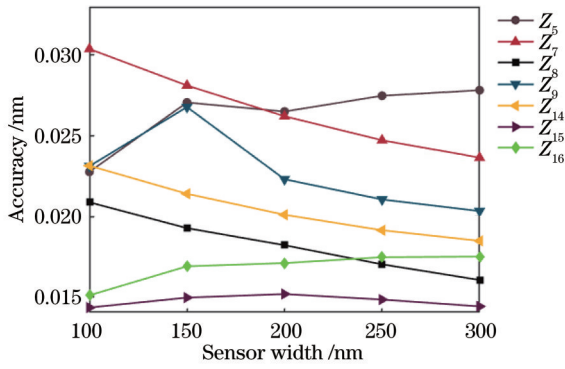


图 7 传感器不同宽度的求解结果

Fig. 7 Solving results of sensor under different widths

由图 7 可以看出,传感器标记在像方的线宽会影响求解结果,不同类型的像差受传感器宽度的影响也不同。随着传感器宽度增加, $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{14}$  三项像差的求解精度逐渐提高,

$Z_5$  和  $Z_{16}$  两项像差的求解精度有所下降, $Z_9$  和  $Z_{15}$  两项像差的求解精度先降低后提高。从仿真结果来看,为了平衡各项像差的求解精度,当传感器宽度为 200 nm 时结果最好,七项像差的求解精度优于 0.027 nm。

由于实际投影物镜的波像差真值是未知的,无法直接对波像差求解结果进行比较。为了间接评估传感器模型对 AMAI-PCA 求解的影响,开展了空间像重构一致性实验。利用实验中实测的空间像,代入 AMAI-PCA 程序求解,将求解得到的像差值输入光刻仿真软件重新生成空间像,即重构空间像。通过观察重构空间像与实测空间像的一致性,可以评价 AMAI-PCA 求解结果及传感器模型的有效性。

未使用传感器模型的空间像重构结果如图 8 所示,其中残差表示重构空间像与实测空间像的差值。从图中可以看出,重构残差的强度分布为  $-0.30 \sim 0.12$ ,重构空间像与实测空间像存在较大区别。

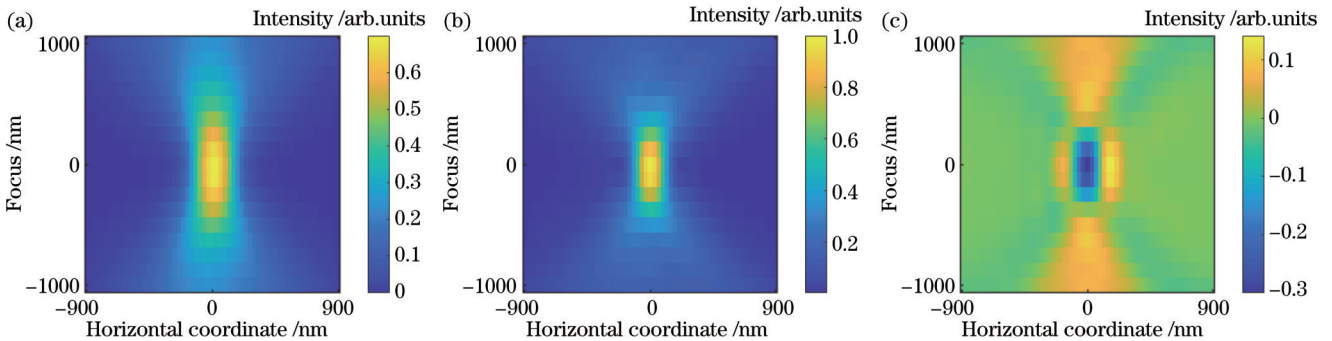


图 8 无传感器模型的空间像重构实验结果。(a) 实测空间像; (b) 重构空间像; (c) 空间像残差

Fig. 8 Experimental results of aerial image reconstruction without sensor. (a) Measured aerial image; (b) reconstructed aerial image; (c) aerial image residual

使用传感器模型的空间像重构结果如图 9 所示。从图中可以看出,重构空间像相比于未使用传感器模型时发生了明显的展宽,这与传感器模型的理论分析

相符合。使用传感器模型后重构空间像也与实测空间像更加接近,重构残差从  $-0.30 \sim 0.12$  下降到  $-0.056 \sim 0.034$ ,能够更好地拟合实验数据。

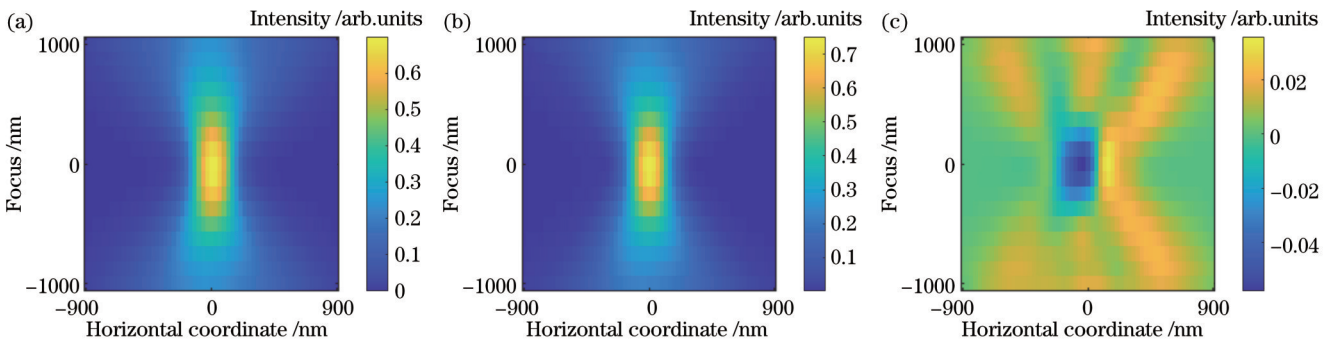


图 9 有传感器模型的空间像重构实验结果。(a) 实测空间像; (b) 重构空间像; (c) 空间像残差

Fig. 9 Experimental results of aerial image reconstruction with sensor. (a) Measured aerial image; (b) reconstructed aerial image; (c) aerial image residual

仿真分析与实验结果都表明,使用适当的传感器模型,波像差的求解精度会有所提升。加入了传感器模型后的空间像能够更好地拟合实验数据,提高像差

求解的准确性。

### 3.3 空间像定心方法分析

首先对空间像定心误差的影响进行仿真分析。由

于空间像定心可能在  $X$  和  $F$  两个维度上产生误差,所以分别对两个方向上定心误差的影响进行仿真分析。

$X$  方向定心误差对像差求解精度的影响如图 10(a) 所示。从结果可以看出,  $Z_7$  与  $Z_8$  基本重合,  $Z_{14}$  与  $Z_{15}$  基本重合, 这四项像差同属于彗差, 求解精度变化趋势相似, 都呈现“V 字”形, 对  $X$  方向的偏移量很敏感。这与彗差的性质有关, 彗差会导致空间像发生水平方向的偏移, 并且随着离焦量的增加, 偏移量也变大。 $X$  方向的定心误差会使得空间像发生水平方向的偏移, 这种偏移与彗差的影响接近, 导致了彗差求解精度的下降。 $Z_5$  项求解精度几乎不会受到  $X$  方向定心误差的影响, 这是由于  $Z_5$  只会导致空间像发生沿焦向的平移, 而不影响空间像在水平方向的强度分布。因此  $X$  方向定心误差导致的水平方向偏移不会与  $Z_5$  项的影响重合, 从而不会影响  $Z_5$  项的求解。 $Z_9$  和  $Z_{16}$  同属于

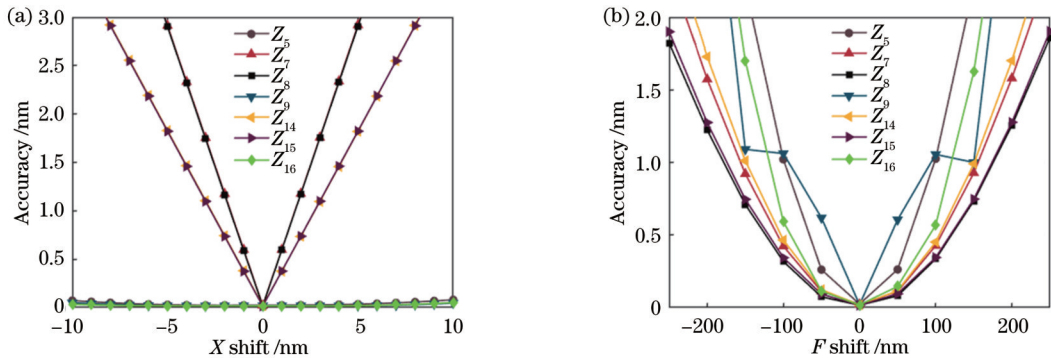


图 10 定心误差对波像差检测精度的影响。(a)  $X$  方向; (b)  $F$  方向

Fig. 10 Influence of centering error on wavefront aberration measurement accuracy. (a)  $X$  direction; (b)  $F$  direction

从以上分析可以看出,  $X$  方向定心误差会造成  $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$  四项彗差求解精度的恶化。 $F$  方向定心误差会造成几乎所有项像差求解精度的恶化。因此, 对空间像进行准确的定心, 对于提高模型的检测精度具有重要意义。

本文课题组的闫观勇等曾提出基于主成分拟合的定心方法<sup>[18]</sup>。其基本思想为, 将主成分矩阵与待测空间像错开一定位置进行匹配, 观察拟合残差, 拟合残差最小的位置就对应空间像的偏移量。空间像定心有基于三项模型和基于六项模型两种方法。三项模型指建立主成分矩阵所用的空间像只包含  $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  三项像差, 六项模型指建立主成分矩阵所用的空间像包含  $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$ 、 $Z_{16}$  六项像差。为了兼顾求解速度与精度, 在两种定心过程中, 仿真空像均采用较高密度空间像仿真与线性插值的方法相结合, 从而形成高密度网格。

为了比较三项模型与六项模型两种空间像定心方法的效果, 随机生成 30 组待测空间像, 每一组空间像均包含  $0^\circ$  方向检测标记和  $90^\circ$  方向检测标记的空间像各一张, 分别进行定心并使用定心精度的平均值评估空间像定心的效果。考虑到照明、主成分个数可能对定心结果存在影响, 在照明相干因子为 0.48~0.98、数

球差, 球差对空间像的影响也是沿焦向的, 不改变水平方向的强度分布。因此,  $X$  方向定心误差也几乎不会对球差的求解产生影响。

$F$  方向定心误差对像差求解精度的影响如图 10(b) 所示。与  $X$  方向定心误差对像差求解精度的影响不同,  $F$  方向的定心误差对所有项像差的求解精度都有着肉眼可见的影响。这是由于七项像差都会影响空间像沿焦向的强度分布。 $Z_5$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{16}$  三项像差是最敏感的, 因为这三项像差都只会导致空间像沿焦向的移动, 而不改变水平方向的强度分布。 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$  四项彗差尽管会改变空间像沿水平方向的强度分布, 但彗差对空间像水平方向强度分布的影响是沿焦向发生变化的, 也与焦向位置有关。因此, 这四项彗差的求解精度也会受到  $F$  方向定心误差的影响, 但没有  $Z_5$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{16}$  这三项受到的影响大。

值孔径为 0.42~0.92、主成分个数为 5~15 范围内的不同工况下进行仿真分析, 结果如图 11 所示。

从定心精度的散点图中可以看出, 在  $X$  方向上,  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两种检测标记空间像的定心中, 六项模型的定心精度始终为 0, 实现了完美定心, 而三项模型的定心精度在 0~1.5 nm 之间。在  $F$  方向上,  $0^\circ$  检测标记空间像的定心中, 三项模型的表现优于六项模型, 而在  $90^\circ$  检测标记空间像的定心中, 六项模型的表现更好。基于此结果, 在后续定心实验中, 对  $X$  方向的定心使用六项模型, 对  $F$  方向的定心  $0^\circ$  检测标记空间像使用三项模型,  $90^\circ$  检测标记空间像使用六项模型。

通过空间像重构实验分析定心方法的实际应用效果, 分别在定心前和定心后使用 AMAI-PCA 程序求解波像差, 并将解得的波像差数据输入仿真软件重构空间像, 观察空间像重构残差。使用定心方法前的空间像重构结果如图 12 所示, 重构残差为 -0.06~0.06。

使用定心方法后的空间像重构结果如图 13 所示。从空间像重构结果可以看出, 相比定心前, 使用定心方法后的重构残差从 -0.06~0.06 缩小到了 -0.04~0.03。这说明使用定心方法后, 波像差求解的准确性进一步提高, 验证了定心方法的有效性。

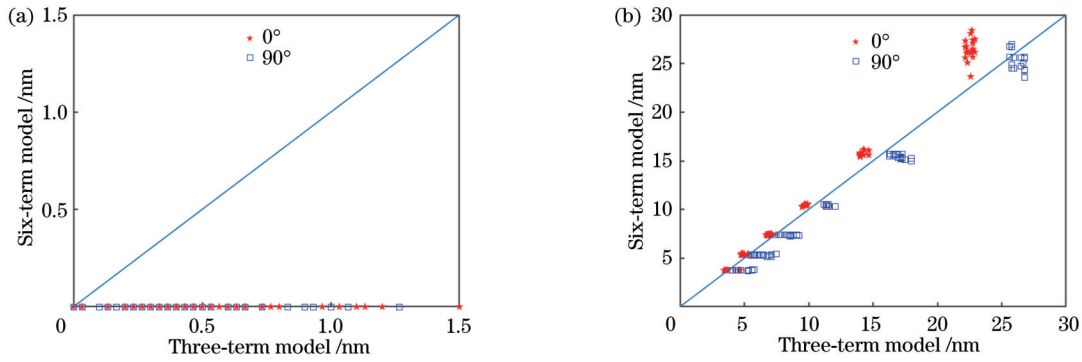


图 11 三项模型和六项模型的定心精度比较。(a) X 方向; (b) F 方向

Fig. 11 Centering accuracy comparison of three-term model and six-term model. (a) X direction; (b) F direction

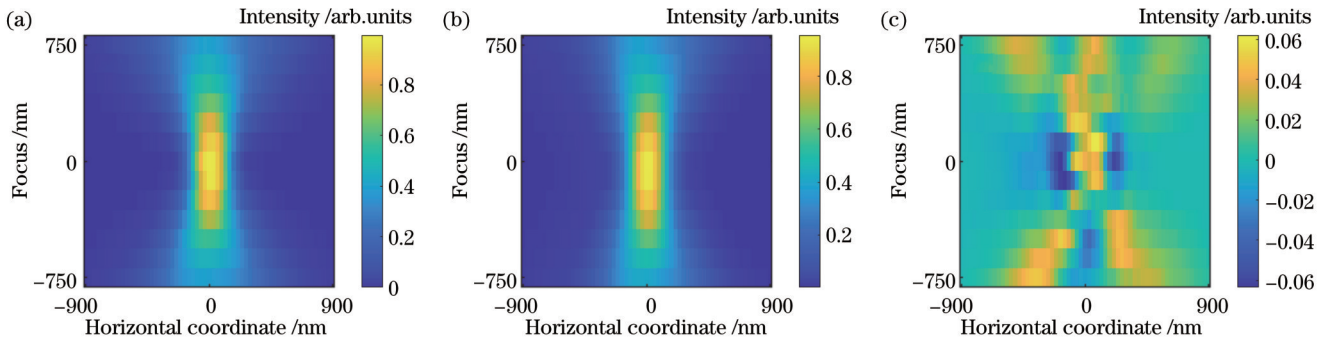


图 12 定心前的空间像重构实验结果。(a) 实测空间像; (b) 重构空间像; (c) 空间像残差

Fig. 12 Experimental results of aerial image reconstruction before centering. (a) Measured aerial image; (b) reconstructed aerial image; (c) aerial image residual

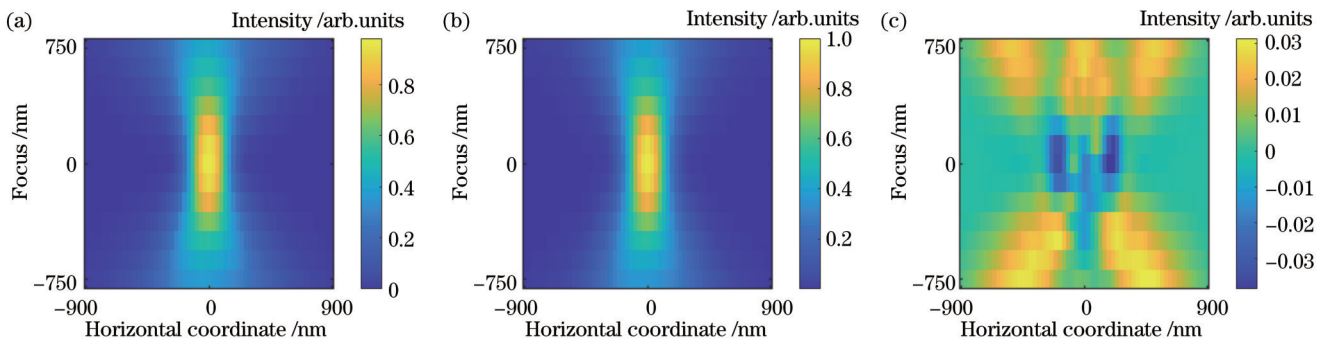


图 13 定心后的空间像重构实验结果。(a) 实测空间像; (b) 重构空间像; (c) 空间像残差

Fig. 13 Experimental results of aerial image reconstruction after centering. (a) Measured aerial image; (b) reconstructed aerial image; (c) aerial image residual

为了验证定心方法在不同环境下的稳定性,开展了双传感器测量实验。使用两个完全相同的传感器对同一个视场点进行扫描探测,对两次测量的空间像数据分别进行定心求解,通过观察定心后空间像的一致性,以及像差求解结果的一致性,可以评价定心方法的稳定性。

使用定心方法前,两个传感器测量的空间像如图 14 所示,残差表示两幅空间像数据的差值。从图中可以看出,尽管测量同一个视场点,两个传感器测得的空间像在位置分布上仍有着肉眼可见的偏移,这也导致残差较大,分布在  $-0.13 \sim 0.22$ 。

对两组空间像进行定心,定心后的空间像及其残差如图 15 所示。从图中可以看出,定心后两个传感器的空间像位置基本一致,残差也从  $-0.13 \sim 0.22$  缩小至  $0 \sim 0.094$ 。

将定心前后的空间像分别代入 AMAI-PCA 程序求解像差。结果表明,定心前两个传感器解得的像差结果区别较大,最大差值发生在  $Z_5$  项,定心后两个传感器解得的像差结果较为接近,最大差值缩小为原来的 5.14%。两个传感器解得的像差结果越接近,则 AMAI-PCA 的稳定性越好。像差求解结果说明定心方法能够有效提高像差求解结果的准确度,具有较好



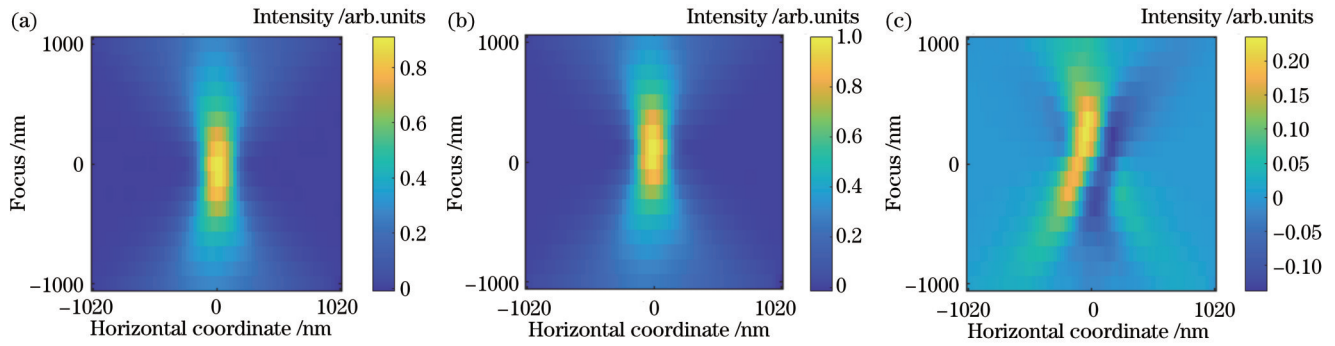


图 14 定心前双传感器实验结果。(a)传感器 1 实测空间像;(b)传感器 2 实测空间像;(c)空间像残差

Fig. 14 Experimental results of two sensors before centering. (a) Measured aerial image of sensor 1; (b) measured aerial image of sensor 2; (c) aerial image residual

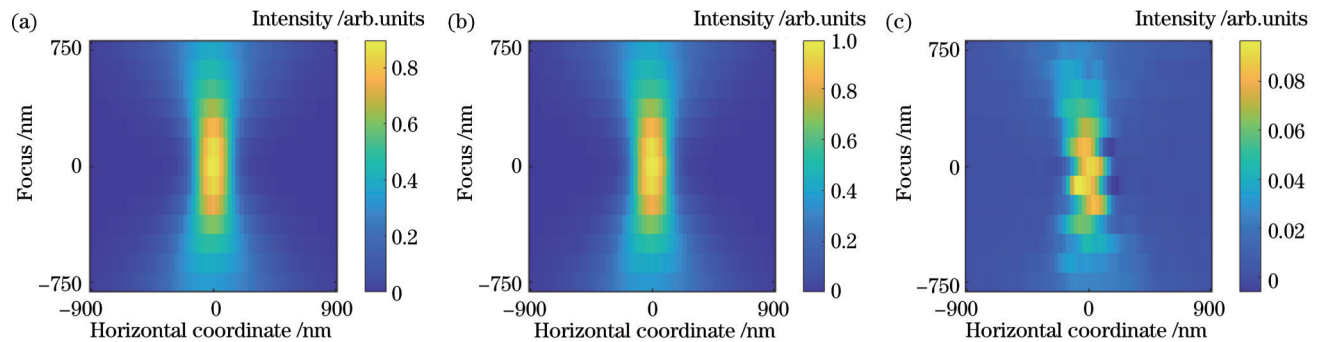


图 15 定心后双传感器实验结果。(a)传感器 1 实测空间像;(b)传感器 2 实测空间像;(c)空间像残差

Fig. 15 Experimental results of two sensors after centering. (a) Measured aerial image of sensor 1; (b) measured aerial image of sensor 2; (c) aerial image residual

的稳定性。从图 13 可以看出,定心后两幅空间像的位置已经基本重合,但强度分布上仍有一定区别,这来源于工件台的抖动、定位误差以及随机光强噪声。这些原因导致了定心后的两个传感器求解结果仍有一定差异。

空间像重构实验和双传感器实验说明,定心方法能够对实测空间像进行准确地定心,并且具有较好的

稳定性。使用定心方法后的 AMAI-PCA 技术具有更高的像差检测精度。

### 3.4 空间像降噪方法分析

空间像的噪声来源以及噪声模型已在 2.5 节中进行过分析。利用上述噪声模型对仿真空间像添加噪声,结果如图 16 所示。

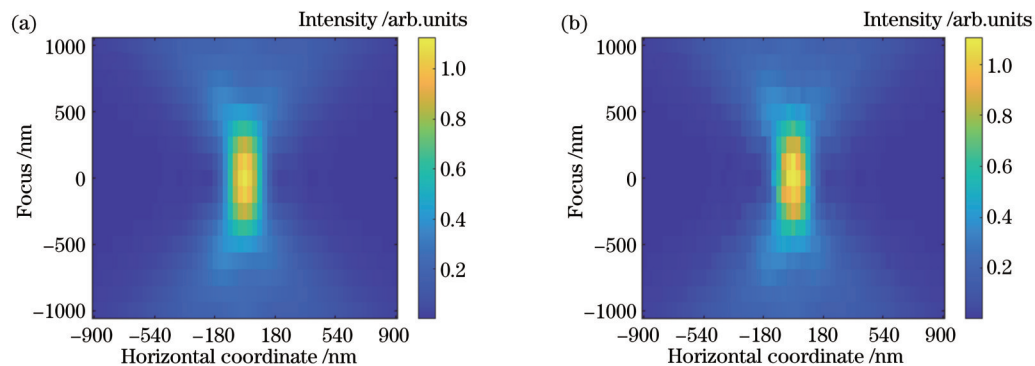


图 16 空间像示意图。(a)理想空间像;(b)含噪声空间像

Fig. 16 Diagram of aerial image. (a) Aerial image without noise; (b) aerial image with noise

对 20 张含噪声空间像计算标准差,结果如图 17 所示。

为了去除空间像噪声,首先尝试了空域和频域中

的常用滤波方法。在空域中采用了高斯滤波、自适应中值滤波、样条平滑滤波三种滤波方法对含噪声空间像进行滤波处理,通过观察等光强图分析滤波结果。

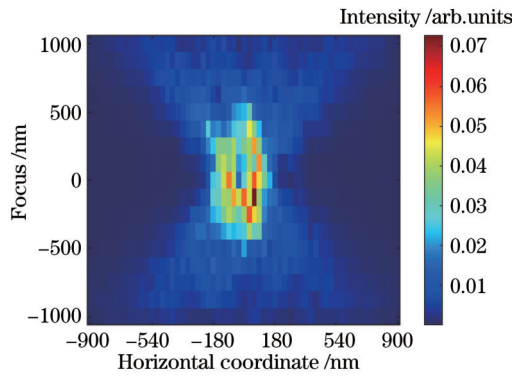


图 17 噪声的标准差图

Fig. 17 Standard deviation image of noise

为了更进一步分析滤波结果,对三种滤波方法下的像差求解精度进行了仿真。等光强图和像差求解精度如图 18 所示。

原光强指不含噪声的等光强图,理论上滤波后的图像与原光强越接近,则滤波效果越好。通过等光强

图可以看出,高斯滤波和样条平滑滤波的滤波效果比自适应中值滤波要好,但这两种滤波结果又很接近,很难分出滤波结果的好坏。通过求解精度对比可以看出,采用高斯滤波,上面列出的七项波像差的求解精度均有所提升,但提升幅度很小,不能满足精度要求;自适应中值滤波的效果最差,不能提升求解精度;样条平滑滤波对除  $Z_8$  外其他项的求解精度均有提升,但提升幅度仍然不大。总的来看,常见的空域滤波方法对这种异方差性的噪声均不能很好地滤除,滤波后的求解精度不能达到要求。这是由于空域滤波是利用像素及像素邻域组成的空间进行图像增强,而空间像的噪声在每个像素点都具有独立的方差,相邻像素关联不强,因此基于邻域的计算很难对空间像噪声进行有效滤除。样条平滑滤波和高斯滤波对部分项的求解精度有所提升,但仍不足以解决噪声问题。

在频域中,采用了理想低通滤波、高斯滤波和巴特沃斯滤波三种常用的频域滤波方法对含噪声空间像进行处理,等光强图和像差求解精度如图 19 所示。

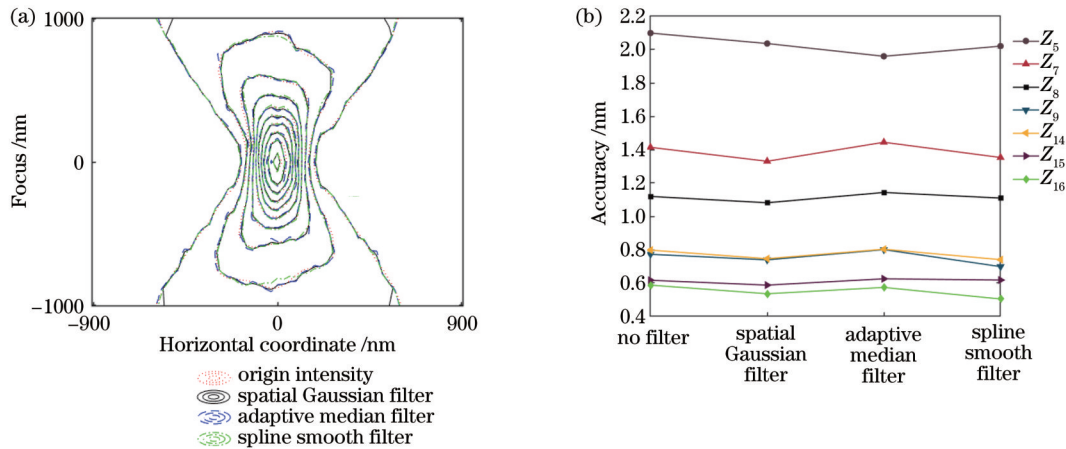


图 18 空域滤波等光强图及求解精度。(a)等光强图;(b)求解精度

Fig. 18 Contour diagram and solving accuracy of spatial filtering. (a) Contour diagram; (b) solving accuracy

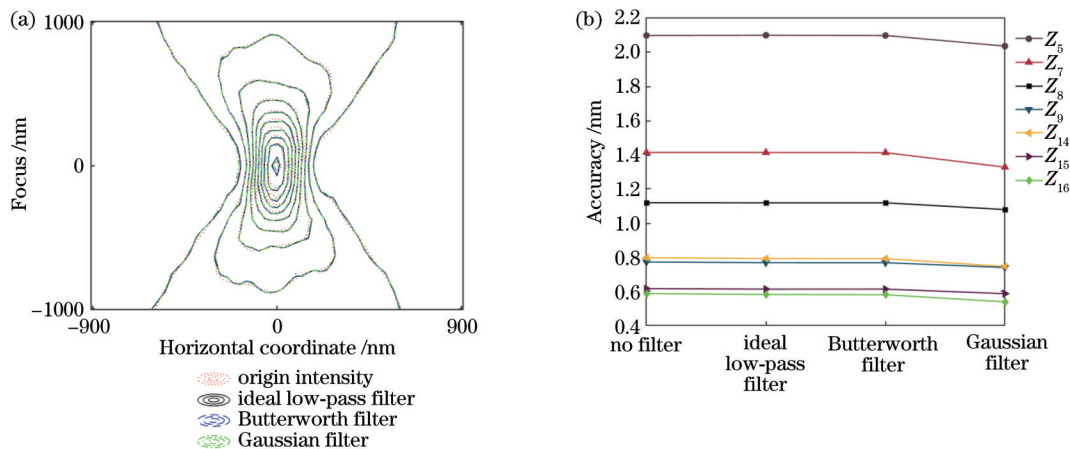


图 19 频域滤波等光强图及求解精度。(a)等光强图;(b)求解精度

Fig. 19 Contour diagram and solving accuracy of frequency filtering. (a) Contour diagram; (b) solving accuracy

通过等光强图可以看出,频域滤波器对空间像光强分布的改变较小,各个滤波器之间很难看出优劣。通过求解精度对比可以看出,经上述三种频域滤波器处理的结果虽然在等光强图中与原光强接近,但是在仿真计算求解过程中,各项波像差求解精度都没有明显提高。这说明频域滤波的方法无法在不改变原光强分布的情况下对噪声进行有效滤除。这是由于频域滤波是对图像的高频分量进行去除,从而达到滤波目的,而空间像的噪声在高频的分量较少,因此频域滤波很难对空间像噪声进行有效滤除。

通过上面的分析可以看出,常用的空域和频域滤波方法均不能对噪声进行有效滤除。这是由于常见的降噪方法是对空间像进行平滑滤波,平滑滤波存在卷积效果,会造成空间像的膨胀和模糊,不利于 Zernike 系数的提取,造成波像差检测精度降低。同时实测空间像各点的噪声具有异方差性,不同光刻机噪声种类和强度不同,同一光刻机不同视场点的波像差幅值也不同,这都增加了滤波过程的难度和复杂度。

针对各点噪声的异方差性,本文提出平均降噪法,即对同一视场点的空间像进行多次采集,然后用多幅空间像的平均值作为理想空间像,并代入模型求解。平均降噪法是在像素单位上进行操作的,能够有效处理这种各像素之间异方差性的噪声。然而使用平均降噪法需要合理选择重复采集的次数。如果重复采集次数过多,求解像差所用时间就会变长,难以满足实时检测的需要。工件台长时间工作所带来的热效应也会导致定位精度下降的问题,从而影响像差求解精度。因此,本文分析了 1~20 次重复采集结果,并对空间像进行平均降噪后的求解精度,结果如图 20 所示。

从图 20 可以看出,随着求平均所用空间像数量的增加,像差求解精度整体上是逐渐提高的。其中,在空间像数量为 1~10 幅的区间内,随着采集次数的增加,求解精度提升较大。在空间像数量为 11~20 幅的区

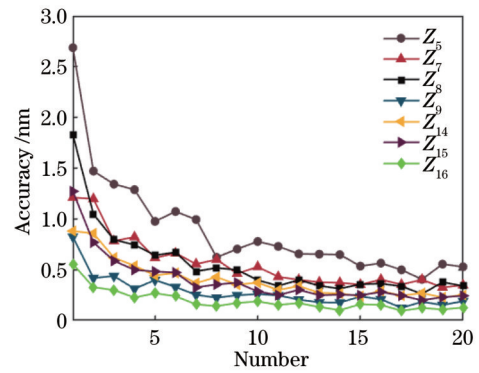


图 20 不同空间像采集次数的降噪效果

Fig. 20 Noise reduction effects with different aerial image numbers

间内则趋势变缓。考虑到实际应用中,空间像重复采集次数控制在 5 次以内最佳,本文建议取 3~5 次较为合适。在 3~5 次的区间内, $Z_5$  项求解精度优于 1.5 nm,其余项求解精度优于 1 nm。

### 3.5 像差漂移量检测

由于实际投影物镜的像差真值是未知的,常采用漂移量测试来间接评估检测精度。AMAI-PCA 技术同其他基于空间像的波像差检测技术类似,同一类型像差的高阶项会对低阶项的测量产生串扰,不同类型的像差之间也存在串扰。实际的投影物镜存在 33 项甚至更多 Zernike 像差,会对 7 项 Zernike 系数的测量产生串扰。因此,AMAI-PCA 技术测得的 7 项波像差是等效后的综合像差。在非待测项较小的情况下,可以反映待测项的大小。随着光刻机的使用,投影物镜的像差也会逐渐产生漂移,需要对像差的漂移量进行检测以校正像差。为了评估 AMAI-PCA 技术检测漂移量的能力,在仿真中加入 33 项像差,分别调整 7 项像差  $0.02\lambda$  的幅值,使用 AMAI-PCA 程序求解,观察漂移量的测量结果,如图 21 所示。

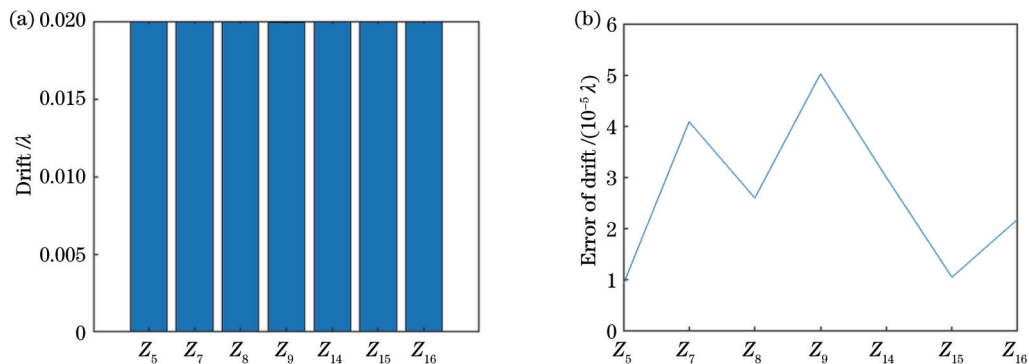


图 21 像差漂移量检测结果。(a) 漂移量; (b) 漂移量误差

Fig. 21 Measurement result of aberration drift. (a) Drift; (b) error of drift

从图 21(a)可以看出,7 项像差的漂移量检测结果均为  $0.02\lambda$ ,与预设值几乎一致。这说明即便待测像加入了 33 项像差,在单独改变  $Z_5$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$ 、

$Z_{16}$  中某一项像差  $0.02\lambda$  的幅值时,该技术仍然能够准确测得像差漂移量。图 21(b)为漂移量检测结果与预设值  $0.02\lambda$  的差值,可以看出,7 项像差的漂移量检测

误差不超过  $5.1 \times 10^{-5} \lambda$ 。因此, AMAI-PCA 技术可用于实际光刻机的短期像差校正场合情况下的检测。

## 4 结 论

投影物镜的波像差会造成光刻成像质量下降。 AMAI-PCA 技术是一种原位、实时的波像差检测技术。本文结合仿真和实验研究了该技术的理论模型和工程模型。在理论模型方面,照明和空间像采样范围对波像差检测精度影响较大,照明部分相干因子在 0.5~0.8 范围内,  $F$  方向空间像采样长度在 5000 nm 以上检测精度较高。在工程模型方面,本文对传感器模型、定心方法和降噪方法进行了研究。在传感器模型方面,分析表明使用合适的传感器模型可以更好地拟合实验数据,提高像差检测精度。在定心方面,  $X$  方向定心精度会严重影响  $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{15}$  四项彗差的求解精度,而  $F$  方向定心精度对全部七项像差的求解都有影响,这与像差的性质有关。在  $X$  方向上六项模型的定心精度更高,而在  $F$  方向上,三项模型适合对  $0^\circ$  空间像定心,六项模型适合对  $90^\circ$  空间像定心。因此,在工程应用中应当根据实际条件进行定心方法的选择。空间像重构实验和双传感器实验表明,定心方法能够对实测空间像进行有效定心,使用定心方法后,波像差求解的准确度进一步提高。在降噪方面,传统的空域和频域滤波方法都无法有效滤除空间像噪声,这是由于空间像噪声具有异方差性,每个像素位置的噪声都是独立的。针对这一特点,本文提出了平均降噪法,对同一个视场点进行 3~5 次重复采集,平均值处理后检测精度提升明显,可用于工程实际。该技术与其他基于空间像的方法类似,测得的像差值是等效后的综合像差,在非待测项较小时可以反映待测项的大小。像差漂移量测量仿真结果表明,该技术可以用于光刻机的短期像差校正。

## 参 考 文 献

- [1] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.  
Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.
- [2] 孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. 穆勒矩阵成像椭圆仪误差源的简化分析方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0911002.  
Meng Z J, Li S K, Wang X Z, et al. Simplified analytical method for error sources in Mueller matrix imaging polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0911002.
- [3] Zhu B E, Li S K, Mao Y J, et al. Fast thermal aberration model for lithographic projection lenses[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34038-34049.
- [4] 马旭, 张胜恩, 潘毅华, 等. 计算光刻研究及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922008.  
Ma X, Zhang S E, Pan Y H, et al. Research and progress of computational lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922008.
- [5] 冯鹏, 唐锋, 王向朝, 等. 双孔点衍射干涉成像系统波像差检测技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0904002.

- Feng P, Tang F, Wang X Z, et al. Dual-hole point diffraction interferometer for measuring the wavefront aberration of an imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0904002.
- [6] 马明英, 王向朝, 王帆, 等. 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1037-1042.  
Ma M Y, Wang X Z, et al. Novel method for measuring coma with fine overlay test marks[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1037-1042.
- [7] 王帆, 王向朝, 马明英, 等. 基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 673-678.  
Wang F, Wang X Z, Ma M Y, et al. On-site coma measurement technique base on linewidth asymmetry of the aerial image[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 673-678.
- [8] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, et al. Wavefront aberration measurement method for a hyper-NA lithographic projection lens based on principal component analysis of an aerial image[J]. Applied Optics, 2016, 55(12): 3192-3198.
- [9] van der Laan H, Dierichs M, van Greevenbroek H, et al. Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 394-407.
- [10] Qiu Z C, Wang X Z, Yuan Q Y, et al. Coma measurement by use of an alternating phase-shifting mask mark with a specific phase width[J]. Applied Optics, 2009, 48(2): 261-269.
- [11] 卢云君, 唐锋, 王向朝. 光栅剪切干涉高精度波像差检测方法: CN112229604A[P]. 2021-01-15.  
Lu Y J, Tang F, Wang X C. Grating shearing interference high-precision wave aberration detection method: CN112229604A[P]. 2021-01-15.
- [12] 张璐. 光刻物镜系统波像差横向剪切干涉绝对检测方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.  
Zhang L. Research on lateral shearing interference absolute measurement method of wavefront aberration of lithography lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [13] 赖恒, 李大海, 高锦瑞, 等. 基于相位测量偏折术的透镜波像差检测方法[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(3): 25-32.  
Lai H, Li D H, Gao J R, et al. Measurement method of wavefront aberration of transmission optical element based on phase measuring deflectometry[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(3): 25-32.
- [14] 戴凤钊, 王向朝, 唐锋. 数字相移点衍射干涉仪及光学系统波像差测量方法: CN105092056A[P]. 2018-05-08.  
Dai F Z, Wang X C, Tang F. Digital phase shift point diffraction interferometer and optical system wave aberration measuring method: CN105092056A[P]. 2018-05-08.
- [15] Duan L F, Wang X Z, Bourou A Y, et al. *In situ* aberration measurement technique based on principal component analysis of aerial image[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18080-18090.
- [16] Duan L F, Wang X Z, Yan G Y, et al. Practical application of aerial image by principal component analysis to measure wavefront aberration of lithographic lens[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012, 11(2): 023009.
- [17] 曹译莎, 唐锋, 王向朝, 等. 光刻投影物镜畸变检测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922012.  
Cao Y S, Tang F, Wang X Z, et al. Measurement techniques for distortion of lithography projection objective[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922012.
- [18] 闫观勇, 王向朝, 杨济硕, 等. 自适应定心的光刻机投影物镜波像差检测方法: CN102314095A[P]. 2012-01-11.  
Yan G Y, Wang X C, Yang J S, et al. Adaptive centering wave aberration detection method of projection lens in mask aligner: CN102314095A[P]. 2012-01-11.
- [19] Yang J S, Wang X Z, Li S K, et al. Adaptive denoising method to improve aberration measurement performance[J]. Optics Communications, 2013, 308: 228-236.

- [20] 段立峰, 王向朝, 徐东波. 基于空间像检测的投影物镜波像差原位测量方法: CN102681358A[P]. 2014-02-12.  
Duan L F, Wang X Z, Xu D B, et al. In situ wave-front aberration measurement method of projection lens based on aerial image detection: CN102681358A[P]. 2014-02-12.
- [21] Yang J S, Wang X Z, Li S K, et al. High-order aberration measurement technique based on a quadratic Zernike model with optimized source[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 053603.
- [22] Zhu B E, Li S K, Wang X Z, et al. High-order wavefront aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens based on a binary target and rotated regression matrix[J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 158-166.
- [23] 杨济硕, 李思坤, 王向朝, 等. 基于空间像自适应降噪的投影物镜波像差检测方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0111003.  
Yang J S, Li S K, Wang X Z, et al. Projection lens wave-front aberration measurement method based on adaptive aerial image denoising[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0111003.

## Wavefront Aberration Measurement Technique Based on Principal Component Analysis of Aerial Image for Lithographic Projection Lens

Lei Wei<sup>1,2</sup>, Li Sikun<sup>1,2,3\*</sup>, Pan Dongchao<sup>1,2</sup>, Jiang Yipeng<sup>1,2</sup>, Tong Tong<sup>1,3</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,4\*\*</sup>,  
Bu Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic 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;

<sup>3</sup>Department of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

### Abstract

**Objective** Lithography is a key technique in the manufacture of very large scale integrated circuits. The imaging quality of the lithographic projection lens directly affects the critical dimensions of integrated circuits. The wavefront aberration of the projection lens reduces lithographic imaging quality and affects the lithographic resolution. Therefore, measuring the wavefront aberration of the lithographic projection lens is crucial for improving lithographic imaging quality. The wavefront aberration measurement technique based on principal component analysis of aerial images for the lithographic projection lens is characterized by fast process and *in-situ* measurement. However, this technique is affected by the illumination condition, scanning range, sensor, and other factors in practical engineering applications. It also faces a number of problems, such as image shift and noise. This study investigates the above engineering issues, proposes engineering application suggestions, and verifies the effectiveness of the proposed method by simulation and experiments.

**Methods** The commercial lithographic simulation software Santaurus lithography of Synopsys is employed for simulation research. The influences of different factors on the performance of wavefront aberration measurement are studied. An actual sensor structure is adopted to examine the influences of sensor parameters on the accuracy of wavefront aberration measurement, and the validity of the sensor model is verified by aerial image reconstruction experiments. The influence of the centering error on the accuracy of wavefront aberration measurement is analyzed. Two centering methods are compared to determine their respective applicability. The effectiveness of the centering method is verified by aerial image reconstruction experiments and two sensor experiments. The effects of different denoising methods on aerial images are studied, and an average denoising method tailored to the unique noise type of aerial images is proposed.

**Results and discussions** The simulation and experimental results show that illumination and the scanning range have a great influence on the accuracy of wavefront aberration measurement. The measurement accuracy is high when the partial coherence parameter of illumination is in the range of 0.5–0.8 and the sampling length of the aerial image along the focus ( $F$ ) direction is above 5000 nm. In terms of centering, the centering accuracy of the six-term model is higher in the  $X$  direction. In the  $F$  direction, the three-term model is suitable for centering the  $0^\circ$  aerial image while the six-term model is applicable for centering the  $90^\circ$  aerial image. Regarding denoising, the average denoising method proposed in this study can significantly improve the accuracy of wavefront aberration measurement and can be applied in engineering. The simulation results prove that the proposed technique can be used to correct the short-term aberration drift of the scanner.

**Conclusions** This study systematically investigates the wavefront aberration measurement technique based on principal

component analysis of aerial images for the lithographic projection lens. Specifically, it analyzes the engineering problems of this technique and further presents some application suggestions. The simulation and experimental results show that the measurement accuracy of this technique can be effectively improved by selecting appropriate illumination conditions, scanning range, sensor model, and centering method. The proposed denoising method can effectively remove the noise in the aerial image and improve the accuracy of wavefront aberration measurement. The simulation results prove that the proposed technique can be used to correct the short-term aberration drift of the scanner.

**Key words** instrumentation, measurement, and metrology; lithography; wavefront aberration measurement; aerial image; sensor model; centering; denoising