

# 基于多偏振照明的浸没式光刻机投影物镜 高阶波像差快速检测技术

诸波尔<sup>1,2</sup>, 李思坤<sup>1,2\*</sup>, 王向朝<sup>1,2</sup>, 戴凤钊<sup>1,2</sup>, 唐锋<sup>1,2</sup>, 段立峰<sup>3</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;

<sup>3</sup>上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203

**摘要** 提出了一种基于多偏振照明的浸没式光刻机投影物镜高阶波像差快速检测技术。通过采用一元线性采样方式,在不同偏振照明条件下采集浸没式光刻机投影物镜的空间像进行主成分分析,在快速建模的同时实现高阶波像差的高精度检测。与基于 Box-Behnken Design 统计抽样方法的超高数值孔径光刻投影物镜高阶波像差检测方法相比,所提技术有效降低了采样数,提高了采样效率,加快了建模速度。采用光刻仿真软件 PROLITH 对所提技术进行了仿真验证,并分析了照明方式对高阶波像差检测精度的影响。仿真结果表明,该技术对高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的检测精度优于  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ ,同时其建模速度提升了约 30 倍。

**关键词** 检测; 光刻; 高阶波像差; 多偏振照明; 空间像; 主成分分析

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0712004

## High-Order Aberration Measurement Technique for Immersion Lithography Projection Lens Based on Multi-Polarized illuminations

Zhu Boer<sup>1,2</sup>, Li Sikun<sup>1,2</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>, Dai Fengzhao<sup>1,2</sup>, Tang Feng<sup>1,2</sup>, Duan Lifeng<sup>3</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;

<sup>3</sup>Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** A high-order aberration measurement technique for immersion lithography projection lens based on multi-polarized illuminations is proposed. Aerial images of different polarized illuminations are collected by linear sampling, and the measurement model is built quickly based on principle component analysis; the high-order aberration of the immersion lithography projection lens is measured accurately. Compared with the high-order aberration measurement method based on a test target with eight angles, the proposed technique can reduce the number of samples, improve the efficiency of sampling, and speed up modeling. The lithographic simulator PROLITH is used to validate the proposed technique and analyze the influence of the illumination types on the accuracy of the high-order aberration measurement. The results show that the proposed technique can retrieve 60 terms of Zernike coefficients ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) with measurement accuracy better than  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ , and its modeling speed is improved by about 30 times.

**Key words** measurement; lithography; high-order aberration; multi-polarized illuminations; aerial image; principal component analysis

**OCIS codes** 110.3960; 120.3940; 220.1010

收稿日期: 2018-01-24; 收到修改稿日期: 2018-03-08

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1434100)、国家自然科学基金(61405210, 61474129)、国家科技重大专项(2017ZX02101006-002)

作者简介: 诸波尔(1991—),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: zhuboer@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。E-mail: lisikun@siom.ac.cn

# 1 引 言

极大规模集成电路制造的中心环节是光刻,光刻机是完成光刻的关键设备。投影物镜系统作为光刻机的关键组成部分之一,其波像差会导致光刻机成像质量的恶化和套刻精度的降低<sup>[1-5]</sup>。随着光刻技术的发展,特别是浸没式[超高数值孔径( $NA$ ),  $NA=1.35$ ]光刻机的出现,投影物镜系统的高阶波像差( $Z_{38} \sim Z_{64}$ )容限越来越严苛。为了保证图形从浸没式光刻机的掩模面高精度地转移到硅片面,需采用高精度的快速检测技术来控制投影物镜系统的高阶波像差<sup>[6]</sup>。

基于空间像的光刻机投影物镜波像差检测技术是目前普遍应用的一类检测技术,具有检测速度快、无需额外硬件的优势。目前,此类检测技术主要包括荷兰 ASML 公司研发的基于多照明设置的波像差检测技术 TAMIS<sup>[7]</sup>、日本 Nikon 公司研发的 Z37 AIS 技术<sup>[8]</sup>和本研究小组提出的基于空间像主成分分析的投影物镜波像差检测技术 (AMAI-PCA)<sup>[9-10]</sup>。当光刻机投影物镜的数值孔径小于 0.93 时,上述检测技术均可实现波像差检测,但无法检测浸没式光刻机投影物镜的波像差。2016 年,本研究小组优化了 AMAI-PCA 技术,提出了超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法<sup>[11]</sup>,该方法运用偏振照明设置及矢量光刻成像,实现了 33 阶

Zernike 像差( $Z_5 \sim Z_{37}$ )的检测。2017 年,本研究小组进一步提出了超高数值孔径光刻机投影物镜高阶波像差检测方法<sup>[12]</sup>,该方法改进了检测标记,建立了对高阶波像差敏感的检测模型,完成了 60 阶 Zernike 像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的检测。为了实现高阶波像差的高精度检测,该方法采用 Box-Behnken Design 统计抽样方式<sup>[13]</sup>对空间像进行了充分抽样,但该采样方式的建模时间较长,不利于快速建立浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的检测模型。

本文提出了一种基于多偏振照明的浸没式光刻机投影物镜高阶波像差快速检测方法。该方法采用一元线性采样方式,通过采集不同偏振照明方式下的空间像分别进行主成分分析(PCA)与多元线性回归分析(MLRA),在有效降低采样数的同时充分提取空间像所包含的波像差信息,提高了采样效率,加快了光刻机投影物镜高阶波像差检测模型的建立过程,并联合不同偏振照明方式下的待测空间像提取波像差,实现了浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的快速建模和高精度检测。此外,分析了照明方式对浸没式光刻机投影物镜高阶波像差检测精度的影响。

## 2 理 论

### 2.1 矢量光刻成像模型

典型的光刻成像系统包括光源、掩模(物面)、投影光学系统和硅片(像面)等<sup>[11]</sup>,如图 1 所示。

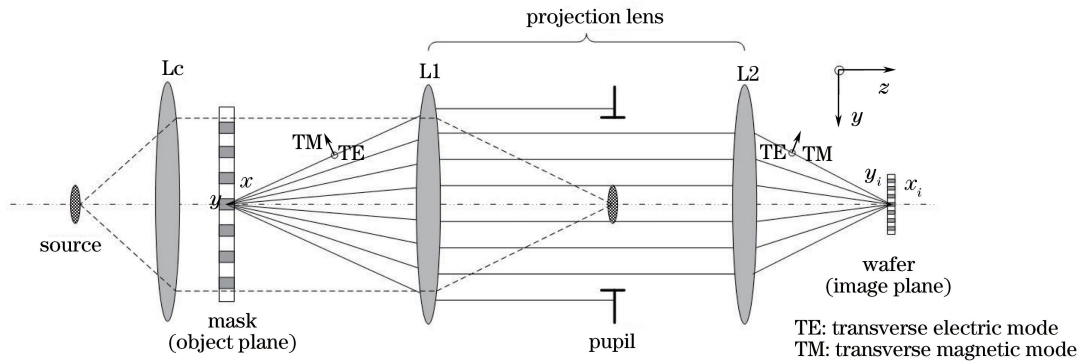


图 1 光刻成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of an optical lithographic imaging system

使用矢量成像模型来表述浸没式光刻机的成像过程。根据矢量光刻成像理论<sup>[14]</sup>,浸没式光刻机投影物镜的空间像光强分布可表示为  $O(\hat{f}, \hat{g})$

$$\begin{aligned}
 I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \Delta z) = & \int \dots \int J(\hat{f}, \hat{g}) H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') H^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') \times \\
 & [O(\hat{f}', \hat{g}') \mathbf{M}_0(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{E}_0] \times \\
 & [O(\hat{f}'', \hat{g}'') \mathbf{M}_0(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') \mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') \mathbf{E}_0]^* \times \\
 & \exp\{-i2\pi[(\hat{f}' - \hat{f}'')\hat{x}_i + (\hat{g}' - \hat{g}'')\hat{y}_i]\} d\hat{f} d\hat{g} d\hat{f}' d\hat{g}' d\hat{f}'' d\hat{g}'', \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:  $J(\hat{f}, \hat{g})$  为归一化的有效光源强度分布;  $H(\hat{f}, \hat{g})$  为光瞳函数;  $O(\hat{f}, \hat{g})$  为掩模的衍射谱;  $\mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g})$  为传输矩阵;  $\mathbf{E}_0$  为入射光的琼斯矢量; \* 表示共轭转置;  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$ 、 $\hat{f}$  和  $\hat{g}$  分别为归一化的像面、光瞳面坐标;  $\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$  为  $2 \times 2$  的琼斯矩阵, 表示光刻机投影物镜光瞳面上坐标  $(\hat{f}, \hat{g})$  处的偏振像差, 其表达式为

$$\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g}) = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 & a_2 - ia_3 \\ a_2 + ia_3 & a_0 - a_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $a_k (k=0, 1, 2, 3)$  为 Pauli 矩阵的复系数;  $x$  和  $y$  为像面坐标;  $a_0$  的相位表示波像差  $W$ 。

光刻成像过程是指在浸没式光刻机投影物镜的光瞳面上, 掩模上检测标记的衍射谱受到波像差的相位调制, 因此浸没式光刻机投影物镜的空间像中蕴含了波像差信息<sup>[15]</sup>。

通常运用一组互相正交的 Zernike 多项式来表征浸没式光刻机投影物镜中的波像差<sup>[16]</sup>, 其表达式为

$$W(f, g) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n R_n(f, g) = Z_1 + Z_2 f + Z_3 g + Z_4 [2(f^2 + g^2) - 1] + Z_5 (f^2 - g^2) + Z_6 \cdot 2fg + Z_7 [3(f^2 + g^2) - 2]f + Z_8 [3(f^2 + g^2) - 2]g + \dots, \quad (3)$$

式中:  $f$  和  $g$  为光瞳面坐标;  $R_n(f, g)$  为 Zernike 多项式。

在检测标记确定的情况下, 空间像的光强分布受到入射光琼斯矢量  $\mathbf{E}_0$  和波像差  $W$  的影响, 即在不同的偏振照明方式下, 即使波像差相同, 空间像光强分布也不完全相同。因此, 可以联合多种偏振照明方式来检测浸没式光刻机投影物镜的高阶波像差, 以提高检测精度。

## 2.2 空间像采样方法

超高数值孔径光刻机投影物镜高阶波像差检测方法采用 Box-Behnken Design 统计抽样方式对空间像进行抽样, 建立空间像光强分布与 Zernike 系数之间的关系模型<sup>[12]</sup>, 但由于 Box-Behnken Design 统计抽样方式需要生成大量的仿真空间像, 因此建模速度比较慢。

根据浸没式光刻机投影物镜的空间像与 Zernike 系数 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) 之间良好的线性关系<sup>[12]</sup>, 可以对空间像的抽样方式进行适当简化, 采用一元线性采样方式, 对每一项 Zernike 系数均采用三点抽样, 如图 2 所示。

为了检测高阶波像差 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ), 一元线性采

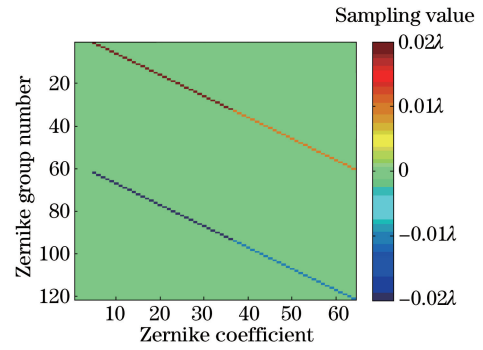


图 2 一元线性采样方式

Fig. 2 Schematic of linear sampling

样方式的建模过程只需生成 121 个仿真空间像, 而 Box-Behnken Design 统计抽样方式的建模过程需要生成 7092 个仿真空间像。因此, 一元线性采样方式有效加快了建模过程, 降低了建模难度。

## 2.3 波像差求解方法

基于浸没式光刻机投影物镜空间像与 Zernike 系数 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) 之间良好的线性关系<sup>[12]</sup>, 本研究所提技术的具体流程如图 3 所示, 该方法包括快速建模过程和像差求解过程。

快速建模过程如下:

1) 相关光刻仿真参数的定义: 照明方式采用  $N (N > 1)$  种偏振光照明; 检测标记采用八角度孤立空组合; Zernike 系数组合采用一元线性采样方式设定 60 项 Zernike 系数  $Z_5 \sim Z_{64}$  的组合  $Z_U$ ; 在此基础上, 随机设置一组偏振像差 (PT)。

2) 在第  $i (1 \leq i \leq N)$  种偏振照明方式下, 运用光刻仿真软件 PROLITH<sup>[17]</sup> 计算空间像集合  $I_i$ , 依次获得  $N$  种偏振照明方式下的空间像光强分布集合。

3) 依次对每一种偏振照明方式下的仿真空间像集合采用主成分分析<sup>[18]</sup>, 获得仿真空间像的主成分 ( $P_i$ ) 和对应的主成分系数 ( $V_i$ ) 的关系为

$$I_i = P_i \cdot V_i. \quad (4)$$

4) 对每一种偏振照明方式下得到的主成分系数 ( $V_i$ ) 和 Zernike 系数组合 ( $Z_U$ ) 进行多元线性回归分析<sup>[19]</sup>, 获得的回归矩阵 ( $\mathbf{R}_{M_i}$ ) 为

$$V_i = \mathbf{R}_{M_i} \cdot Z_U. \quad (5)$$

5) 联合每一种偏振照明方式下得到的回归矩阵, 获得联合回归矩阵  $\mathbf{R}_{MU}$  为

$$\mathbf{R}_{MU} = [\mathbf{R}_{M1} \quad \mathbf{R}_{M2} \quad \dots \quad \mathbf{R}_{MN}]^T. \quad (6)$$

根据联合回归矩阵  $\mathbf{R}_{MU}$  建立了多偏振照明方式下主成分系数与 Zernike 系数之间的线性关系。

像差求解过程如下:

1) 随机设定 60 项 Zernike 系数  $Z_5 \sim Z_{64}$ , 运用

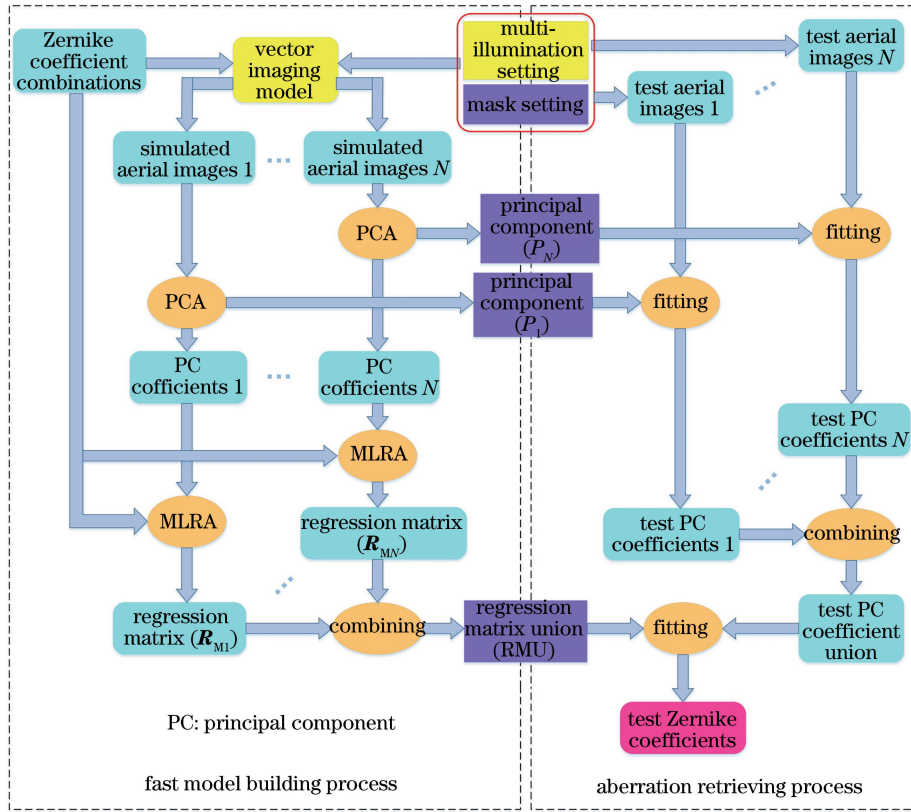


图 3 基于本研究所提技术的高阶波像差求解流程

Fig. 3 Process of high-order wave aberration based on the proposed technique

光刻仿真软件 PROLITH 依次获得  $N$  种偏振照明方式下的待测空间像；

2) 通过在不同照明方式下拟合快速建模过程中得到的主成分,依次获得  $N$  种偏振照明方式下待测空间像的主成分系数  $V'_1, V'_2, \dots, V'_N$ ;

3) 联合不同偏振照明方式下获得的主成分系数和快速建模过程中获得的联合回归矩阵  $R_{MU}$ , 获得待测浸没式光刻机投影物镜的高阶波像差为

$$\begin{bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ \vdots \\ V'_N \end{bmatrix} = R_{MU} \begin{bmatrix} 1 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ \vdots \\ Z_{64} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$Z_5 \sim Z_{64}$  中单项 Zernike 系数测量误差  $(\tau_{mean} + 3 \times \tau_{std})$ , 其中  $\tau_{mean}$  为测量误差平均值,  $\tau_{std}$  为测量误差的标准差) 的最大值为高阶波像差检测精度  $\tau$ , 即  $\tau = \max(\tau_{mean} + 3 \times \tau_{std})$ 。

### 3 仿真实验与分析

#### 3.1 浸没式光刻机投影物镜高阶波像差快速检测仿真实验

为了评估本研究所提技术的性能,对浸没式光

刻机投影物镜高阶波像差快速检测进行相应的仿真测试,并与先前提出的基于空间像测量的高阶波像差检测方法<sup>[12]</sup>(以下简称“原检测方法”)进行对比。

浸没式光刻机投影物镜中存在的主要高阶波像差为  $Z_{38} \sim Z_{64}$ , 其像差幅值远比低阶波像差小<sup>[12]</sup>, 因此,随机生成了 50 组测试用 Zernike 系数,将其输入到光刻仿真软件 PROLITH<sup>[17]</sup> 中获得测试空间像,并对浸没式光刻机投影物镜的高阶波像差进行检测。在相同的条件下使用原检测方法进行高阶波像差的检测,表 1 所示为实验设置的仿真条件。

图 4 所示为所采用的四极照明(部分相干因子为  $[\sigma_{cen}, \sigma_{rad}] = [0.8, 0.3]$ , 偏振状态分别为沿  $x$  方向线偏振和沿  $y$  方向线偏振)。本研究所提技术采用图 4 所示的两种偏振照明方式,原检测方法采用图 4(a)或图 4(b)的偏振方式。图 5 所示为研究所提技术采用的检测标记,由 8 个不同方向取向的孤立空组成,8 个方向的取向分别为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$  和  $150^\circ$ , 每个孤立空的线宽为 250 nm,周期为 3000 nm。

生成 50 组随机 Zernike 系数,  $Z_5 \sim Z_{64}$  在其幅值范围内均呈正态分布,其中  $Z_5 \sim Z_{36}$  的幅值范围为  $[-0.02\lambda, 0.02\lambda]$ ,  $Z_{37} \sim Z_{64}$  的幅值范围为

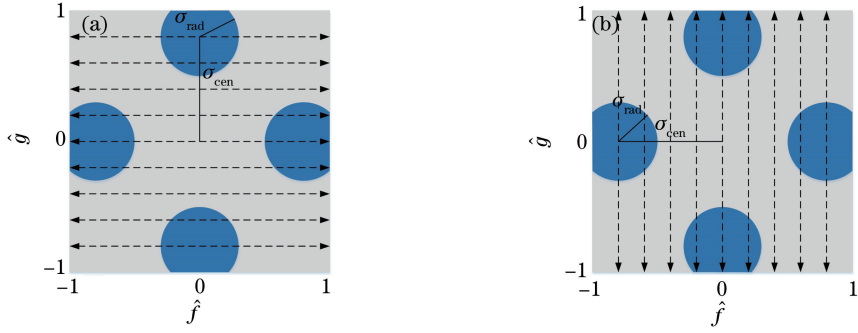


图 4 光源照明方式。(a)  $x$  方向线偏振;(b)  $y$  方向线偏振  
Fig. 4 Illumination types. (a)  $x$ -polarization; (b)  $y$ -polarization

表 1 仿真设置  
Table 1 Simulation settings

	Proposed technique	Previous method
Source		
Wavelength $\lambda$ /nm	193	193
Illumination type	quadrupole illumination	quadrupole illumination
Polarization type	$x$ -polarization & $y$ -polarization	$x$ -polarization / $y$ -polarization
Partial coherence factors $\sigma_{cen}, \sigma_{rad}$	0.8, 0.3	0.8, 0.3
Detected target		
Pattern of the target	binary target	binary target
Linewidth of the target /nm	250	250
Pitch of the target /nm	3000	3000
Orientation	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$
Statistical sampling method		
Statistical sampling	Linear sampling	Box-Behnken Design
Projection lens		
NA	1.35	1.35
Input aberration type	$Z_5 - Z_{64}$	$Z_5 - Z_{64}$
Input single aberration value	$Z_5 - Z_{36} : -0.02\lambda - 0.02\lambda :$	$Z_5 - Z_{36} : -0.02\lambda - 0.02\lambda$
	$Z_{37} - Z_{64} : -0.01\lambda - 0.01\lambda$	$Z_{37} - Z_{64} : -0.01\lambda - 0.01\lambda$
Polarization aberration	$Rea_0 - Rea_3 : -0.15 - 0.15$	$Rea_0 - Rea_3 : -0.15 - 0.15$
	$Ima_0 = 0$	$Ima_0 = 0$
	$Ima_1 - Ima_3 : -0.02\lambda - 0.02\lambda$	$Ima_1 - Ima_3 : -0.02\lambda - 0.02\lambda$
Lithographic image model		
Lithographic image model	Vector imaging model	Vector imaging model
Aerial image sampling		
Sampling range /nm	$x/y$ direction: $-900 - 900$	$x/y$ direction: $-900 - 900$
	$z$ direction: $-2000 - 2000$	$z$ direction: $-2000 - 2000$
Sampling interval /nm	$x/y$ direction: 30	$x/y$ direction: 30
	$z$ direction: 125	$z$ direction: 125

$[-0.01\lambda, 0.01\lambda]^{[20]}$ , 偏振像差由琼斯矩阵  $\mathbf{J}_{Jones}$  ( $\hat{f}, \hat{g}$ ) 表示, 系数  $a_0$  的幅值和  $a_1 \sim a_3$  实部的范围为  $[-0.15, 0.15]$ , 系数  $a_0$  的相位为  $0, a_1 \sim a_3$  的虚部在  $[-0.02\lambda, 0.02\lambda]$  范围内<sup>[21-23]</sup>。

图 6 所示分别为采用沿  $x$  方向线偏振照明和

沿  $y$  方向线偏振照明方式下的空间像光强分布, 以及两者的差值, 图 6(a) 和图 6(b) 均为施加了相同三级球差  $Z_9 = 0.02\lambda$  的空间像光强分布。其余的 Zernike 系数也有相似的特性。

本研究所提技术根据浸没式光刻机投影物镜的

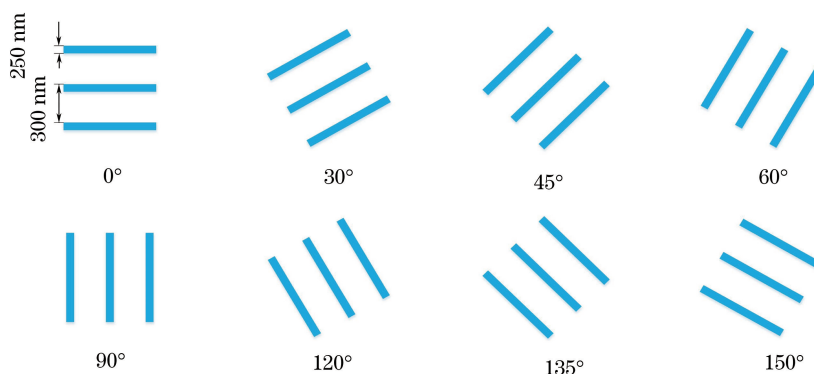


图 5 不同取向的检测标记

Fig. 5 Schematic of the test target at different directions

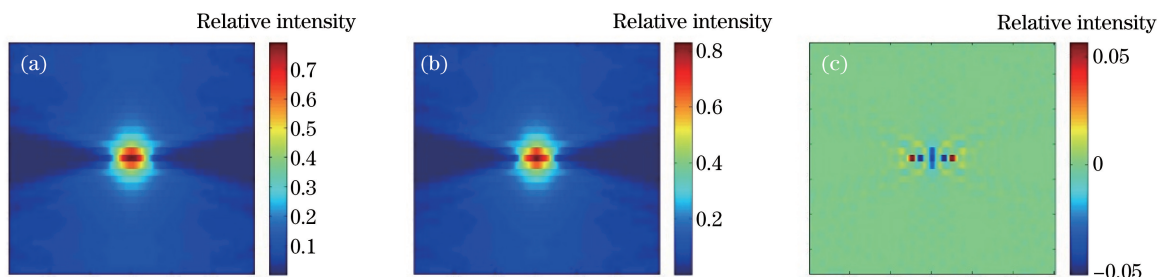


图 6 建模空间像。(a)  $x$  方向线偏振照明;(b)  $y$  方向线偏振照明;(c)  $x$ 、 $y$  方向线偏振照明的差值

Fig. 6 Aerial images. (a)  $x$ -polarized illumination; (b)  $y$ -polarized illumination; (c) difference of polarized illumination between  $x$  and  $y$  directions

空间像形变特征来检测波像差,形变特征越明显,波像差求解就越精确。可见,基于多偏振照明建立的波像差检测模型有助于改善高阶波像差的求解精度。

采用本研究所提技术检测 50 组生成的测试空间像,统计结果如图 7 所示。由图 7 可知:最大平均误差出现在 5 级 Y 彗差  $Z_{15}$  处,为 0.0199 nm;最大标准差出现在 5 级 30° 旋转三波差  $Z_{10}$  处,为 0.0670 nm,检测精度为 0.2037 nm。由此可知,本研究所提技术在上述 Zernike 系数条件下的检测精度优于  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ 。

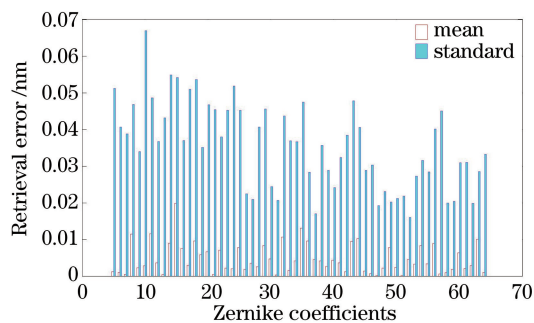


图 7 采用本研究所提技术获得的  $Z_5 \sim Z_{64}$  检测结果

Fig. 7 Measurement results ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) obtained by the proposed technique

采用原检测方法检测 50 组测试空间像,统计结果如图 8 所示,其中图 8(a)为沿  $x$  方向线偏振照明方式下的检测结果,图 8(b)为沿  $y$  方向线偏振照明方式下的检测结果。由图 8 可知:在沿  $x$  方向线偏振照明方式下,高阶波像差 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) 检测的最大平均误差和最大标准差分别为 0.0129 nm 和 0.0626 nm,检测精度为 0.1980 nm;在沿  $y$  方向线偏振照明方式下,高阶波像差 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) 检测的最大平均误差和最大标准差分别为 0.0190 nm 和 0.0653 nm,检测精度为 0.2150 nm。

由仿真结果(图 7 和图 8)可知,本研究所提技术对浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的检测精度与原检测方法相当,但建模速度提升了 30 倍左右。

相比于 Box-Behnken Design 统计抽样方式,一元线性采样方式的样本抽样不完全充分,因此采用一元线性采样方式建立的快速检测模型求解高阶波像差时会损失一部分检测精度,但建模速度可以得到大幅提升。

在多偏振照明方式下,由于相同波像差在不同偏振照明方式下的空间像光强分布不同,联合不同偏振照明方式下的空间像求解高阶波像差时,空间

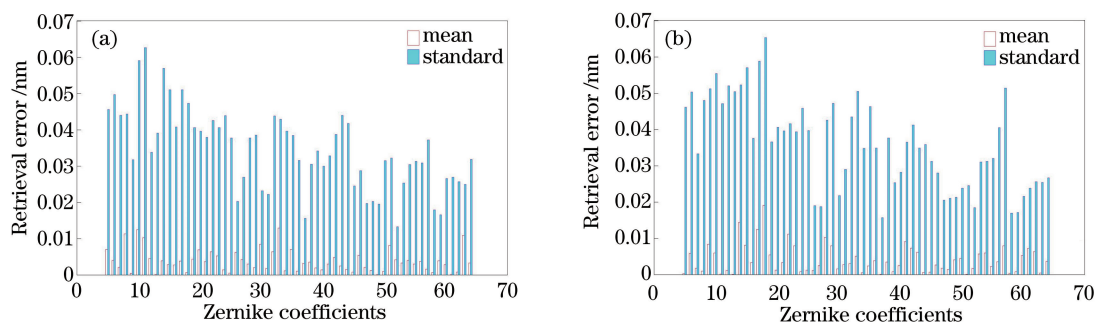


图 8 采用原检测方法获得的  $Z_5 \sim Z_{64}$  检测结果。(a)  $x$  方向线偏振照明;(b)  $y$  方向线偏振照明  
Fig. 8 Measurement results ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) obtained by the previous method. (a)  $x$ -polarized illumination;  
(b)  $y$ -polarized illumination

像形变特征更为明显,检测精度得到显著提高,弥补了因不完全充分采样而损失的检测精度。因此,本研究所提技术采用的多偏振照明方式和一元线性采样方式可以降低采样数,提高采样效率,加快建模速度,实现了高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的快速建模,并获得了较高的精度检测。

图9所示为两种常用的偏振照明方式。采用

本研究所提技术在这两种偏振照明方式下检测 50 组测试空间像,其余条件不变,高阶波像差检测结果如图 10 所示。

在联合径向偏振和切向偏振照明方式下,高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )检测的最大平均误差和最大标准差分别为 0.0194 nm 和 0.0614 nm,检测精度为 0.1860 nm,优于  $0.94 \times 10^{-3} \lambda$ 。

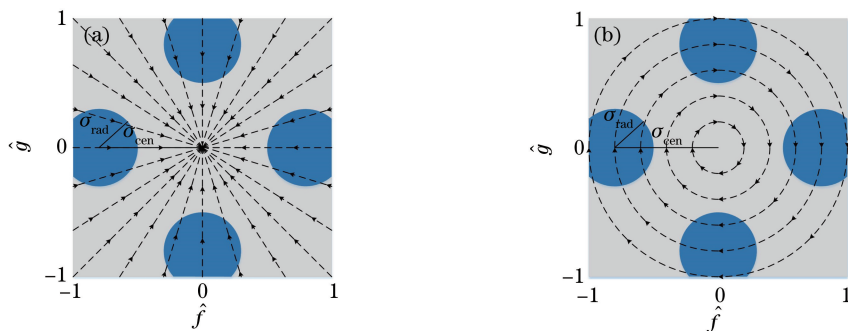


图 9 偏振照明方式。(a)径向偏振;(b)切向偏振  
Fig. 9 Polarized illumination types. (a) Radial polarization; (b) tangential polarization

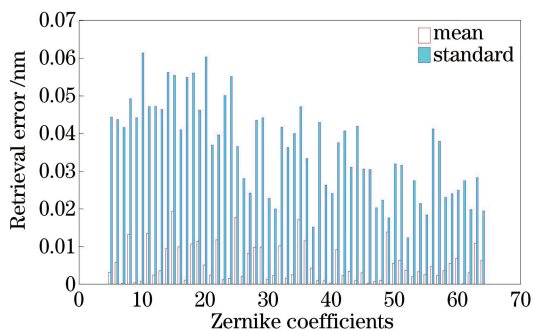


图 10 采用本研究所提技术获得的  $Z_5 \sim Z_{64}$  检测结果  
Fig. 10 Measurement results ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) obtained by the proposed technique

### 3.2 照明方式对高阶波像差检测精度的影响

浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的检测精度会受到照明方式的影响,因此,在采用本研究所提技

术进行高阶波像差检测时,为了选取合理的照明方式,需要研究照明方式对高阶波像差检测精度的影响。

在相同的检测标记条件下,采用不同的照明方式进行仿真实验,照明方式分别为传统照明、环形照明和二级照明,多偏振照明方式均采用联合沿  $x$ 、 $y$  方向的线偏振照明方式。分别检测 50 组测试空间像的高阶波像差,统计结果如表 2 所示。

由表 2 可知:在传统照明方式下,高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )检测的最大平均误差和最大标准差分别为 0.0791 nm 和 0.1318 nm,检测精度为 0.4446 nm;在环形照明方式下,高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )检测的最大平均误差和最大标准差分别为 0.0182 nm和 0.0748 nm,检测精度为 0.2284 nm;在二级照明方式下,高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )检测的最

表 2 不同照明方式下的高阶波像差检测结果

Table 2 High-order aberrations measurement results at different illuminations

Illumination mode	Partial coherence factors	Maximum mean error /nm	Maximum standard error /nm	Accuracy /nm
Conventional illumination	$\sigma=0.65$	0.0791	0.1318	0.4446
Annular illumination	$[\sigma_{out}, \sigma_{in}]=[0.9, 0.7]$	0.0182	0.0748	0.2284
Dipole illumination	$[\sigma_{cen}, \sigma_{rad}]=[0.8, 0.2]$	0.0174	0.0591	0.1853

大平均误差和最大标准差分别为 0.0174 nm 和 0.0591 nm, 检测精度为 0.1853 nm。

综上所述, 浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的检测精度在二级照明、四级照明和环形照明方式下较优, 而在传统照明方式下的检测精度欠佳。

## 4 结 论

提出了一种基于多偏振照明的浸没式光刻机投影物镜高阶波像差快速检测技术。采用一元线性采样方式有效降低了采样数, 采集多种偏振照明方式下浸没式光刻机投影物镜的空间像, 提高了采样效率, 从而快速建立了高阶波像差检测模型, 完成了浸没式光刻机投影物镜高阶波像差的快速建模和高精度检测。在此基础上, 分析了照明方式对高阶波像差检测精度的影响。仿真结果表明, 本文方法的建模速度比原检测方法提升了约 30 倍, 其高阶波像差 ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) 的检测精度优于  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Brunner T A. Impact of lens aberrations on optical lithography [J]. IBM Journal of Research and Development, 1997, 41(1/2): 57-67.
- [2] Erdmann A, Arnz M. The impact of aberration averaging during step-and-scan on the photolithographic process [J]. Microelectronic Engineering, 1998, 41/42: 117-120.
- [3] Graeupner P, Garries R, Goehnermeier A, *et al.* Impact of wavefront errors on low kl processes at extremely high NA[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 119-130.
- [4] Ma M Y, Wang X Z, Wang F, *et al.* Novel method for measuring coma with fine overlay test marks[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1037-1042.  
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.
- [5] Wang L, Li S K, Wang X Z, *et al.* Source mask projector optimization method of lithography tools based on particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1022001.
- [6] 王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源掩模投影物镜联合优化方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1022001.
- [7] de Boeij W P, Pieterella R, Bouchoms I, *et al.* Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831L.
- [8] van der Laan H, Dierichs M, van Greevenroek H, *et al.* Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 394-407.
- [9] Hagiwara T, Kondo N, Hiroshi I, *et al.* Development of aerial image based aberration measurement technique [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 1659-1669.
- [10] Duan L F, Wang X Z, Bourov 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.
- [11] Xu D B, Wang X Z, Bu Y, *et al.* In situ aberration measurement technique based on multi-illumination settings and principal component analysis of aerial images [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(12): 121202.
- [12] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, *et al.* Aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0112002.  
诸波尔, 王向朝, 李思坤, 等. 超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0112002.
- [13] 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.
- [14] Box G E P, Behnken D W. Some new three level designs for the study of quantitative variables [J]. Technometrics, 1960, 2(4): 455-475.
- [15] Wong A K K. Optical imaging in projection micro-lithography [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.



- [15] Yang J S, Wang X Z, Li S K, *et al.* *In situ* aberration measurement method based on a phase-shift rings target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211004.  
杨济硕, 王向朝, 李思坤, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0211004.
- [16] Born M, Wolf E. *Principles of optics* [M]. New York: Springer Press, 1998: 411-417.
- [17] Mack C A. Lithography simulation in semiconductor manufacturing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5645: 63-83.
- [18] Jolliffe I. *Principal component analysis* [M]. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer Press, 2002: 150-165.
- [19] Rawlings J O, Pantula S D, Dickey D A. *Applied regression analysis: a research tool* [M]. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer-Verlag Press, 2008: 93-97.
- [20] Lai K, Gallatin G M, van de Kerckhof M A, *et al.* New paradigm in lens metrology for lithographic scanner: evaluation and exploration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 160-171.
- [21] Yamamoto N, Kye J, Levinson H J. Polarization aberration analysis using Pauli-Zernike representation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 65200Y.
- [22] Shen L N, Li S K, Wang X Z, *et al.* Analytical analysis for impact of polarization aberration of projection lens on lithographic imaging quality [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9426: 94261E.
- [23] Shen L N, Wang X Z, Li S K, *et al.* Measuring method of polarization aberration based on vector aerial image of alternating phase-shift mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0811003.  
沈丽娜, 王向朝, 李思坤, 等. 基于交替相移掩模矢量空间像的偏振像差检测方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0811003.