

# 基于相位环空间像主成分分析的投影物镜 波像差检测方法

杨济硕<sup>1,2</sup> 王向朝<sup>1,2</sup> 李思坤<sup>1</sup> 闫观勇<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, 北京 100049

**摘要** 提出一种基于阶梯相位环空间像主成分分析的光刻投影物镜波像差检测方法。通过对相位环空间像进行主成分分析和多元线性回归分析, 构建了空间像光强分布与波像差之间的线性模型, 并基于该模型实现了波像差检测。与使用孤立空检测标记的传统方法相比, 使用新检测标记能够消除不同种类波像差之间的串扰问题, 提高像差检测精度。同时, 分析了空间像的离焦误差对波像差检测精度的影响, 并提出了一种迭代算法用于确定实测空间像的离焦误差, 其测量精度优于 1 nm。光刻仿真软件 Dr. LiTHO 的仿真结果表明, 该法有能力检测 12 项泽尼克系数( $Z_5 \sim Z_{16}$ ), 最大系统误差约为  $1 \times 10^{-3} \lambda$ , 检测速度可提高一倍以上。

**关键词** 成像系统; 光刻; 波像差检测; 相位环; 主成分分析; 空间像

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0211004

## *In Situ* Aberration Measurement Method Based on a Phase-Shift Rings Target

Yang Jishuo<sup>1,2</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup> Li Sikun<sup>1</sup> Yan Guanyong<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> *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** An *in situ* aberration measurement method based on a two-dimensional (2D) phase-shift rings target is proposed for quality evaluation of the lithographic projection lenses. A linear model between aerial-image intensity distribution and wavefront aberrations is built by principal component analysis (PCA) and multivariate linear regression analyses. Compared with the binary target in the AMAI-PCA method, the aerial images of the phase-shift rings contain more information which owns the ability of eliminating crosstalk between different kinds of aberrations, therefore, the accuracies of aberration measurement are improved. Impacts of aerial-image defocus error on the extractions of aberrations are analyzed. A measurement method for defocus error is also proposed. Simulations with the lithographic simulator Dr. LiTHO show that the proposed method can detect 12 terms of Zernike coefficients ( $Z_5 \sim Z_{16}$ ) with maximum error of  $1 \times 10^{-3} \lambda$ . Simultaneously, the speed of aberration measurement is doubled because less aerial images need to be captured for the merit of applying the new 2D target.

**Key words** imaging systems; microlithography; aberration measurement; phase-shift rings; principal component analysis; aerial image

**OCIS codes** 110.3960; 120.3940; 220.1010

收稿日期: 2013-08-22; 收到修改稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003, 61205102, 61275207)

作者简介: 杨济硕(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事高端光刻机投影物镜波像差检测技术方面的研究。

E-mail: yangjishuo\_01@126.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

投影物镜是光刻机最复杂、最重要的分系统之一,投影物镜的性能直接决定光刻机的性能。投影物镜存在波像差会引起投影物镜的成像位置偏移(IPE),造成套刻误差(OE);同时,引起最佳焦面位置偏移(BFS),造成关键图形均匀性(CDU)下降,并最终导致光刻机的成像对比度恶化、工艺窗口缩小和产品良率降低<sup>[1-2]</sup>。为了使掩模图形高保真度地转印到硅片上,国际上各光刻技术研发单位开发了一系列的波像差检测技术<sup>[3-13]</sup>。ASML公司开发的多照明设置空间像测量(TAMIS)技术<sup>[5]</sup>利用两个或多个方向的二元掩模作为检测标记,根据不同的数值孔径(NA)、部分相干因子( $\sigma$ )以及检测标记尺寸,波像差对检测标记空间像成像位置的影响建立灵敏度矩阵,以IPE和BFS作为测量对象,并从中提取波像差。TAMIS技术具有像差检测速度快、低阶像差的检测精度高等特点。随后,Wang等<sup>[6-7]</sup>对TAMIS技术检测标记和照明方式等参数不断进行优化,使TAMIS技术的像差检测潜力得到了较为充分的开发。

2011年,Duan等<sup>[13]</sup>提出了一种基于空间像主成分分析的投影物镜波像差检测技术(AMAI-PCA)。该技术采用两个方向的二元掩模作为检测标记,利用光刻仿真和统计分析方法,构建了空间像光强分布与波像差之间的线性关系模型。利用该线

性模型可以快速地从实测空间像中提取波像差。由于AMAI-PCA方法在原理上利用了空间像的几乎所有可用信息建立模型,所以它对波像差的响应灵敏度非常高,具有很高的像差检测精度。但是,AMAI-PCA方法使用二元光栅作为检测标记,必须采集一定焦深范围内分布的空间像光强来获取偶像差信息。这种空间像的分布方式对不同类别的波像差具有相似的响应特征,如彗差和三波差都会产生空间像的香蕉型形变等,这导致了波像差在提取的过程中容易产生不同种类像差间的串扰,影响了模型的稳定性。于是,该方法随后又报道了采用多种照明方式<sup>[14]</sup>以及采用二阶模型的方法<sup>[15]</sup>来消除像差间的串扰,提高回归矩阵灵敏度。但这些改善方法需要改变照明方式,增加了测量时间。

为了消除波像差之间的串扰,提出了一种基于相位环空间像主成分分析的投影物镜波像差检测方法。该方法利用阶梯相位环作为检测标记实现对投影物镜光瞳面波前的全方向抽样,仅需采集一幅空间像即可检测多种波像差,检测速度快,精度高。

## 2 原 理

### 2.1 基于空间像的波像差提取方法

投影物镜中的波像差通常使用一组相互正交的泽尼克多项式表征<sup>[16]</sup>,其表达式为

$$\begin{aligned} W(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \mathbf{R}_n(\rho, \theta) = & Z_1 + Z_2 \cdot \rho \cos \theta + Z_3 \cdot \rho \sin \theta + Z_4 \cdot (2\rho^2 - 1) + \\ & Z_5 \cdot \rho^2 \cos 2\theta + Z_6 \cdot \rho^2 \sin 2\theta + Z_7 \cdot (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{W}$ 表示波像差,可分解成一系列泽尼克多项式与其系数乘积叠加的形式。根据泽尼克多项式的角频率对泽尼克多项式进行分类。例如,角函数为 $\theta$ 奇数倍的泽尼克多项式称为奇像差;角函数为 $\theta$ 偶数倍的泽尼克多项式称为偶像差。 $\theta$ 的倍数相同的泽尼克多项式表示同一类型的波像差,称之为同族波像差,如 $Z_7$ 和 $Z_{14}$ 为同族波像差,称之为 $1\theta$ 族波像差。

光刻成像过程中检测标记的衍射光谱在投影物镜光瞳面会受到波像差的相位调制,实际空间像中包含了投影物镜的波像差信息。基于空间像的波像差提取方法就是以空间像作为测量对象,根据空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性模型提取泽尼克系数。线性模型的建立需要仿真大量实际光刻机

参数条件下的空间像,并根据数学统计方法进行模型标定。

为了定量地描述空间像的形变程度,对空间像进行主成分分析<sup>[17]</sup>。主成分分析方法是一种从大量的训练用数据中提取共性特征的统计方法。该方法可以将数据的共性特征进行正交分类,得到训练用数据的主成分。该过程如同建立了以主成分为坐标轴的坐标系,训练用数据都可以在该坐标系中找到唯一的坐标,即主成分系数。生成大量的训练用仿真空像,经过主成分分析可得到一系列相互正交的空间像主成分。空间像的主成分就是空间像的形变特征,其主成分系数就表示了形变的程度。每一幅空间像都可以用有限阶主成分与主成分系数乘积叠加的形式表示:

$$\mathbf{A}(x, y, z; \mathbf{Z}) = \sum_{j=1}^m \mathbf{P}_j(x, y, z) \cdot \mathbf{C}_j(\mathbf{Z}) + \mathbf{E}_T, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{A}$  表示空间像光强矩阵, 与像空间坐标  $(x, y, z)$  以及泽尼克系数  $\mathbf{Z}$  有关。  $\mathbf{P}$  表示主成分,  $\mathbf{C}$  表示主成分系数。  $\mathbf{E}_T$  表示将空间像  $\mathbf{A}$  展开到  $m$  阶主成分时的舍位误差, 因为主成分具有正交性, 所以主成分系数的获取不受舍位误差的影响。由(2)式可知, 空间像被分解成了与空间坐标有关的主成分和与泽尼克系数有关的主成分系数。这样就可以将泽尼克系数从空间像中分离到主成分系数中, 并建立了空间像与主成分系数之间的一一对应关系。

通过使用多元线性回归分析方法可得到主成分系数与泽尼克系数之间的线性关系<sup>[18]</sup>。因为同时知道训练用仿真空间像的主成分系数和泽尼克系数, 二者之间的线性关系很容易获得:

$$\mathbf{C}(\mathbf{Z}) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{E}_R, \quad \mathbf{Z} = [Z_5 \quad Z_6 \quad \cdots \quad Z_n]^T, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{R}$  是多元线性回归矩阵, 表示从主成分系数到泽尼克系数之间的转换关系。  $\mathbf{Z}$  表示输入训练用仿真空间像的泽尼克系数, 它的取值由模型精度和实际需求决定。  $\mathbf{E}_R$  表示回归矩阵  $\mathbf{R}$  的拟合误差。这样就得到了主成分系数与泽尼克系数之间的一一对应关系。结合(2)和(3)式, 建立了空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性关系模型, 基于该模型可

以从空间像中提出波像差。

波像差的提取过程就是利用线性模型标定的主成分矩阵  $\mathbf{P}$  和回归矩阵  $\mathbf{R}$  分别拟合实测空间像和主成分系数。由于方程组通常是超定的, 所以只需利用两次最小二乘法即可实现从空间像中提取泽尼克系数:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{A}), \quad (4)$$

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R})^{-1} \cdot (\mathbf{R}^T \cdot \mathbf{C}). \quad (5)$$

如果忽略光源、投影物镜缩放倍率、杂散光等对光刻成像效果的影响, 那么光刻成像系统的性能可由光瞳面内波像差表征。此时, 若将检测标记视为成像系统的输入, 则输出的空间像即为成像系统响应<sup>[19]</sup>。基于空间像的像差提取方法实质上是根据成像系统对检测标记的空间像响应来提取波像差。在波像差幅值相同的情况下, 空间像的形变量越大, 则检测标记对波像差的响应越大, 像差检测精度越高。另一方面, 检测标记对不同波像差的空间像响应差异越大, 则波像差的检测越稳定。反之, 当检测标记对不同波像差具有相近似的空间像响应时, 检测得到的波像差结果会相互串扰。

## 2.2 二维相位环检测标记

AMAI-PCA 使用二元孤立空作为检测标记<sup>[13]</sup>。如图 1 所示, 上面两图分别为奇像差  $Z_7$  (彗差) 和  $Z_{10}$  (三波差), 偶像差  $Z_9$  (球差) 和  $Z_{12}$  (像散) 延  $0^\circ$  径向角方向的分布曲线。下面四图分别为四

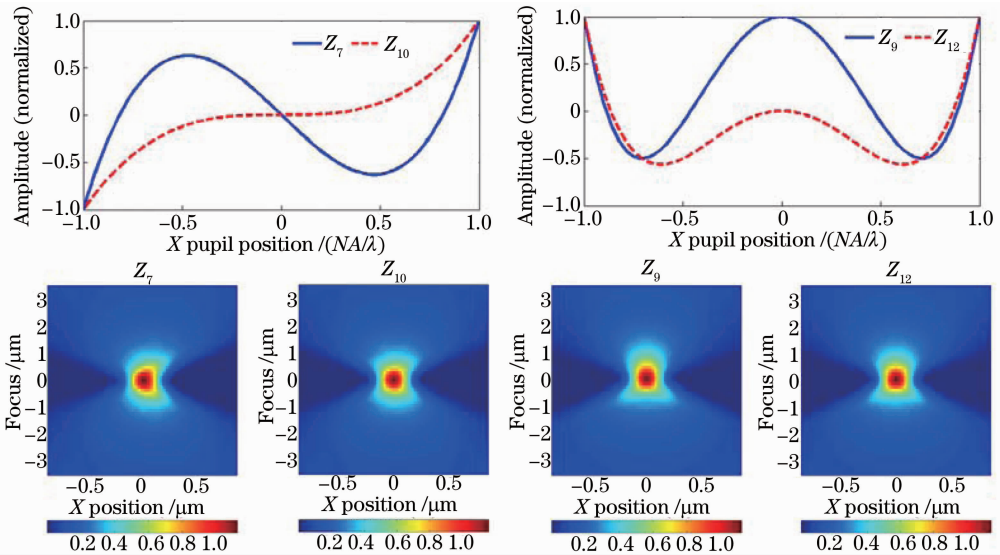


图 1 含有不同波像差的成像系统对孤立空检测标记(孤立空宽为 250 nm)的空间像响应。仿真条件:  $NA=0.75$ ,  $\sigma=0.65$  的传统照明<sup>[19]</sup>, 每个泽尼克系数赋值 0.1 $\lambda$

Fig.1 Impacts of different Zernike aberrations on aerial images for an isolated space pattern with width of 250 nm. Simulation is performed at  $NA = 0.75$ , and conventional illumination with  $\sigma = 0.65$ <sup>[19]</sup>, every single Zernike coefficient is set to 0.1 $\lambda$

个波像差对应的孤立空空间像的光强分布。其中  $Z_7$  和  $Z_{10}$  延  $0^\circ$  径向角方向具有相似分布趋势,故其空间像出现了相似的香蕉型形变。由于  $Z_7$  对相位的调制幅度比  $Z_{10}$  剧烈,所以  $Z_7$  对应的空间像比  $Z_{10}$  对应的空间像形变量大。同理,  $Z_9$  和  $Z_{12}$  对空间像的影响也非常相似。由于含有  $Z_7$  和  $Z_{10}$  的空间像具有相似的形变特征,当采集到的空间像中出现此类形变特征时,测量得到的  $Z_7$  (1 $\theta$ 族) 和  $Z_{10}$  (3 $\theta$ 族) 之间易出现串扰。同样的情况也存在于  $Z_9$  (0 $\theta$ 族) 和  $Z_{12}$  (2 $\theta$ 族) 之间。这种不同族的波像差在像差提取过程中出现串扰的问题,在很大程度上限制了 AMAI-PCA 的像差检测能力。

由于基于一维孤立空检测标记的波像差测量方法存在像差间串扰的问题,因此,设计了一种新的二维检测标记——相位环。如图 2 所示,该标记由透光的圆盘 a 和圆环 b, c, d 构成,圆环 d 外区域透光率为 0。环宽(像方尺寸)由内向外依次为 100 nm, 200 nm, 100 nm 及 150 nm, 相位依次为  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  和  $0^\circ$ 。假设检测标记材料的折射率为  $n_a$ , 检测标记所在空间介质的折射率为  $n_b$ , 则  $90^\circ$  相移对应的厚度差  $h = \lambda / 4(n_a - n_b)$ , 其中  $\lambda$  为曝光波长。因为检测标记的尺寸较大,目前水平下的掩模制造技术可充分满足该检测标记加工精度要求。如果检测标记存在较大误差,则可以对实际的检测标记进行缺陷标定。在线性模型建立的过程中,通过对仿真软件进行缺陷参数修正,使检测标记的误差对波像差测量结果的影响降到最小。假设投影物镜光轴方向为 Z 轴方向,对于二维检测标记,其主要空间像信息是在垂直于光轴的 XY 平面分布的。其中,位于投影物镜理想物理焦面(这里指投影物镜不存在像差时的最佳焦面,以下简称物理焦面)的空间像光强分布与波像差通常具有最佳线性关系。同时,由于本文中设计的相位环检测标记尺寸较大,空间像焦深较大(大于  $0.2 \mu\text{m}$ ),空间像在物理焦面附近的光强变

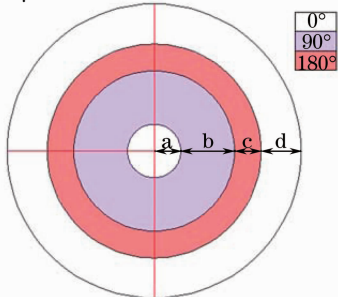


图 2 阶梯相位环检测标记

Fig. 2 Schematic of a phase-shift rings target

化很小,利于波像差的提取。

另外,由于一维检测标记需要旋转多个方向才能对不同角频率的泽尼克波像差进行抽样,耗费大量时间采集每个标记方向对应的空间像,大大降低了 AMAI-PCA 方法的像差检测速度。而本文提出的相位环检测标记采用了旋转对称的环状结构,其衍射谱可以在光瞳面对波前进行全方向的抽样。理论上,仅需一幅空间像即可提取所有角频率的泽尼克波像差。图 3 为相位环检测标记的衍射谱,蓝色实线表示衍射谱在投影物镜的光瞳内归一化的光强幅值分布截面图,红色虚线表示衍射谱的相位分布截面图。由图 3 可知,衍射谱光强由两部分组成,分别是低频的 0 级圆斑和 0 级圆环,该衍射谱既能对波前进行全方向的抽样,也能实现较高对比度的空间像成像。并且,得益于阶梯相位,该检测标记对光瞳面的波前具有调制作用,可以将本来属于不同焦深的空间像特征成像在同一个焦面内,从而只需在水平面采集一幅空间像即可同时提取奇偶波像差。

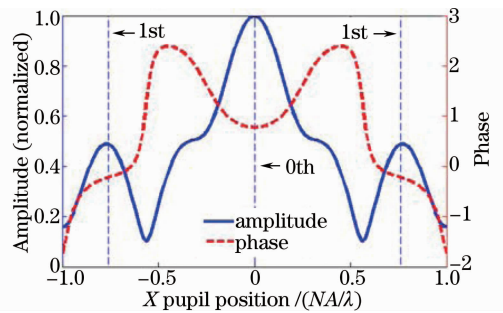


图 3 相位环检测标记的衍射谱振幅和相位分布截面图

Fig. 3 Cross sections of amplitude and phase distributions for the spectrum of the phase-shift rings target

图 4 为含有不同波像差的成像系统对相位环检测标记的空间像响应。与一维孤立空检测标记不同(如图 1 所示),波像差对相位环空间像的影响呈现与该波像差角频率对应的周期性。这个性质非常重要,它令每个主成分均只对应一族波像差的影响,从而抑制了波像差测量过程中的串扰问题。

### 3 数值仿真

为了对基于相位环空间像的波像差检测方法的性能进行评估,进行了模型系统误差的仿真测试,以及离焦误差的影响和抑制方法的仿真测试。

#### 3.1 模型系统误差的测试

本测试利用 Dr. LiTHO 产生仿真空间像。Dr. LiTHO 是德国 Fraunhofer 研究所开发的一款可靠



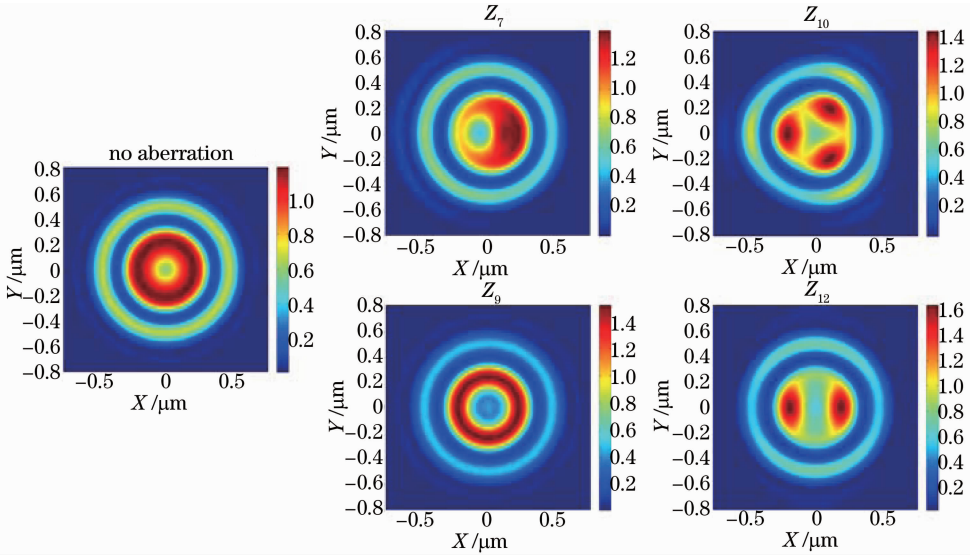


图4 含有不同波像差的成像系统对相位环检测标记的空间像响应。仿真条件:  $NA=0.65, \sigma=0.2$  的传统照明, 每个泽尼克系数赋值  $0.1\lambda$

Fig. 4 Impacts of different Zernike aberrations on aerial images for the phase-shift rings target in Fig. 2. Simulation is performed at  $NA=0.65$ , and  $\sigma=0.2$  conventional illumination, every single Zernike coefficient is set to  $0.1\lambda$

性经过多方验证的光刻仿真软件<sup>[20]</sup>。通常  $Z_5 \sim Z_{16}$  这 12 项泽尼克系数是 90 nm 及以上节点光刻机投影物镜中存在的最主要的像差。对于 90 nm 节点光刻机, 其投影物镜波像差的均方根(RMS)值需要控制在  $0.02\lambda$  以下<sup>[2]</sup>。基于此, 随机生成了 50 组测试用泽尼克系数, 代入 Dr. LiTHO 产生空间像, 并进行模型系统误差的测试。仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation settings

Source	
Wavelength, $\lambda$	193 nm
Illumination type	Conventional
Partial coherence factor $\sigma$	0.2
Polarization type	Tangential polarization
Detected target	
Rings' width	100 nm/200 nm/100 nm/150 nm
Rings' phase	$0^\circ/90^\circ/180^\circ/0^\circ$
Lens	
NA	0.75
Input aberrations type	$Z_5 \sim Z_{16}$
Input single aberrations value	$-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$
Aerial image sampling	
Sampling range	X/Y direction: $-800 \sim 800$ nm
Sampling interval	X/Y direction: 25 nm

其中, 检测标记结构如图 2 所示; 光源照明方式及偏振方向如图 5 所示; 随机生成 50 组泽尼克系数, 单项泽尼克系数幅值在  $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$  范围内服从正态分布, 由此得到的光瞳面波像差幅值在

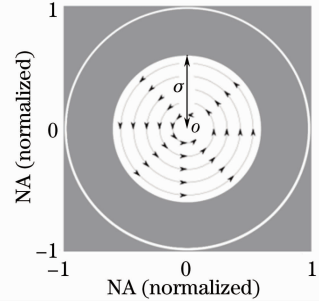


图 5 光源照明方式及偏振方向

Fig. 5 Schematic of the illumination type and the polarization type

$-0.05\lambda \sim 0.05\lambda$  范围内分布。

按照 2.1 节所述的方法建立空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性模型。如图 6 所示, 上半部分图案表示泽尼克多项式, 下半部分图案表示主成分图形。其中, 泽尼克多项式与其下方的主成分图形具有非常高的相似度, 它们之间存在显著的对对应关系。这种高相似度在另一方面表现为, 不同族的波像差之间主成分相互差别很大。

从图 7 可以看出, 如前文所分析的, 回归矩阵不但将奇偶像差区分开来, 而且进一步将不同族的波像差自动分开。这将减少像差之间的串扰误差, 提高波像差的检测精度。

图 8 为利用该线性模型测量 50 组波像差的统计结果, 依次展示了  $Z_5 \sim Z_{16}$  共 12 项泽尼克系数的最大误差(Max error)、标准差(STD error)、平均误差(Mean error)和均方根误差(RMS error)。本文

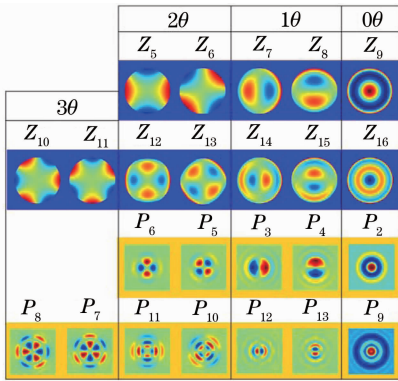


图 6 泽尼克系数与主成分矩阵的对应关系  
Fig. 6 Correlations between Zernike coefficients and principal component matrixes

15%左右。

### 3.2 离焦误差的影响及抑制方法

实际光刻工艺通过曝光一张 FEM 硅片获得工艺窗口,工艺窗口的中心位置所对应的焦面即为最佳焦面<sup>[19]</sup>。但是,由于各类像差的存在,工艺上得到的最佳焦面往往不是投影物镜的理想物理焦面。并且工件台也具有一定的定位误差,该误差值通常不超过 10 nm。然而,由点扩展函数的性质可知,球差与离焦误差对空间像具有相似的影响效果。基于本文检测标记的仿真表明 10 nm 的工件台 Z 向定位误差通常可以造成  $5 \times 10^{-3} \lambda$  的球差检测误差。这样的检测精度在实际应用中是不可接受的。所以,抑制离焦误差的影响对波像差检测具有实际意义。

#### 3.2.1 离焦误差的测量方法

为了消除由离焦误差引起的波像差检测误差,需要精确测量离焦误差,因此提出了一种迭代算法用以确定离焦误差。

不同焦面位置的空间像具有各自的细节特征,这些特征的差别可以用主成分来区分。利用不同焦面位置的前 30 阶主成分拟合实测空间像,得到的拟合残差主要为高阶主成分的舍位误差,拟合残差越小,则表明主成分所在焦面越接近实测空间像所在焦面。于是,可以建立不同焦面位置的主成分模型数据库,分别拟合实测空间像,以拟合残差最小为原则确定实测空间像离焦误差。

由于实测空间像通常含有噪声,拟合残差中不但包括有用的主成分高阶舍位残差信息,也同时包括无用的空间像噪声信息。为了提高信噪比,使主成分的高阶舍位残差显著大于空间像噪声,两个相邻主成分模型之间的焦面距离不宜过小。本文使用 1 nm 作为主成分模型的 Z 向采样间距。同时,鉴于目前通常使用的光刻机工件台的定位误差较小,无需大范围地建立数据库。并且,由于该工作可以事先完成,作为像差检测时的数据库来调用,所以不必消耗额外的测量时间。

图 9 为空间像离焦误差测量流程图。通过采用离焦位置为 F 的主成分(PC)来拟合实测空间像,计算拟合残差的均方根值(RMS),并与之前离焦位置为 F(last)的拟合结果进行比较,保留残差均方根值小的一方,再根据算法选择下一个焦面位置 F(new),重复上述步骤直到获得最小拟合残差的离焦位置 F 为止。该过程可以利用优化算法,但每次选取的步长需要根据 PC 库中的模型确定。

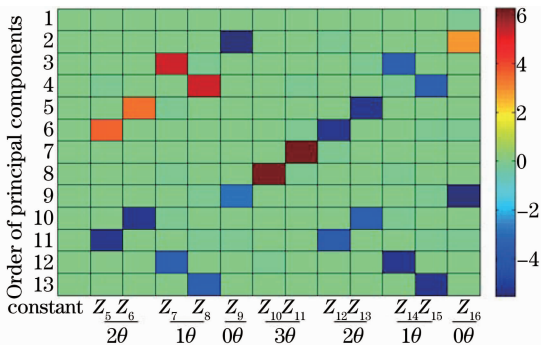


图 7 回归矩阵  
Fig. 7 Regression matrix

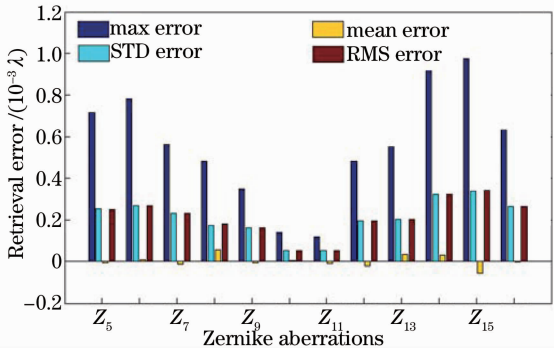


图 8 从 50 幅空间像中提取波像差的系统误差统计  
Fig. 8 Statistic results of system errors for 50 groups of Zernike coefficients measurements

提出的方法仅需一个相位环检测标记即可检测 12 项泽尼克系数,比 AMAI-PCA 增加 5 项<sup>[13]</sup>。其中,最大系统误差出现在五阶彗差  $Z_{14}$  和  $Z_{15}$ ,误差幅值低于  $1 \times 10^{-3} \lambda$ 。由于三波差  $Z_{10}$  和  $Z_{11}$  在回归矩阵中没有同族波像差内部间的串扰影响( $Z_{10}$  和  $Z_{11}$  分别与主成分 PC8 和 PC7 一一对应),所以像差测量精度最高,优于  $0.2 \times 10^{-3} \lambda$ 。而 AMAI-PCA 在  $-0.05\lambda \sim 0.05\lambda$  的波像差幅值范围内最大系统误差约为  $1.15 \times 10^{-3} \lambda$ ,本方法的像差测量精度提高

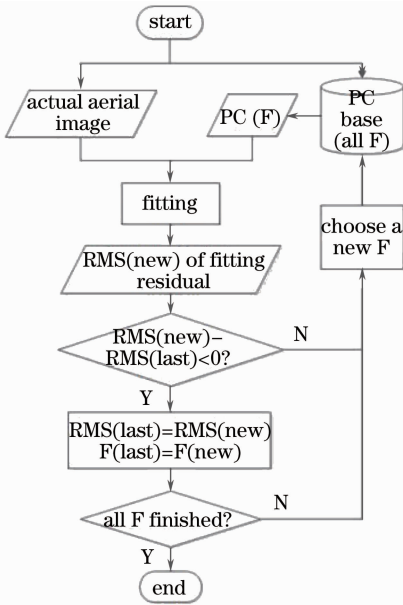


图 9 空间像离焦误差测量流程图

Fig. 9 Flowchart of measurement for aerial-image defocus error

在离焦误差确定之后,适用的模型也就确定了。再根据 2.1 节中的方法使用对应离焦位置的线性模型从实测空间像中提取波像差。

### 3.2.2 仿真测试

为了验证 3.2.1 节离焦误差确定方法的有效性,设计了仿真实验进行测试。测试中使用 Dr. LiTHO 生成 3.1 节中的 50 幅空间像对应的离焦空间像,离焦误差在  $-10 \sim 10$  nm 范围内服从正态随机分布。如图 10 所示,在  $\pm 10$  nm 离焦位置处的空间像相对于物理焦面处的空间像发生了细微变化。其中,空间像中心位置光强分布的离焦效应较为明显。

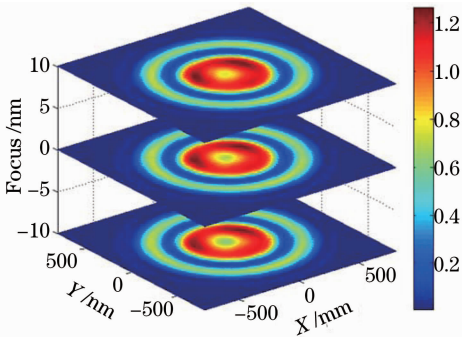


图 10 不同离焦位置的空间像

Fig. 10 Aerial-image slices at different focus positions

通过 3.1 节中理想物理焦面位置的线性模型测量了上述含有离焦误差的空间像,测量结果显示  $Z_9$  和  $Z_{16}$  的最大误差可达  $4.2 \times 10^{-3} \lambda$ ,而其余 10 项泽尼克系数的测量精度也有 10% 左右的下降。可见

离焦误差对波像差的检测精度影响很大。

接下来采用 3.2.1 节中的离焦误差测量方法,并使用对应离焦量的线性模型检测波像差。测量过程中,在  $-10 \sim +10$  nm 的范围内,每间隔 1 nm 建立一个线性模型,按照上节所述方法确定离焦误差大小并提取波像差。像差测量结果如图 11 所示,与图 8 相比,除球差  $Z_9$  和  $Z_{16}$  外,其余泽尼克系数的检测精度下降不足 1%。 $Z_9$  和  $Z_{16}$  的最大误差约增加  $0.4 \times 10^{-3} \lambda$ 。12 项泽尼克系数的最大误差发生在  $Z_{16}$  处,幅值为  $1.05 \times 10^{-3} \lambda$ ,比最大系统误差增大  $0.05 \times 10^{-3} \lambda$ ,但比没有定焦时的检测精度提高  $3 \times 10^{-3} \lambda$ 。同时,仿真过程的中间结果表明,离焦误差的测量精度优于 1 nm。

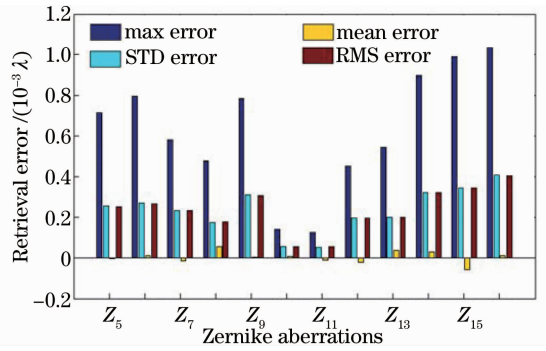


图 11 从 50 幅含有离焦误差的空间像中提取泽尼克系数的误差统计

Fig. 11 Statistic results of measurement errors for 50 groups of Zernike coefficients extracted from aerial images with defocus errors

空间像在采集过程中通常含有噪声<sup>[21]</sup>。按照实际噪声水平向上述 50 幅含有离焦误差的空间像中添加标准差为 0.03 的高斯噪声,并仍然按照本节所述的方法求解像差。12 项泽尼克系数的测量结

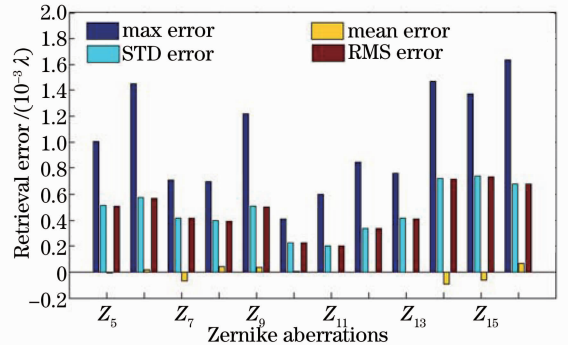


图 12 从 50 幅含有离焦误差和高斯噪声的空间像中提取泽尼克系数的误差统计

Fig. 12 Statistic results of measurement errors for 50 groups of Zernike coefficients extracted from aerial images with defocus errors and Gaussian noise

果如图 12 所示,与离焦误差对泽尼克系数测量精度的影响情况不同,空间像噪声导致所有泽尼克系数测量精度的下降。此时,最大误差仍然出现在  $Z_{16}$  项,约  $1.6 \times 10^{-3} \lambda$ 。这个最大误差仍然小于像差幅值的 10%,可以满足实际使用的需求。并且,实际的像差提取过程中,还会对空间像进行降噪处理,那么泽尼克像差的提取精度将更高。

## 4 结 论

提出了基于相位环空间像主成分分析的投影物镜波像差原位检测方法。设计了一种二维波像差检测标记——相位环。该相位环检测标记可以对投影物镜光瞳面波前进行全方向抽样,只需采集一幅焦面空间像即可提取出多种泽尼克系数。由于消除了不同族泽尼克系数之间的串扰,该方法比使用二元检测标记的 AMAI-PCA 的检测精度更高。另外,还提出了一种空间像离焦误差的测量方法。利用 Dr. LiTHO 的仿真测试表明,该方法可以检测 12 项泽尼克系数,检测精度比 AMAI-PCA 提高 15% 左右,检测速度可提高一倍以上。

## 参 考 文 献

- 1 Timothy Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography[J]. IBM J Res Develop, 1997, 41: 57-67.
- 2 Paul Graeupner, Reiner Garreis, Aksel Goehnermeier, *et al.*. Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA [C]. SPIE, 2003, 5040: 119-130.
- 3 Zicheng Qiu, Xiangzhao Wang, Qiongyan Yuan, *et al.*. Coma measurement by use of an alternating phase-shifting mask mark with a specific phase width [J]. Appl Opt, 2009, 48(2): 261-269.
- 4 Qiongyan Yuan, Xiangzhao Wang, Zicheng Qiu, *et al.*. Even aberration measurement of lithographic projection system based on optimized phase-shifting marks [J]. Microelectron Eng, 2009, 86: 78-82.
- 5 Hans van der Laan, Marcel Dierichs, Henk van Greevenbroek, *et al.*. Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification [C]. SPIE, 2001, 4346: 394-407.
- 6 Fan Wang, Xiangzhao Wang, Mingying Ma, *et al.*. Aberration measurement of projection optics in lithographic tools by use of an alternating phase-shifting mask [J]. Appl Opt, 2006, 45(2):

281-287.

- 7 Bo Peng, Xiangzhao Wang, Zicheng Qiu, *et al.*. Measurement technique for characterizing odd aberration of lithographic projection optics based on dipole illumination [J]. Opt Commun, 2010, 283: 2309-2317.
- 8 Tsuneyuki Hagiwara, Naoto Kondo, Irihama Hiroshi, *et al.*. Development of aerial image based aberration measurement technique [C]. SPIE, 2005, 5754: 1659-1669.
- 9 Tu Yuanying, Wang Xiangzhao, Yan Guanyong. Odd aberration measurement technique based on peak intensity difference of aerial image [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512002.
- 涂远莹, 王向朝, 闫观勇. 基于空间像峰值光强差的奇像差测量技术 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0512002.
- 10 J P Kirk, C J Proglar. Application of blazed gratings for determination of equivalent primary azimuthal aberration [C]. SPIE, 1999, 3679: 8-11.
- 11 Mingying Ma, Xiangzhao Wang, Fan Wang. Aberration measurement of projection optics in lithographic tools based on two-beam interference theory [J]. Appl Opt, 2006, 45(32): 8200-8208.
- 12 Lena Zavvalova, Bruce Smith. *In-situ* aberration monitoring using phase wheel targets [C]. SPIE, 2004, 5377: 172-184.
- 13 Lifeng Duan, Xiangzhao Wang, Anatoly Bourov, *et al.*. *In situ* aberration measurement technique based on principal component analysis of aerial image [J]. Opt Express, 2011, 19(19): 18080-18090.
- 14 Dongbo Xu, Xiangzhao Wang, Yang Bu, *et al.*. *In situ* aberration measurement technique based on multi-illumination settings and principal component analysis of aerial images [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(12): 121202.
- 15 Jishuo Yang, Xiangzhao Wang, Sikun Li, *et al.*. High order aberration measurement technique based on quadratic Zernike model with optimized source [J]. Opt Eng, 2013, 52(5): 053603.
- 16 M Born, E Wolf. Principles of Optics [M]. London: Cambridge University Press, 1999. 228-257.
- 17 I T Jolliffe. Principal Component Analysis [M]. New York: Springer, 2002. 150-165.
- 18 John O Rawlings, Sastry G Pantula, David A Dickey. Applied Regression Analysis: A Research Tool [M]. New York: Springer, 1998. 411-417.
- 19 Chris A Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: the Science of Microfabrication [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 56-71, 317-323.
- 20 T Fühner, T Schnattinger, G Ardelean, *et al.*. Dr. LiTHO: a development and research lithography simulator [C]. SPIE, 2007, 6520: 65203F.
- 21 Yang Jishuo, Li Sikun, Wang Xiangzhao, *et al.*. A projection lens aberration measurement method based on adaptive aerial image denoising [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0111003.
- 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.

栏目编辑: 李志兰