

# 超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法

诸波尔<sup>1,2</sup>, 王向朝<sup>1,2</sup>, 李思坤<sup>1,2</sup>, 孟泽江<sup>1,2</sup>, 张 恒<sup>1,2</sup>, 戴凤钊<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>上海微电子装备有限公司, 上海 201203

**摘要** 提出了一种基于八角度孤立空检测标记的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法。通过对八角度孤立空检测标记的空间像进行主成分分析(PCA)和多元线性回归分析,构建了超高 NA 光刻投影物镜的空间像光强分布与高阶波像差之间的线性模型,并基于该模型实现了高阶波像差的检测。与使用六角度孤立空检测标记的传统方法相比,本方法提高了光瞳面波前的采样效率,拓展了波像差检测范围,实现了超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的高精度检测。光刻仿真软件 PROLITH 的仿真结果表明,该方法可实现 60 项泽尼克系数( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的检测,检测精度优于  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ 。

**关键词** 测量; 光刻; 高阶波像差; 空间像; 主成分分析

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0412003

## High-Order Aberration Measurement Method for Hyper-NA Lithographic Projection Lens

Zhu Boer<sup>1,2</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>, Li Sikun<sup>1,2</sup>, Meng Zejiang<sup>1,2</sup>,  
Zhang Heng<sup>1,2</sup>, Dai Fengzhao<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 Co. Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** A high-order aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens based on a test target with eight angles is proposed. A linear model between aerial image intensity distribution of the hyper-NA lithographic projection lens and high-order aberrations is built by principal component analysis (PCA) and multivariate linear regression analysis for binary target with eight angles of aerial image. And the high-order aberration measurement is achieved based on the proposed model. Compared with the binary target with six angles in the conventional method, the proposed method improves the efficiency of pupil wavefront sampling, expands the measuring range of the wavefront aberrations, and achieves the high precision measurement of high-order aberrations( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) of the hyper-NA lithographic projection lens. Simulations with the lithographic simulator PROLITH show that the proposed method can realize the measurement for 60 terms of Zernike coefficients ( $Z_5 \sim Z_{64}$ ) with measurement accuracy better than  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ .

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

**OCIS codes** 120.3940; 110.3960; 220.1010

收稿日期: 2016-10-27; 收到修改稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(61275207, 61405210, 61474129)

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)

## 1 引 言

光刻机是极大规模集成电路制造的核心装备,投影物镜是光刻机最重要的分系统之一。投影物镜的波像差是影响光刻机套刻精度和成像分辨率的主要因素之一<sup>[1-4]</sup>。随着光刻技术从干式发展至浸没式,光刻机投影物镜的数值孔径(NA)增加到 1.35,高阶波像差(主要为  $Z_{38} \sim Z_{64}$ )的影响变得不可忽略。为了使掩模图形高保真度地转移到硅片上,需要对超高 NA 光刻投影物镜的高阶波像差进行相应的控制<sup>[5]</sup>。为此,需要一种快速、高精度的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法。

目前,超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测的主流技术是基于瞳面测量的波像差检测技术。2013 年,ASML 公司开发了一种基于多通道并行测量的波像差检测技术(PARIS)<sup>[5]</sup>。该技术基于横向剪切干涉原理,通过集成小型化干涉仪实现了 64 阶泽尼克像差的检测,其检测精度高,但集成难度大,需要额外的硬件成本。

基于空间像测量的波像差检测技术也是常见的一类技术,相比于基于瞳面测量的波像差检测技术,具有检测速度快、成本低、能实时检测光刻机投影物镜波像差的优点。典型的此类技术有 ASML 公司的多照明设置空间像测量技术(TAMIS)<sup>[6]</sup>、Nikon 公司的基于空间像传感器的波像差检测技术(Z37 AIS)<sup>[7]</sup>和本课题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>[8-9]</sup>。这几种波像差检测技术可实现 NA 小于 0.93 的光刻投影物镜的波像差检测,但无法实现超高 NA 光刻投影物镜波像差的检测。2016 年 1 月,本课题组改进了 AMAI-PCA 技术,提出了基于空间像主成分分析的超高 NA 光刻投影物镜波像差检测方法<sup>[10]</sup>。该方法使用偏振光照明和矢量成像模型,建立了与超高 NA 光刻机相匹配的检测模型,实现了 33 阶泽尼克像差的检测( $Z_5 \sim Z_{37}$ )。但由于检测标记的限制,该检测模型对高阶波像差的灵敏度较低,无法实现超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的高精度检测。

本文提出一种基于八角度孤立空检测标记的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法。首先建立超高 NA 光刻投影物镜的空间像光强分布与高阶波像差之间的线性关系。该方法采用八角度孤立空作为检测标记,实现了对投影物镜光瞳面波前的高效率采样,使得该检测标记的空间像包含高阶波像差信息。通过采集空间像进行主成分分析与多元线性回归分析,从而建立对投影物镜高阶波像差敏感的检测模型,实现超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的高精度检测。

## 2 原 理

### 2.1 检测标记的确立

根据 Hopkins 矢量部分相干成像理论<sup>[11]</sup>,超高 NA 光刻投影物镜的空间像光强分布可表示为

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

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  $3 \times 2$  的传输矩阵,表示光场从出射光瞳面到像面的映射,  $\mathbf{E}_0$  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坐标、光瞳面坐标。  $\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$  是  $2 \times 2$  的琼斯矩阵,表示投影物镜光瞳上坐标  $(\hat{f}, \hat{g})$  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,  $a_k$  ( $k=0, 1, 2, 3$ ) 是泡利矩阵的复数系数,  $a_0$  的幅值表示标量透射率,相位表示波像差  $W$ ,  $a_1 \sim a_3$  的实部和虚部分别表示不同本征偏振态之间的衰减和相位延迟。

光刻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>[12]</sup>,其表达式为

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

式中  $W$  表示波像差,  $\rho$  是光瞳面上的半径,  $\theta$  是方位角。

由(3)式可知,像面上任意一点的光强受光瞳面采样位置的影响,因此,光瞳面采样效率也决定了波像差检测的能力。本课题组提出过两种六角度孤立空检测标记,使 AMAI-PCA 技术具备了检测光刻投影物镜  $Z_5 \sim Z_{37}$  33 阶泽尼克像差的能力<sup>[10,13]</sup>。其中一种六角度孤立空检测标记的 6 个方向取向分别是  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  和  $150^\circ$ ,如图 1(a)所示。该检测标记在光瞳面的衍射谱也呈现相同的等角间隔,图 2(a)和(b)分别表示这 6 个方向对  $15^\circ$  旋转六波差( $Z_{38}$  和  $Z_{53}$ )光瞳面采样的效果,由图 2 可知,这 6 个方向的采样方式恰好与  $15^\circ$  旋转六波差光瞳面相位为零的位置相吻合,这意味着此 6 个方向的采样对  $Z_{38}$  和  $Z_{53}$  光瞳面上波前的幅值变化没有影响。因此这 6 个方向上的光瞳面采样对  $Z_{38}$  和  $Z_{53}$  没有效果,也就无法求解  $Z_{38}$  和  $Z_{53}$  这两个高阶泽尼克像差。

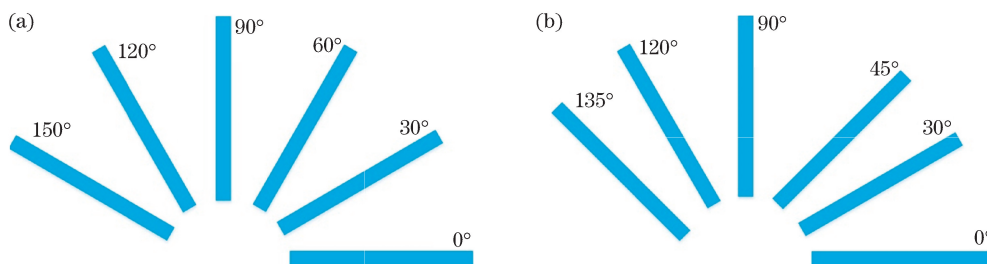


图 1 两种六角度孤立空检测标记

Fig. 1 Two kinds of test targets with six angles

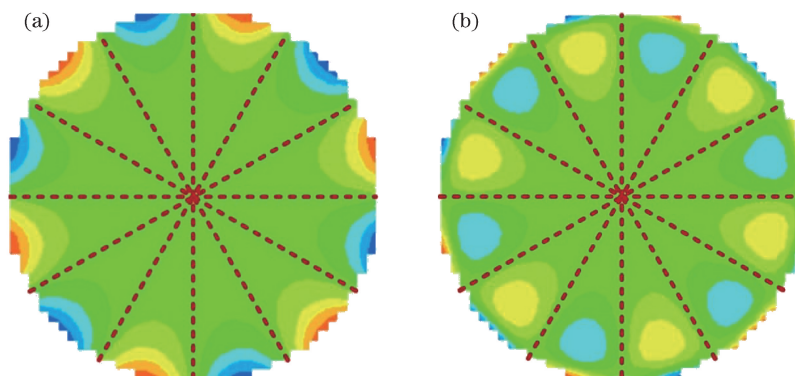


图 2 (a)六角度检测标记对  $Z_{38}$  的光瞳面采样效果;(b)六角度检测标记对  $Z_{53}$  的光瞳面采样效果

Fig. 2 (a) Effect of pupil sampling by the test target with six angles to  $Z_{38}$ ;

(b) effect of pupil sampling by the test target with six angles to  $Z_{53}$

检测标记的光瞳面采样效率也可引入条件数进行判断<sup>[14]</sup>,条件数判断方式将在第 2.2 节中进行详细介绍。另一种六角度孤立空检测标记的 6 个方向取向分别是  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  和  $135^\circ$ ,如图 1(b)所示。该检测标记可以实现  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 阶泽尼克像差的光瞳面采样,但该检测标记对高阶波像差的光瞳面采样效率较低(回归矩阵的条件数较大),因此波像差检测精度也较低。

为了实现超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的高精度检测,提出一种八角度孤立空检测标记,该检测标记由含 8 个方向取向的一维孤立空组合构成,孤立空宽度为 250 nm,周期为 3000 nm,8 个方向取向分别为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$  和  $150^\circ$ ,如图 3 所示。

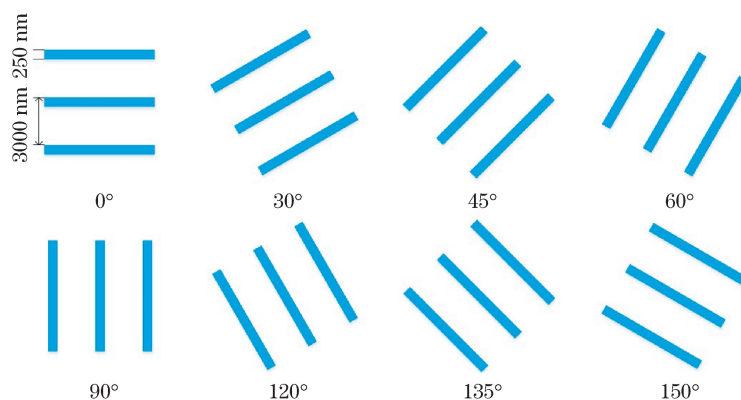
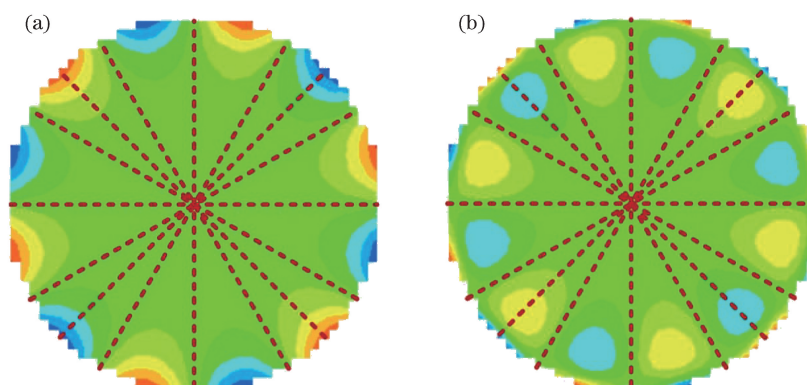


图 3 八角度孤立空检测标记

Fig. 3 Test target with eight angles

该检测标记的 8 个方向对  $15^\circ$  旋转六波差 ( $Z_{38}$  和  $Z_{53}$ ) 光瞳面采样的效果如图 4 所示。该检测标记对其余高阶泽尼克像差也可进行类似的高效率光瞳面采样, 因此, 该检测标记可以实现对  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 阶泽尼克像差的高效率光瞳面采样, 进而有利于实现  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 阶泽尼克像差的高精度检测。

图 4 (a) 八角度检测标记对  $Z_{38}$  的光瞳面采样效果; (b) 八角度检测标记对  $Z_{53}$  的光瞳面采样效果Fig. 4 (a) Effect of pupil sampling by the test target with eight angles to  $Z_{38}$ ;(b) effect of pupil sampling by the test target with eight angles to  $Z_{53}$ 

## 2.2 波像差提取方法

随着超高 NA 光刻机的发展, 对光刻机套刻精度和成像分辨率的要求越来越高, 光刻投影物镜的像差容忍也变得越来来越严苛, 投影物镜高阶波像差 (主要为  $Z_{38} \sim Z_{64}$ ) 的影响逐渐变得不可忽略, 为了实现超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的高精度检测, 需要建立投影物镜的空间像光强分布与高阶波像差泽尼克系数之间的线性关系。

以 11 级 X 彗差  $Z_{47}$  为例, 设置  $Z_{47}$  的幅值在  $[0, 0.05\lambda]$  区间以间隔  $0.005\lambda$  递增, 并设置一定的偏振像差, 该偏振像差由一个琼斯矩阵  $\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$  表示, 其中  $J_{xx}$ 、 $J_{xy}$ 、 $J_{yx}$  和  $J_{yy}$  的幅值和相位均采用泡利泽尼克多项式生成, 系数  $a_0$  的幅值和  $a_1 \sim a_3$  的实部范围为  $[-0.15, 0.15]$ , 系数  $a_0$  的相位为 0,  $a_1 \sim a_3$  的虚部范围为  $[-0.02\lambda, 0.02\lambda]$ <sup>[15-16]</sup>。依次测得空间像光强分布, 将得到的空间像光强分布分别与无波像差时的空间像光强分布作差, 并计算均方根值, 以泽尼克系数  $Z_{47}$  为横坐标, 计算得到的均方根值为纵坐标, 画出曲线, 如图 5 的 relation curve 所示。对曲线 relation curve 进行线性拟合, 拟合得到的线性关系如图 5 的 fit linear 所示。由图 5 可知, relation curve 与直线 fit linear 几乎是完全重合的, 因此, 可以认为在  $0.05\lambda$  的泽尼克系数幅值范围内, 空间像光强分布与泽尼克系数  $Z_{47}$  满足线性关系。

$Z_{38} \sim Z_{64}$  泽尼克像差中其余泽尼克系数也具有这种线性关系。由此建立了超高 NA 光刻投影物镜的空间像光强分布与高阶波像差泽尼克系数之间的线性关系。



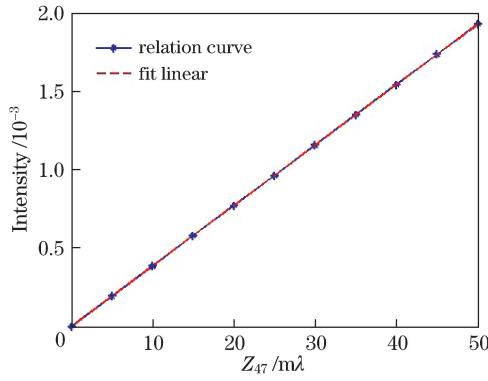


图 5 超高 NA 光刻投影物镜空间像光强分布与泽尼克系数  $Z_{47}$  的线性关系

Fig. 5 Linear relationship between the aerial image intensity distribution of the hyper-NA lithographic projection lens and Zernike coefficient  $Z_{47}$

基于此线性关系,提出了基于八角度孤立空检测标记的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法,该方法包括模型建立过程和像差求解过程。

模型建立过程主要包含以下 4 个步骤:

1) 定义仿真的光刻参数,如照明方式、掩模标记和泽尼克系数组合( $Z_U$ )等。照明方式采用偏振光照明,掩模标记采用八角度孤立空检测标记,泽尼克系数组合采用 Box-Behnken Design 统计抽样方法<sup>[17]</sup>设定 60 项泽尼克系数  $Z_5 \sim Z_{64}$  的组合  $Z_U$ ,并随机设定一组偏振像差  $V_{PT}$ ;

2) 应用光刻仿真软件 PROLITH<sup>[18]</sup>,计算空间像的光强分布;

3) 对仿真空间像进行主成分分析<sup>[19]</sup>,得到仿真空间像的主成分  $V_{PC}$  和相应的主成分系数  $V$ ;

4) 对主成分系数  $V$  和泽尼克系数组合  $Z_U$  进行多元线性回归分析<sup>[20]</sup>,得到回归矩阵  $R_M$ ,可以表示为

$$V = R_M \cdot Z_U, \quad (4)$$

根据线性回归矩阵  $R_M$  建立了主成分系数与泽尼克系数之间的线性关系。

像差求解过程:随机设定 60 项泽尼克系数  $Z_5 \sim Z_{64}$ ,采用光刻仿真软件 PROLITH 进行仿真,得到待测空间像,对待测空间像进行主成分分析,得到待测空间像的主成分系数,然后与(4)式得到的线性回归矩阵  $R_M$  按照最小二乘法进行拟合,得到待测超高 NA 光刻投影物镜波像差的 60 项泽尼克系数。

投影物镜波像差检测精度的高低取决于检测标记的光瞳面采样效率高,而光瞳面采样效率的高低可以引入条件数来判断,条件数是数学分析领域评价线性方程组对输入误差敏感性的度量参数<sup>[14]</sup>。对于上述超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测过程,回归矩阵  $R_M$ ,泽尼克系数  $Z_U$  与主成分系数  $V$  之间存在(4)式的线性关系。因此,可以引入回归矩阵的条件数来评价该检测模型的精度,可以表示为

$$V_{\text{cond}(R_M)} = \|R_M\| \cdot \|R_M^{-1}\|. \quad (5)$$

回归矩阵  $R_M$  的条件数反映了泽尼克系数  $Z_U$  对输入数据变化的灵敏度,表征了该线性系统的病态程度。回归矩阵  $R_M$  的条件数越小,由  $R_M$  相对误差引起的  $Z_U$  的相对误差及绝对误差就越小;反之,回归矩阵  $R_M$  的条件数越大, $Z_U$  的相对误差及绝对误差就越大。因此,回归矩阵  $R_M$  的条件数越小,光瞳面采样效率越高,波像差检测精度也越高。

波像差的检测精度定义为: $V_{\text{mean}} + 3 \times V_{\text{std}}$ 。

### 3 仿真测试与分析

为了对基于八角度孤立空检测标记的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法的性能进行评估,进行了超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测的仿真测试。

通常  $Z_{38} \sim Z_{64}$  是超高 NA 光刻投影物镜中存在的主要的高阶波像差,且像差幅值比低阶波像差要小得多,基于此,随机生成了 50 组测试用泽尼克系数,代入光刻仿真软件 PROLITH 生成测试空间像,并进行超

高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的检测, 仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation condition

Source	
Wavelength $\lambda$	193 nm
Illumination type	Quadrupole illumination
Polarization type	X-polarized
Partial coherence factors $\sigma_{\text{cen}}, \sigma_{\text{rad}}$	0.8, 0.3
Detected target	
Pattern of the target	Binary target with eight angles
Line width of the target	250 nm
Pitch of the target	3000 nm
Orientation	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$
Projection lens	
NA	1.35
Input aberration type	$Z_5 \sim Z_{64}$
Input single aberration value	$Z_5 \sim Z_{36}: -0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ $Z_{37} \sim Z_{64}: -0.01\lambda \sim 0.01\lambda$
Polarization aberration	$\text{Re}[a_0] \sim \text{Re}[a_3]: -0.15 \sim 0.15$ $\text{Im}[a_0] = 0$ $\text{Im}[a_1] \sim \text{Im}[a_3]: -0.02\lambda \sim 0.02\lambda$
Lithographic image model	
Lithographic image model	Vector imaging model
Aerial image sampling	
Sampling range	X/Y direction: $-2000 \sim 2000$ nm Z direction: $-900 \sim 900$ nm
Sampling interval	X/Y direction: 30 nm Z direction: 125 nm

本方法的光源照明方式及偏振状态如图 6 所示, 光源照明方式采用离轴照明中的四级照明, 其部分相干因子为  $[\sigma_{\text{cen}}, \sigma_{\text{rad}}] = [0.8, 0.3]$ , 光源点的偏振状态为沿 X 方向线偏振。

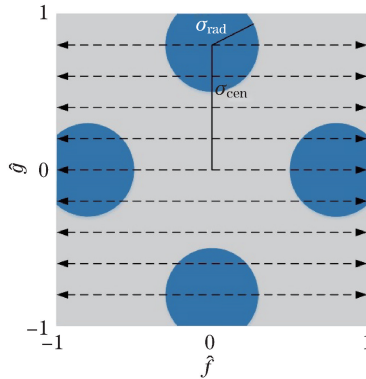


图 6 本方法的光源照明方式及偏振状态

Fig. 6 Illumination type and polarization state of the proposed method

随机生成 50 组泽尼克系数,  $Z_5 \sim Z_{36}$  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,  $Z_{37} \sim Z_{64}$  单项泽尼克系数幅值在  $-0.01\lambda \sim 0.01\lambda$  范围内服从正态分布<sup>[21]</sup>, 偏振像差由一个琼斯矩阵  $\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$  表示, 其中  $J_{xx}, J_{xy}, J_{yx}$  和  $J_{yy}$  的幅值和相位均采用泡利泽尼克多项式生成, 系数  $a_0$  的幅值和  $a_1 \sim a_3$  的实部范围为  $[-0.15, 0.15]$ , 系数  $a_0$  的相位为 0,  $a_1 \sim a_3$  的虚部范围为  $[-0.02\lambda, 0.02\lambda]$ <sup>[15-16]</sup>。

图 7(a) 为采用本方法检测 50 组含随机高阶波像差的测试空间像的统计结果, 依次所示为  $Z_5 \sim Z_{64}$

60 项泽尼克系数检测的平均误差和标准差。图 7 中, mean 为平均误差, std 为标准差。由此统计结果可知,  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差出现在 9 级  $\pm 45^\circ$  像散  $Z_{33}$ , 最大平均误差为 0.0129 nm;  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大标准差出现在 5 级三波差  $Z_{11}$ , 最大标准差为 0.0626 nm, 检测精度为 0.1980 nm。因此本方法在所述的单项泽尼克系数幅值范围内的检测精度优于  $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ 。

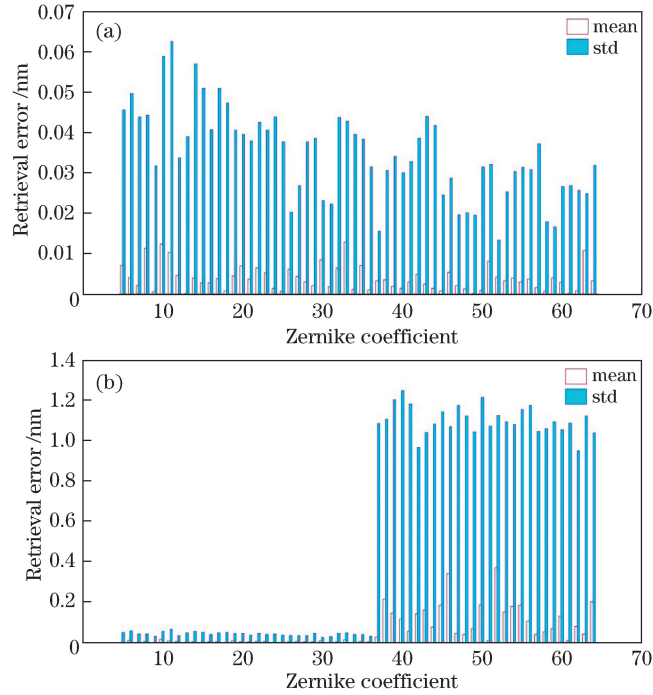


图 7 高阶波像差检测结果。(a)本方法;(b)传统方法

Fig. 7 High-order wavefront aberration measurement results. (a) Proposed method; (b) conventional method

图 7(b)为采用六角度孤立空检测标记( $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ )检测 50 组含随机高阶波像差的测试空间像的统计结果,依次所示为  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的平均误差和标准差。由此统计结果可知,  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.3729 nm;  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大标准差为 1.2568 nm, 检测精度为 3.8873 nm。由图 7(b)可知,采用此检测标记的  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数的检测精度较低,这主要体现在高阶泽尼克像差的检测上,  $Z_5 \sim Z_{64}$  的前 32 项泽尼克系数 ( $Z_5 \sim Z_{36}$ ) 的检测精度仍较高,其最大平均误差为 0.0169 nm;最大标准差为 0.0664 nm,检测精度为 0.2073 nm。

当采用八角度孤立空检测标记时,回归矩阵  $\mathbf{R}_M$  的条件数为 6.1710;当采用六角度孤立空检测标记时,回归矩阵  $\mathbf{R}_M$  的条件数为 8.5651。由此可以看出,六角度孤立空检测标记对超高 NA 光刻投影物镜的光瞳面采样效率较低,因此,建立的检测模型对高阶波像差的灵敏度也较低,导致最终的波像差检测精度较低;而本方法所采用的八角度孤立空检测标记可以实现对光瞳面波前的高效率采样,实现了  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数的高精度检测。

改变照明光源中光源点的偏振方式,分别换成径向偏振和切向偏振两种情况,如图 8 所示。其余条件不变,采用本方法检测 50 组含随机高阶波像差的测试空间像,对照明光源点沿径向偏振情况的高阶波像差检测结果如图 9(a)所示;对照明光源点沿切向偏振情况的高阶波像差检测结果如图 9(b)所示。

相比于照明光源点沿 X 方向线偏振的情况,这两种偏振照明方式下,  $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差和最大标准差均有微小的变化,最大平均误差小于 0.0184 nm,最大标准差小于 0.0821 nm,检测精度优于 0.251 nm。在这两种偏振照明方式下,当单项泽尼克系数  $Z_5 \sim Z_{36}$ 、 $Z_{37} \sim Z_{64}$  的幅值分别在  $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$  和  $-0.01\lambda \sim 0.01\lambda$  范围内时,超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的检测精度优于  $1.3 \times 10^{-3} \lambda$ 。

分别采用传统照明、环形照明和二级照明对本方法进行仿真测试,传统照明的部分相干因子  $\sigma = 0.65$ , 环形照明的部分相干因子  $[\sigma_{out}, \sigma_{in}] = [0.9, 0.7]$ , 二级照明的部分相干因子  $[\sigma_{cen}, \sigma_{rad}] = [0.8, 0.2]$ , 3 种照明

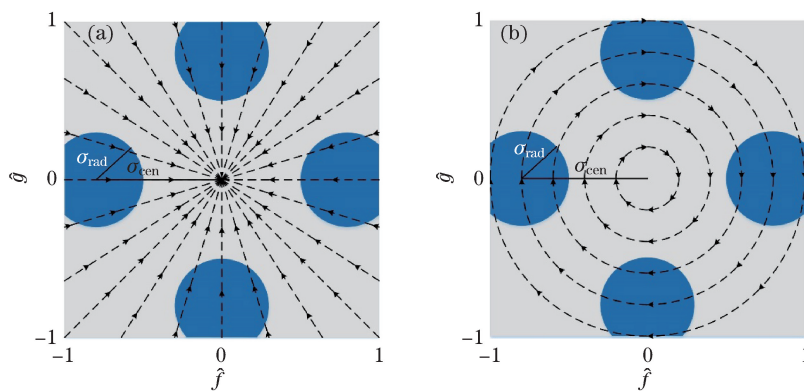


图 8 照明方式示意图。(a)径向偏振;(b)切向偏振

Fig. 8 Schematic diagram of illumination type. (a) Radial polarization; (b) azimuthal polarization

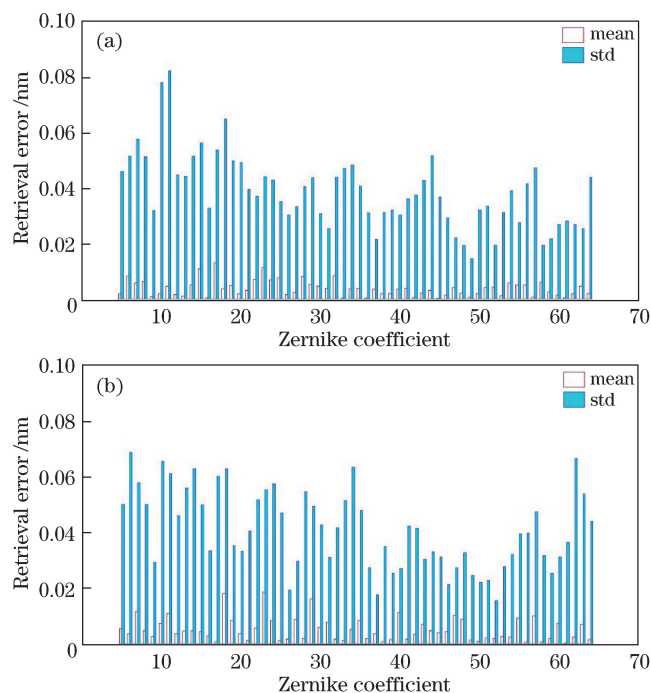


图 9 不同照明条件下的高阶波像差检测结果。(a)径向偏振;(b)切向偏振

Fig. 9 High-order wavefront aberration measurement results by use of different illumination types.

(a) Radial polarization; (b) azimuthal polarization

方式中光源点的偏振状态均为沿  $X$  方向线偏振,检测标记不变,检测 50 组含随机高阶波像差的测试空间像的统计结果如表 2 所示。在传统照明条件下, $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.2260 nm,最大标准差为 0.1259 nm,检测精度为 0.4760 nm;在环形照明条件下, $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.0140 nm,最大标准差为 0.0759 nm,检测精度为 0.2335 nm;在二级照明条件下, $Z_5 \sim Z_{64}$  60 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.0154 nm,最大标准差为 0.0547 nm,检测精度为 0.1723 nm。

由此结果可知,在离轴照明(环形照明、四级照明、二级照明)条件下,超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差

表 2 不同照明条件下的高阶波像差检测结果

Table 2 High-order wavefront aberration measurement results under different illumination conditions

Condition of illumination	Maximum mean error	Maximum standard error	Accuracy
Conventional illumination	0.2260 nm	0.1259 nm	0.4760 nm
Annular illumination	0.0140 nm	0.0759 nm	0.2335 nm
Dipole illumination	0.0154 nm	0.0547 nm	0.1723 nm



的检测精度优于传统照明条件下的检测精度。

检测标记的制造存在一定的制造误差,因此,需要研究八角度孤立空检测标记的制造误差对超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测的影响。

检测标记的线宽制造误差一般控制在 $\pm 3$  nm 以内,取向误差一般控制在 $\pm 1^\circ$ 以内。因此,在研究检测标记制造误差的影响时,分别选取检测标记的孤立空宽度误差为 $\pm 3$  nm 的两种极限情况和取向误差在 $90^\circ$ 方向偏离 $\pm 1^\circ$ 的两种极限情况,使用本方法对超高 NA 光刻投影物镜的高阶波像差进行检测,光源照明方式采用四级照明,其部分相干因子为 $[\sigma_{\text{cen}}, \sigma_{\text{rad}}]=[0.8, 0.3]$ ,光源点的偏振状态为沿 X 方向线偏振。在这 4 种制造误差情况下,分别检测 50 组含随机高阶波像差的测试空间像的统计结果如表 3 所示。

表 3 检测标记制造误差情况下的高阶波像差检测结果

Table 3 High-order wavefront aberration measurement results under the conditions of different manufacturing errors of the test target

Manufacturing error	Maximum mean error	Maximum standard error	Accuracy
Width error: $-3$ nm	0.0343 nm	0.0950 nm	0.3124 nm
Width error: $+3$ nm	0.0398 nm	0.1509 nm	0.4708 nm
Angle error: $-1^\circ$	0.0188 nm	0.0725 nm	0.2205 nm
Angle error: $+1^\circ$	0.0310 nm	0.0828 nm	0.2594 nm

取向误差存在于其余 7 个方向时对高阶波像差检测的影响与取向误差存在于 $90^\circ$ 方向的情况类似。表 3 中所列为检测标记的制造误差在极限情况下的高阶波像差检测精度,一般检测标记的制造误差低于极限情况,高阶波像差检测精度也会更高。因此,当八角度孤立空检测标记存在一定的制造误差时,超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的检测精度会有些许降低,但仍可实现高阶波像差的高精度检测。

## 4 结 论

提出了一种基于八角度孤立空检测标记的超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法。设计了一种八角度孤立空组合作为检测标记,实现了对投影物镜光瞳面波前的高效率采样。通过采用偏振光照明和矢量成像模型表征超高 NA 光刻投影物镜的空间像,建立了超高 NA 光刻投影物镜的空间像光强分布与高阶波像差之间的线性关系。通过采集空间像进行主成分分析与多元线性回归分析,从而建立了对投影物镜高阶波像差敏感的检测模型,实现了超高 NA 光刻投影物镜泽尼克像差 $Z_5 \sim Z_{64}$ 的高精度检测。利用光刻仿真软件 PROLITH 的仿真测试表明,该方法将泽尼克像差的检测范围拓展至 $Z_{64}$ ,对 60 项泽尼克系数( $Z_5 \sim Z_{64}$ )的检测精度优于 $1.03 \times 10^{-3} \lambda$ ,为超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差的检测提供了一种高速度、高精度、低成本的检测方法。

## 参 考 文 献

- [1] Brunner T A. Impact of lens aberrations on optical lithography[J]. IBM J Res Develop, 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]. Microelectron Eng, 1998, 41-42(2): 117-120.
- [3] Graepner P, Garries R B, Goehnermeier A, *et al.* Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA[C]. SPIE, 2003, 5040: 119-130.
- [4] Ma Mingying, Wang Xiangzhao, Wang Fan, *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] de Boeij W P, Pieterella R, Bouchoms I, *et al.* Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[C]. SPIE, 2013, 8683: 86831L.
- [6] van der Laan H, Dierichs M, van Greevenroek H, *et al.* Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification[C]. SPIE, 2001, 4346: 394-407.
- [7] Hagiwara T, Kondo N, Hiroshi I, *et al.* Development of aerial image based aberration measurement technique[C]. SPIE, 2005, 5754: 1659-1669.

- [8] 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]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18080-18090.
- [9] 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.
- [10] Zhu Boer, Wang Xiangzhao, Li Sikun, *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.
- [11] Wong A K K. Optical imaging in projection microlithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005, TT66: 102-107.
- [12] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 411-417.
- [13] Yang J S, Wang X Z, Li S K, *et al.* High-order aberration measurement technique based on quadratic Zernike model with optimized source[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(5): 053603.
- [14] Ward C, David K. Numerical mathematics and computing[M]. Brooks/Cole Publishing, 2008: 321-322.
- [15] Norihiro Y, Jongwook K, Harry J L. Polarization aberration analysis using Pauli-Zernike representation[C]. SPIE, 2007, 6520: 65200Y.
- [16] Shen Lina, Li Sikun, Wang Xiangzhao, *et al.* Analytical analysis for impact of polarization aberration of projection lens on lithographic imaging quality[C]. SPIE, 2015, 9426; 94261E.
- [17] 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.
- [18] Chris A M. Lithography simulation in semiconductor manufacturing[C]. SPIE, 2005, 5645: 63-83.
- [19] Jolliffe I T. Principal component analysis[M]. New York: Springer Press, 2002: 150-165.
- [20] Rawlings J O, Pantula S G, Dickey D A. Applied regression analysis: a research tool[M]. New York: Springer Press, 2008: 93-97.
- [21] Lai K, Gallatin G M, van de Kerckhof M, *et al.* New paradigm in lens metrology for lithographic scanner: evaluation and exploration[C]. SPIE, 2004, 5377: 160-171.