

超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法

诸波尔^{1,2} 王向朝^{1,2} 李思坤^{1,2} 闫观勇^{1,2} 沈丽娜^{1,2} 段立峰³

¹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

²中国科学院大学, 北京 100049

³上海微电子装备有限公司, 上海 201203

摘要 提出了一种基于空间像主成分分析的超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法。通过采用偏振光照明和矢量光刻成像模型并考虑投影物镜的偏振像差, 准确表征了超大数值孔径光刻机的空间像, 从而提高了像差检测模型的精度, 实现了超大数值孔径光刻机投影物镜33项泽尼克像差($Z_5\sim Z_{37}$)的高精度检测。相比于原基于空间像主成分分析的投影物镜成像差检测技术(AMAI-PCA)方法, 所提方法适用于超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测。采用光刻仿真软件PROLITH对所提方法的检测精度进行了仿真验证, 并分析了空间像采样间隔对波像差检测精度的影响。仿真结果表明, 该方法对泽尼克像差($Z_5\sim Z_{37}$)的检测精度优于 $0.85\times 10^{-3}\lambda$ 。

关键词 测量; 光刻; 波像差检测; 超大数值孔径; 空间像; 主成分分析

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0112002

Aberration Measurement Method for Hyper-NA Lithographic Projection Lens

Zhu Boer^{1,2} Wang Xiangzhao^{1,2} Li Sikun^{1,2} Yan Guanyong^{1,2}
Shen Lina^{1,2} Duan Lifeng³

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

³Shanghai Micro Electronics Equipment Co., Ltd, Shanghai 201203, China

Abstract An aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens by use of aerial image based on principal component analysis is proposed. Aerial images of the hyper-NA lithographic projection lens are expressed accurately by using polarized light and vector imaging model, as well as considering the polarization properties. As a result, the accuracy of the measurement model is improved and the aberrations of hyper-NA lithographic projection lens are measured accurately. Compared with the conventional AMAI-PCA method, the proposed method is applicable for the hyper-NA lithographic projection lens. The lithographic simulator PROLITH is used to validate the accuracies of aberration measurement and analyze the impacts of the sample interval of aerial images on the accuracy of the aberration measurement. The result shows that the proposed method can retrieve 33 terms of Zernike coefficients ($Z_5\sim Z_{37}$) with maximum error less than $0.85\times 10^{-3}\lambda$.

Key words measurement; lithography; aberration measurement; hyper-NA; aerial image; principal component analysis

OCIS codes 110.3960; 120.3940; 220.1010

收稿日期: 2015-06-30; 收到修改稿日期: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61205102、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等方面的研究。

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设备之一。投影物镜是光刻机最重要的分系统之一。投影物镜的波像差影响光刻机的成像质量,造成成像对比度降低,工艺窗口缩小^[1-3]。国际上多家光刻机研发单位开发了各自的投影物镜波像差检测技术^[4-14],根据测量对象的不同这些技术可以分为三类:基于光刻胶曝光的波像差检测技术、基于空间像测量的波像差检测技术和基于瞳面测量的波像差检测技术^[15]。其中基于空间像测量的波像差检测技术是目前常见的一类技术,相比于其他两类波像差检测技术,其具有检测速度快、成本低,能实时检测光刻机投影物镜波像差的优点。

基于空间像测量的波像差检测技术主要有照明设置空间像测量(TAMIS)技术、Z37船舶自动识别系统(AIS)技术和基于空间像主成分分析的投影物镜波像差检测技术(AMAI-PCA)等。ASML公司于2001年研发了TAMIS技术^[4-6],TAMIS的技术原理是通过检测多种照明方式下成像位置偏移量(IPE)和最佳焦面位置移动(BFS)来检测投影物镜波像差。2005年,Nikon公司开发了Z37AIS技术^[7-8],通过对空间像进行傅里叶变换建立傅里叶级数与泽尼克系数之间的线性关系,提取波像差。2011年,本课题组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)^[12-14],该方法通过对空间像进行主成分分析和多元线性回归分析的方法构建空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性关系,并提取波像差信息。相比于TAMIS、Z37AIS等同类技术,AMAI-PCA不仅利用成像位置偏移量,还采用空间像形变等特征信息一并参与线性模型的建立,因此,该线性模型对波像差的灵敏度更高,波像差检测精度也更高^[15]。但是,这种波像差检测技术适用于数值孔径(NA)小于0.93的光刻机投影物镜波像差检测。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增加到1.35,基于标量成像模型的AMAI-PCA技术难以准确地表征超大数值孔径光刻机的空间像,因此,AMAI-PCA不适用于超大数值孔径光刻机投影物镜波像差的检测。

本文提出一种基于空间像主成分分析的超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法。首先建立超大数值孔径光刻机投影物镜的空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性关系。采用偏振光照明和矢量光刻成像模型,并考虑投影物镜的偏振像差,准确表征超大数值孔径光刻机的空间像,从而建立与超大数值孔径光刻机更加匹配的检测模型,实现投影物镜波像差的高精度检测。在此基础上,分析空间像采样间隔对超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测精度的影响。

2 原 理

2.1 矢量光刻成像模型

超大数值孔径光刻机由于其超高NA的特性,在投影物镜波像差检测时必须考虑光的矢量特性,因此需要在光刻成像过程中使用矢量成像模型。图1为典型的矢量光刻成像系统示意图,包括光源、掩模、投影光学系统和硅片等。

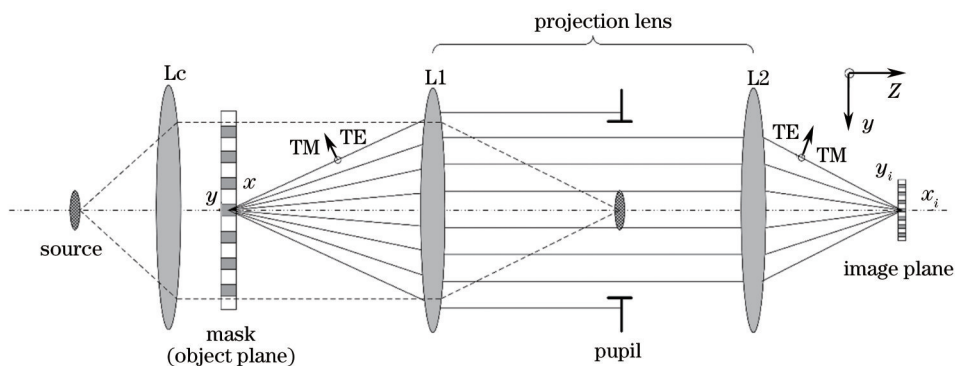


图1 典型的光刻成像系统示意图

Fig.1 Schematic of a typical optical lithographic imaging system

根据 Hopkins 矢量部分相干成像理论^[16],空间像光强分布可表示为

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

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 3×2 的传输矩阵, 表示光场从出射光瞳面到像面的映射, 其表达式为

$$\mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}) = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{yx} \\ M_{xy} & M_{yy} \\ M_{xz} & M_{yz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$ 是 2×2 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

$$\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g}) = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 & a_2 - ja_3 \\ a_2 + ja_3 & a_0 - a_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

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, $a_1 \sim a_3$ 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。 \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, 表示为

$$\hat{x} = \frac{x}{\lambda/NA}, \quad \hat{y} = \frac{y}{\lambda/NA}, \\ \hat{f} = \frac{f}{NA/\lambda}, \quad \hat{g} = \frac{g}{NA/\lambda}, \quad (4)$$

式中 NA 为投影物镜的数值孔径, λ 为光刻机曝光波长, x 和 y 、 f 和 g 分别为像面坐标、光瞳面坐标。

照明光源是光刻机成像系统的关键分系统之一, 也是影响光刻成像分辨率的主要因素之一。 $J(\hat{f}, \hat{g})$ 表示归一化的有效光源强度分布, 常见的光源强度分布有传统照明、环形照明、二级照明和四级照明等, 如图 2 所示。 \mathbf{E}_0 为入射光的琼斯矢量, 代表了光源的偏振情况, 常见的光源的偏振情况有沿 X 方向偏振、沿 Y 方向偏振、 45° 方向偏振、 135° 方向偏振、径向偏振和切向偏振等, 如图 3 所示。

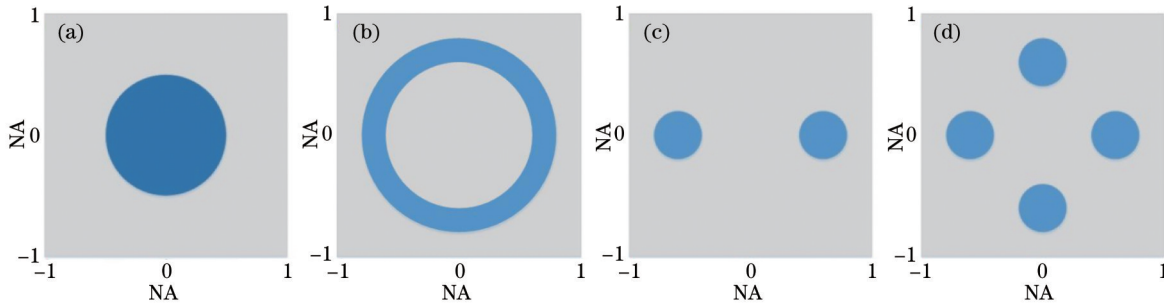


图 2 常见的光源强度分布。(a) 传统照明; (b) 环形照明; (c) 二级照明; (d) 四级照明

Fig.2 Common illumination types of source. (a) Conventional illumination; (b) annular illumination; (c) dipole illumination; (d) quadrupole illumination

2.2 波像差提取方法

光刻成像过程可以表示为掩模上检测标记的衍射光谱在光刻投影物镜光瞳面会受到波像差的相位调制, 因此在测得的空间像中会包含光刻投影物镜的波像差信息^[14]。

光刻机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^[17], 其表达式为

$$W(f, g) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n R_n(f, g) = Z_1 + Z_2 f + Z_3 g + Z_4 [2(f^2 + g^2) - 1] + Z_5 (f^2 - g^2) + \\ Z_6 \cdot 2fg + Z_7 [3(f^2 + g^2) - 2]f + Z_8 [3(f^2 + g^2) - 2]g + \cdots, \quad (5)$$

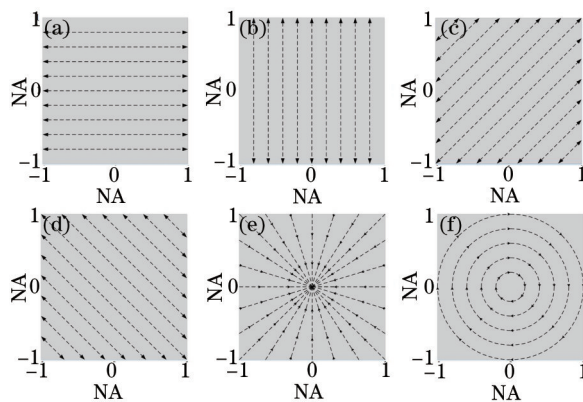


图3 常见的光源偏振情况。(a) X方向偏振; (b) Y方向偏振; (c) 45°方向偏振; (d) 135°方向偏振; (e) 径向偏振; (f) 切向偏振

Fig.3 Common polarization types of source. (a) X-polarized; (b) Y-polarized; (c) 45 degree-polarized; (d) 135 degree-polarized; (e) radially polarized; (f) azimuthally polarized

式中 W 表示波像差。

在超大数值孔径光刻机中, 投影物镜不仅存在波像差, 偏振像差也不能忽略, 因此需要重新建立超大数值孔径光刻机投影物镜的空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性关系。

以3级X彗差 Z_7 为例, 设置 Z_7 在 $[0, 50 \times 10^{-3} \lambda]$ 区间以间隔 $5 \times 10^{-3} \lambda$ 递增, 并设置一定的偏振像差, 该偏振像差由一个琼斯矩阵 $J_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$ 表示, 其中 J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{xy} 和 J_{yx} 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 $[-20 \times 10^{-3} \lambda, 20 \times 10^{-3} \lambda]$ ^[18-19]。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 Z_7 为横坐标, 计算得到的均方根值为纵坐标, 画出曲线, 对曲线进行线性拟合, 拟合得到线性关系, 如图4所示。由图4可知, 二者几乎是完全重合的, 因此, 可以认为在 $50 \times 10^{-3} \lambda$ 的泽尼克系数幅值范围内, 空间像光强分布与 Z_7 满足线性关系。

对空间像进行主成分分析^[20], 得到主成分和相应的主成分系数。空间像的主成分表征空间像的形变特性, 根据主成分的特性, 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近似表示, 表达式为

$$A_1(x, y, z; Z) = \sum_{j=1}^m P_{C-j} C_j(x, y, z) \cdot V_j(Z) + E_T, \quad (6)$$

式中 A_1 表示空间像光强分布, Z 表示泽尼克系数, P_C 表示主成分, V 表示主成分系数, E_T 表示高阶项。由(6)式可知, 空间像被分解为主成分和主成分系数, 即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。

将主成分分析之后得到的主成分与主成分系数进行乘积得到重构空间像, 将其与测得空间像进行对比, 得到残差的曲线, 如图4中所示, 其是一条非常接近横坐标的曲线, 验证了在 $50 \times 10^{-3} \lambda$ 的泽尼克系数幅值范围内, 空间像光强分布与 Z_7 满足线性关系。 $Z_5 \sim Z_{37}$ 阶泽尼克像差中其余泽尼克系数也具有这种线性关系。由此建立了超大数值孔径光刻机投影物镜的空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性关系, 基于此, 提取泽尼克系数的具体流程如图5所示。

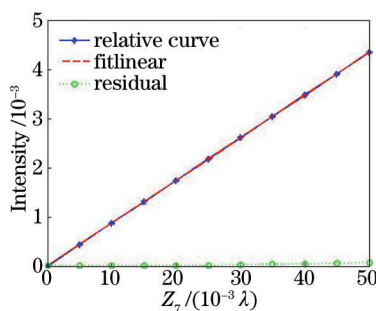


图4 超大数值孔径光刻机投影物镜空间像与泽尼克系数 Z_7 的线性关系

Fig.4 Linear relationship between the aerial image of hyper-NA lithographic projection lens and Zernike coefficient Z_7

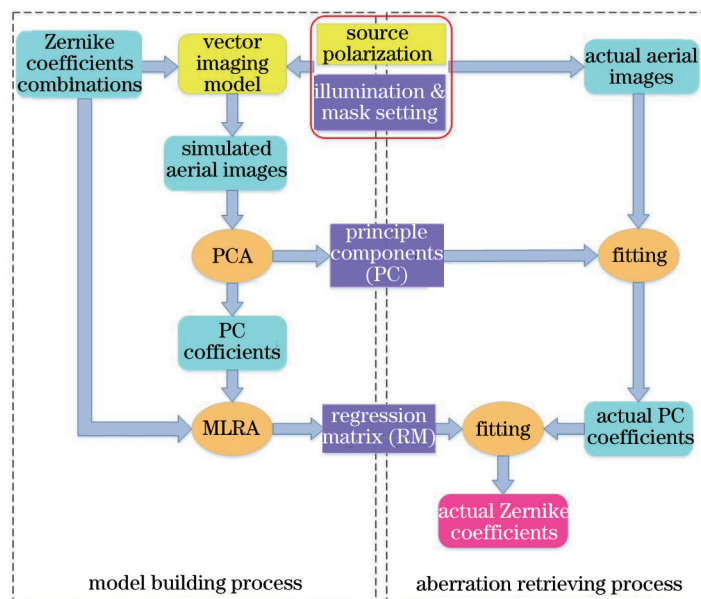


图 5 基于本方法的波像差提取流程

Fig.5 Process of the proposed method

基于空间像主成分分析的超大数值孔径光刻机投影物镜波像差提取方法包括建模阶段和像差提取阶段。

建模阶段采用 Box-Behnken Design 统计抽样方法设定 33 项泽尼克系数 $Z_5 \sim Z_{37}$ 的组合 U_z , 并随机设定一组偏振像差 (PT); 采用偏振光照明方式和矢量光刻成像模型, 使用光刻仿真软件 PROLITH^[21] 进行仿真, 得到仿真空间像集合, 对仿真空间像集合进行主成分分析, 获取仿真空间像的主成分以及相应的主成分系数。将所述的主成分系数和所述的泽尼克像差组合作为已知数据, 采用最小二乘法拟合方法^[22] 计算线性回归矩阵 (RM, T_{RM}), 表示为

$$V = U_z \cdot T_{RM} \quad (7)$$

根据线性回归矩阵 (RM), 建立主成分系数与泽尼克系数之间的线性关系。

像差提取阶段随机设定 33 项泽尼克系数 $Z_5 \sim Z_{37}$, 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 (7) 式得到的线性回归矩阵按照最小二乘法进行拟合, 得到待测光刻机投影物镜波像差的 33 项泽尼克系数。

波像差的检测精度定义为: 测量误差平均值 m_{can} 与 3 倍的测量误差标准差 s_{id} 之和, 即 $m_{\text{can}} + 3s_{\text{id}}$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测仿真实验

为了对基于空间像主成分分析的超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法的性能进行评估, 进行了超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测的仿真测试, 并与原 AMAI-PCA^[12] 进行比较。

通常 $Z_5 \sim Z_{37}$ 是超大数值孔径光刻机投影物镜中存在的主要的波像差, 基于此, 随机生成了 20 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, 并进行超大数值孔径光刻机投影物镜波像差的检测。同时在相同条件下使用原 AMAI-PCA 检测方法进行超大数值孔径光刻机投影物镜波像差的检测, 仿真条件如表 1 所示。

所提方法的光源照明方式及偏振状态如图 6(a) 所示, 原 AMAI-PCA 的光源照明方式如图 6(b) 所示, 检测标记如图 7 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 $[\sigma_{\text{cen}}, \sigma_{\text{rad}}] = [0.8, 0.3]$, 所提方法的照明方式中光源点的偏振状态为沿 X 方向线偏振, 原 AMAI-PCA 的照明方式中光源点无偏振; .

表1 仿真条件

Table 1 Simulation settings

	Proposed method	Conventional AMAI-PCA
	Source	
Wavelength λ	193 nm	193 nm
Illumination type	Quadrupole illumination	Quadrupole illumination
Polarization type	X-polarized	None
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	250 nm	250 nm
Pitch of the target	3000 nm	3000 nm
Orientation	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$
	Projection lens	
NA	1.35	1.35
Input aberration type	$Z_5 \sim Z_{37}$	$Z_5 \sim Z_{37}$
Input single aberration value	$-0.02 \lambda \sim 0.02 \lambda$	$-0.02 \lambda \sim 0.02 \lambda$
	Polarization aberration	
	$Re a_0 \sim Re a_3: -0.15 \sim 0.15$	
	$Im a_0 = 0$	None
	$Im a_1 \sim Im a_3: -0.02 \lambda \sim 0.02 \lambda$	
	Lithographic image model	
Lithographic image model	Vector imaging model	Scalar imaging model
	Aerial image sampling	
Sampling range	X/Y direction: $-2000 \sim 2000$ nm Z direction: $-900 \sim 900$ nm	X/Y direction: $-2000 \sim 2000$ nm Z direction: $-900 \sim 900$ nm
Sampling interval	X/Y direction: 30 nm Z direction: 125 nm	X/Y direction: 30 nm Z direction: 125 nm

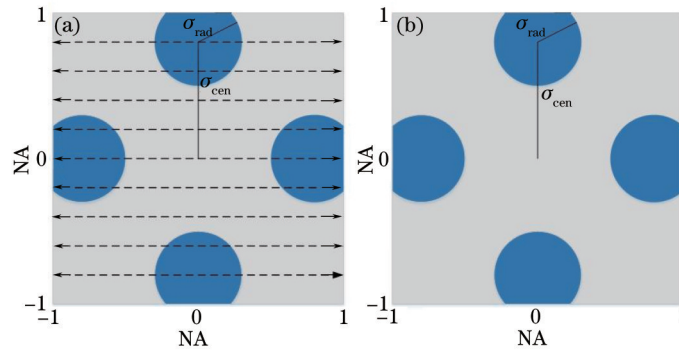


图6 (a) 所提方法的光源照明方式及偏振状态; (b) 原 AMAI-PCA 光源照明方式

Fig.6 (a) Illumination type and the polarization type of the proposed method; (b) illumination type of conventional AMAI-PCA

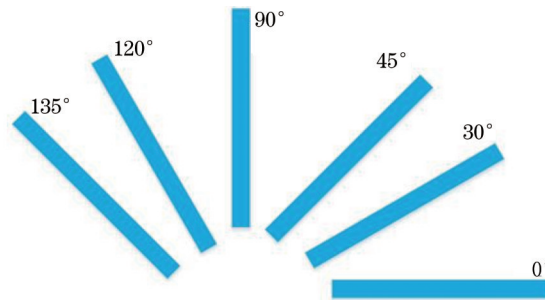


图7 检测标记

Fig.7 Schematic of a target

检测标记为孤立空组合,该组合有6个具有不同方向取向的孤立空,6个孤立空的方向取向分别为 0° 、 30° 、 45° 、 90° 、 120° 和 135° ,每个孤立空的线宽为250 nm,周期为3000 nm。随机生成20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^[23],偏振像差由一个琼斯矩阵 $J_{\text{Jones}}(\hat{f},\hat{g})$ 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 $[-0.02\lambda, 0.02\lambda]$ ^[18-19]。

根据(7)式建立超大数值孔径光刻机空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性模型。测试掩模 0° 方向检测标记的前九阶主成分如图8所示, 30° 、 45° 、 90° 、 120° 和 135° 方向检测标记前九阶主成分一致。第一阶主成分PC1是空间像光强分布的直流分量,第二阶、第三阶主成分PC2、PC3分别代表了空间像光强分布在水平和垂直方向上的偏导,第四阶、第五阶主成分PC4、PC5分别代表了空间像光强分布在水平和垂直方向上的二阶偏导,第六阶、第七阶主成分PC6、PC7分别代表了空间像光强分布在水平和垂直方向上的三阶偏导,第八阶、第九阶PC8、PC9主成分分别代表了空间像光强分布在水平和垂直方向上的四阶偏导。

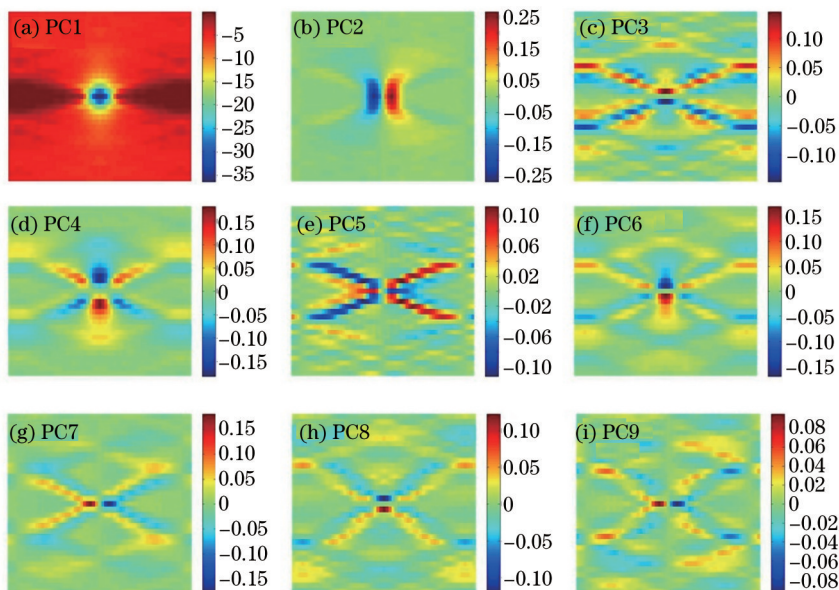


图8 测试掩模 0° 方向检测标记的前九阶主成分

Fig.8 The first 9 order principal components of 0° orientation mask of the tested target

图9为分别采用原AMAI-PCA检测方法和所提方法得到的空间像光强分布,以及二者的差值。

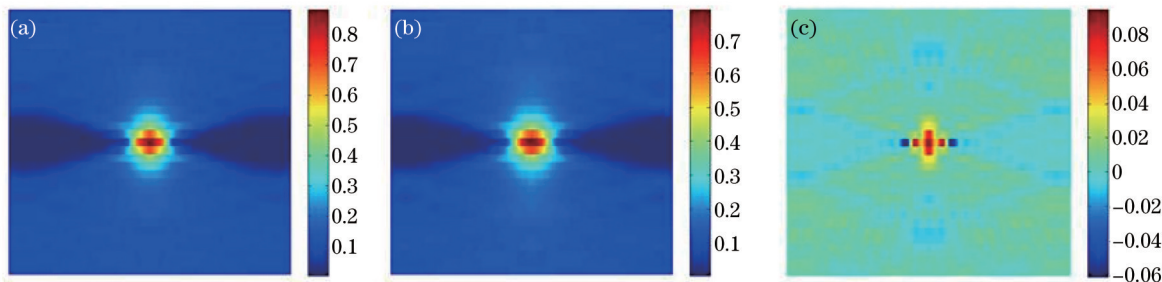


图9 (a)原AMAI-PCA的建模空间像;(b)所提方法的建模空间像;(c)空间像差值

Fig.9 (a) Aerial images of conventional AMAI-PCA; (b) aerial images of the proposed method; (c) difference value of two aerial images

由图9可知,原AMAI-PCA检测方法与所提方法在得到建模空间像时就有细微的不同,导致了所建立的检测模型的不同,最终影响了超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测的精度。

图10(a)为采用所提方法检测20组含随机波像差的测试空间像的统计结果,依次所示为 $Z_5\sim Z_{37}$ 33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, $Z_5\sim Z_{37}$ 33项泽尼克系数检测的最大平均误差出现在3级球差 Z_0 ,最大平均误差为0.0236 nm; $Z_5\sim Z_{37}$ 33项泽尼克系数检测的最大标准差出现在3级像散

Z_5 , 最大标准差为 0.0484 nm, 检测精度为 0.164 nm。因此所提方法在 $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ 的单项泽尼克系数幅值范围内的检测精度优于 0.00085λ 。

图 10(b)为采用原 AMAI-PCA 检测方法检测 20 组含随机波像差的测试空间像的统计结果, 依次展示了 $Z_5 \sim Z_{37}$ 33 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, 最大平均误差为 0.125 nm, 最大标准差为 0.409 nm, 检测精度为 1.29 nm。

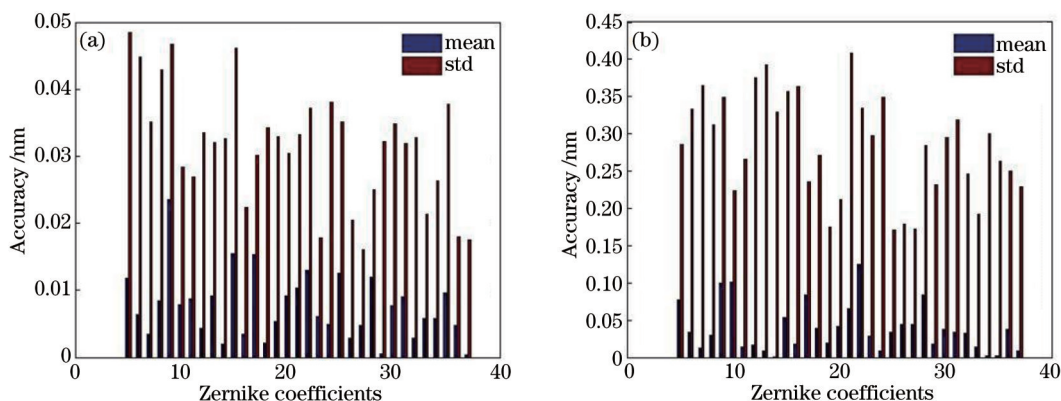


图 10 (a) 采用所提方法得到的波像差检测结果; (b) 采用原 AMAI-PCA 得到的波像差检测结果

Fig.10 (a) Aberration measurement results by use of the proposed method;
(b) aberration measurement results by use of conventional AMAI-PCA

所提方法在构建线性模型时采用偏振光照明和矢量成像模型仿真得到空间像, 比原 AMAI-PCA 采用非偏振光照明和标量成像模型仿真得到空间像更精确, 因此建立的线性模型也与超大数值孔径光刻机更加匹配。

改变照明光源中光源点的偏振方式, 分别换成沿 Y 方向偏振、径向偏振和切向偏振三种情况, 其余条件不变, 采用所提方法检测 20 组含随机波像差的测试空间像, 对照明光源点沿 Y 方向偏振情况的检测结果如图 11 所示; 对照明光源点沿径向偏振情况的检测结果如图 12 所示; 对照明光源点沿切向偏振情况的检测结果如图 13 所示。

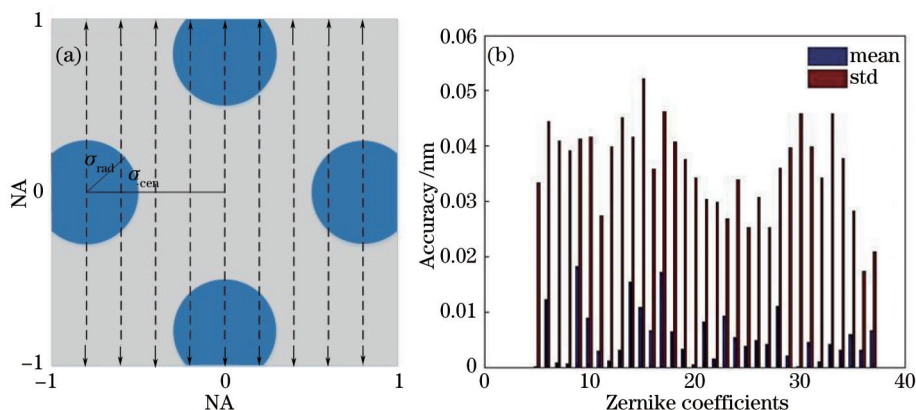


图 11 (a) 光源照明方式及偏振状态; (b) $Z_5 \sim Z_{37}$ 波像差检测结果

Fig.11 (a) Schematic of the illumination type and the polarization type; (b) aberration measurement results of $Z_5 \sim Z_{37}$

相比照明光源点沿 X 方向偏振情况, 此三种偏振照明方式下, $Z_5 \sim Z_{37}$ 33 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 0.0256 nm, 最大标准差全小于 0.055 nm, 检测精度优于 0.174 nm, 即在 $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ 的单项泽尼克系数幅值范围内的检测精度优于 0.00091λ 。

分别采用传统照明、环形照明和二级照明对所提方法进行仿真测试, 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 $[\sigma_{cen}, \sigma_{rad}] = [0.9, 0.7]$, 二级照明的部分相干因子 $[\sigma_{cen}, \sigma_{rad}] = [0.8, 0.2]$, 三种照明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 20 组含随机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, $Z_5 \sim Z_{37}$ 33 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.0329 nm; 最大标准差为 0.0912 nm,

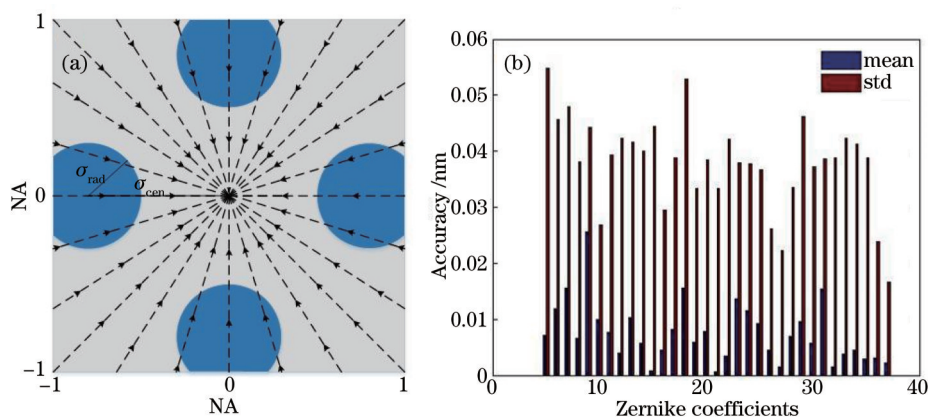


图 12 (a) 光源照明方式及偏振状态; (b) $Z_5 \sim Z_{37}$ 波像差检测结果

Fig.12 (a) Schematic of the illumination type and the polarization type; (b) aberration measurement results of $Z_5 \sim Z_{37}$

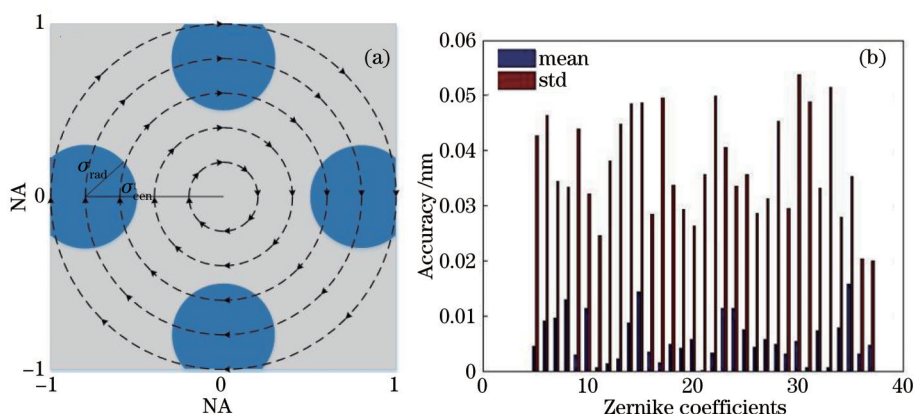


图 13 (a) 光源照明方式及偏振状态; (b) $Z_5 \sim Z_{37}$ 波像差检测结果

Fig.13 (a) Schematic of the illumination type and the polarization type; (b) aberration measurement results of $Z_5 \sim Z_{37}$

检测精度为 0.2962 nm,检测精度优于 0.00154λ 。在环形照明条件下, $Z_5 \sim Z_{37}$ 33 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.0261 nm,最大标准差为 0.0675 nm,检测精度为 0.2222 nm,检测精度优于 $1.16 \times 10^{-3} \lambda$ 。在二级照明条件下, $Z_5 \sim Z_{37}$ 33 项泽尼克系数检测的最大平均误差为 0.0232 nm;最大标准差为 0.0565 nm,检测精度为 0.1696 nm,检测精度优于 0.00088λ 。

表 2 波像差检测结果

Table 2 Results of aberrations measurement

	Maximum mean error /nm	Maximum std error /nm	Accuracy /nm
Conventional illumination	0.0329	0.0912	0.2962
Annular illumination	0.0261	0.0675	0.2222
Dipole illumination	0.0232	0.0565	0.1696

3.2 采样间隔对波像差检测影响的仿真实验

空间像采样间隔的不同会影响投影物镜波像差检测精度的高低,因此,需要研究空间像采样间隔对波像差检测精度的影响,为波像差检测过程中空间像采样间隔的选取提供依据。

将轴向(Z)的采样间隔从 55 nm 每隔 10 nm 一直到 175 nm,将 X 或 Y 方向上的采样间隔从 10 nm 每隔 10 nm 一直到 100 nm。分析每种采样间隔下采用所提方法测得的波像差精度,如图 14 所示。

由图 14 可知,轴向(Z)的采样间隔在 [55 nm, 145 nm] 范围内, X 或 Y 方向上的采样间隔在 [10 nm, 80 nm] 范围内,采用所提方法检测得到的波像差检测精度均在 0.18 nm 以下。其中,轴向(Z)的采样间隔为 125 nm, X 或 Y 方向上的采样间隔为 30 nm 时,波像差检测精度为 0.1636 nm。

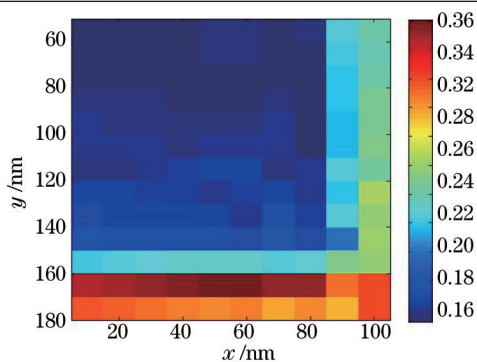


图 14 不同采样间隔下采用所提方法测得的波像差精度

Fig.14 Accuracy of aberration measurement using different sampling intervals

4 结 论

本文提出了一种基于空间像主成分分析的超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法。通过采用偏振光照明和矢量成像模型,并考虑投影物镜的偏振像差,准确表征了超大数值孔径光刻机的空间像,建立了超大数值孔径光刻机的空间像光强分布与泽尼克系数之间的线性模型,实现了超大数值孔径光刻机投影物镜泽尼克像差 $Z_5 \sim Z_{37}$ 的高精度检测。另外,分析了空间像采样间隔对超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测精度的影响。利用光刻仿真软件 PROLITH 的仿真测试表明,该方法对 33 项泽尼克系数 ($Z_5 \sim Z_{37}$) 的检测精度均优于 0.00085λ , 比原 AMAI-PCA 高 6.87 倍。

参 考 文 献

- 1 T A Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography[J]. IBM J Res Develop, 1997, 41(1.2): 57-67.
- 2 A Erdmann, M Arnz. The impact of aberration averaging during step-and-scan on the photolithographic process[J]. Microelectron Eng, 1998, 41(42): 117-120.
- 3 P Graeupner, R B Garreis, A Goehnermeier, *et al.*. Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA[C]. SPIE, 2003, 5040: 119-130.
- 4 H Van der Laan, M Dierichs, H van Greevenbroek, *et al.*. Aerial image measurement methods for fast aberration set-up and illumination pupil verification[C]. SPIE, 2001, 4346: 394-407.
- 5 K van Ingen Schenau, H Bakker, M Zellenrath, *et al.*. System qualification and optimization for imaging performance on the 0.80-NA 248-nm step-and-scan systems[C]. SPIE, 2002, 4691: 637-651.
- 6 Z Qiu, X Wang, Q 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.
- 7 T Hagiwara, N Kondo, I Hiroshi, *et al.*. Development of aerial image based aberration measurement technique[C]. SPIE, 2005, 5754: 1659-1669.
- 8 W Liu, S Liu, T Zhou, *et al.*. Aerial image based technique for measurement of lens aberration up to 37th Zernike coefficient in lithographic tools under partial coherent illumination[J]. Opt Express, 2009, 17(21): 19278-19291.
- 9 Q Yuan, X Wang, Z Qiu, *et al.*. Even aberration measurement of lithography projection system based on optimized phase-shifting marks [J]. Microelectron Eng, 2009, 86(1): 78-82.
- 10 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.
- 11 B Peng, X Wang, Z Qiu, *et al.*. Aberration-induced intensity imbalance of alternating phase-shifting mask in lithographic imaging[J]. Opt Lett, 2010, 35(9): 1404-1406.
- 12 L Duan, X Wang, A Bourov, *et al.*. In situ aberration measurement technique based on principal component analysis of aerial image[J]. Opt Express, 2011, 19(19): 18080-18090.
- 13 D Xu, X Wang, Y 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.
- 14 Yang Jishuo, Wang Xiangzhao, Li Sikun, *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.
- 15 Yang Jishuo. Study on Aberration Measurement Based on Aerial Image for Lithographic Projection Lens[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 28–38.
杨济硕. 基于空间像测量的光刻机投影物镜波像差检测技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013: 28–38.
- 16 A K Wong. *Optical Imaging in Projection Microlithography*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 102–107.
- 17 M Born, E Wolf. *Principles of Optics*[M]. New York: Springer, 1998: 411–417.
- 18 N Yamamoto, J Kye, H J Levinson. Polarization aberration analysis using Pauli–Zernike representation[C]. SPIE, 2007, 6520: 65200Y.
- 19 L Shen, S Li, X Wang, *et al.*. Analytical analysis for impact of polarization aberration of projection lens on lithographic imaging quality [C]. SPIE, 2015, 9426: 94261E.
- 20 I T Jolliffe. *Principal Component Analysis*[M]. New York: Springer Press, 2002: 150–165.
- 21 Chris A Mack. Lithography simulation in semiconductor manufacturing[C]. SPIE, 2004, 5645: 63–83.
- 22 J O Rawlings, S G Pantula, D A Dickey. *Applied Regression Analysis: a Research Tool*[M]. New York: Springer–Verlag Press, 2008: 93–97.
- 23 K Lai, G M Gallatin, M A van de Kerckhof, *et al.*. New paradigm in Lens metrology for lithographic scanner: evaluation and exploration [C]. SPIE, 2004, 5377: 160–171.

栏目编辑: 何卓铭