

# 基于交替相移掩模矢量空间像的偏振像差检测方法

沈丽娜<sup>1,2,3</sup> 王向朝<sup>1,2</sup> 李思坤<sup>1,2</sup> 闫观勇<sup>4</sup> 诸波尔<sup>1,2</sup> 孟泽江<sup>1,2</sup> 张 恒<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

<sup>3</sup>新疆师范大学物理与电子工程学院, 新疆, 乌鲁木齐 830000

<sup>4</sup>中芯国际集成电路制造有限公司, 上海 201203

**摘要** 提出一种基于交替相移掩模空间像的光刻机投影物镜偏振像差检测方法。采用泡利-泽尼克系数表征偏振像差, 结合 X 和 Y 两种线性偏振照明方式, 用像传感器测量不同照明条件下掩模空间像的成像位置偏移与最佳焦面偏移, 利用标定的偏振像差灵敏度矩阵计算获得泡利-泽尼克系数。采用光刻仿真软件对本文方法的有效性进行了验证, 结果表明其检测精度优于  $3.07\text{ m}\lambda$ 。

**关键词** 成像系统; 光学制造; 光刻; 偏振像差; 泡利-泽尼克系数; 偏振像差测量

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0811003

## Measuring Method of Polarization Aberration Based on Vector Aerial Image of Alternating Phase-shift Mask

Shen Lina<sup>1,2,3</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup> Li Sikun<sup>1,2</sup> Yan Guanyong<sup>1,2</sup>

Zhu Boer<sup>1,2</sup> Meng Zejiang<sup>1,2</sup> Zhang Heng

<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>School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830000, China

<sup>4</sup>Semiconductor Manufacturing International Corporation, Shanghai 201203, China

**Abstract** A measuring method of polarization aberration based on aerial image of alternating phase-shift mask is proposed. The polarization aberration is represented by Pauli-Zernike coefficients. The image placement error and best focus shift are measured by image sensor at multiple illumination settings, combined with X and Y linearly polarized illuminating light. The Pauli-Zernike coefficients are retrieved using the calibrated sensitivity matrix of polarization aberration. The validity of this proposed method is verified by numerical simulations, and the results indicate that the measuring accuracy is less than  $3.07\text{ m}\lambda$ .

**Key words** imaging systems; optical fabrication; optical lithography; polarization aberration; Pauli-Zernike coefficient; polarization aberration measurement

**OCIS codes** 110.5220; 110.3000; 120.3940; 220.4840

## 1 引 言

随着光刻特征尺寸的不断减小, 光刻机的偏振效应越来越突显。作为光刻机偏振效应的一个主要来源, 投影物镜的偏振像差会引起图形位置偏移(IPE)、最佳焦面偏移(BFS)和图形特征尺寸(CD)误差等, 导致成像质量和工艺窗口的恶化<sup>[1-3]</sup>。当采用高数值孔径(NA)投影物镜和偏振照明时, 偏振像差对光刻成像质量

收稿日期: 2016-01-28; 收到修改稿日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61275207, 61205102, 61474129, 61405210)

作者简介: 沈丽娜(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光刻成像方面的研究。E-mail: shenlina@siom.ac.cn

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)

的影响不容忽视,需要对其进行准确测量和控制<sup>[4-7]</sup>。

近年来,研究人员相继提出了多种偏振像差检测方法。Shiode 等<sup>[8]</sup>提出了结合 SPIN 技术和 BLP 原理的偏振像差检测方法,通过测量不同线性偏振照明条件下的图像偏移,获得表示投影物镜双折射性质的相位延迟和快轴方向。这种方法可以将现有的标量波像差测量技术用于偏振像差测量。随后,提出了基于瞳面的偏振像差检测方法。Fujii 等<sup>[9-10]</sup>基于李群理论采用第一正则坐标表征偏振像差,并在此基础上提出了一种投影物镜琼斯矩阵的检测方法。该方法利用原位测量装置 iPot 获得线性偏振光的斯托克斯矢量和标量波前,成功重建了表征偏振像差的琼斯光瞳。Nomura 等<sup>[11-12]</sup>提出了一种投影物镜穆勒矩阵的检测方法,采用特制的穆勒矩阵测试掩模,利用 iPot 测得硅片面斯托克斯矢量,计算获得表征偏振像差的穆勒光瞳。然而,这种检测方法需要特制的测试掩模,测量装置也需要包含偏振测量器件,使其系统结构相对复杂。为了简化系统、降低检测成本,Dong 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于空间像的偏振像差检测方法。该方法采用取向泽尼克系数表征偏振像差,利用传感器测得的掩模空间像数据,计算重建了表征偏振像差的物理光瞳。然而,针对各光瞳的奇像差和偶像差,该方法需要分别采用不同的掩模和检测模型,过程复杂,偏振衰减和偏振延迟分量的检测误差有待减小。

为了进一步简化检测系统,提高检测精度,在分析泡利-泽尼克偏振像差对光刻成像影响的基础上,本文提出一种基于交替相移掩模(Alt-PSM)矢量空间像的偏振像差原位检测方法。针对奇像差和偶像差项,该方法分别利用多照明设置下 Alt-PSM 空间像的 IPE 和 BFS 计算获得相应的泡利-泽尼克系数,实现偏振像差快速、精确检测。根据偏振像差对 Alt-PSM 空间像的影响,确定 X 和 Y 线性偏振照明方式下引起空间像 IPE 和 BFS 的泡利-泽尼克偏振像差分量,然后根据空间像 IPE 和 BFS 与泡利-泽尼克系数之间的线性关系,建立偏振像差检测模型,提出检测方法。最后,利用光刻仿真软件模拟验证所提检测方法的正确性,评估其检测精度。

## 2 原 理

### 2.1 偏振像差与矢量空间像的关系

光刻成像系统示意图如图 1 所示。

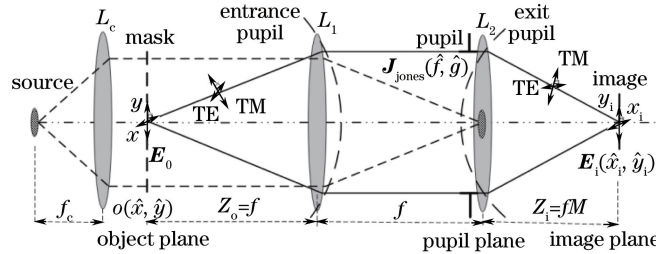


图 1 光刻成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical lithography imaging system

根据矢量光刻成像理论<sup>[14]</sup>,在考虑投影物镜的偏振像差时,空间像强度可以表示为

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

式中  $J(\hat{f}, \hat{g})$  是科勒照明的有效光源强度分布,  $H(\hat{f}, \hat{g}) = \exp[i2\pi\Delta z \sqrt{1 - (NA)^2(\hat{f}^2 + \hat{g}^2)} / (NA)^2]$ , 式中的  $\hat{f}^2 + \hat{g}^2 \leq 1$ ,  $\Delta z$  是以瑞利长度  $\lambda / (NA)^2$  为单位的像面离焦量,  $\lambda$  是照明光的波长,  $NA$  是投影物镜的数值孔径。  $O(\hat{f}, \hat{g})$  是掩模的衍射频谱,  $\mathbf{E}_0(\hat{f}, \hat{g})$  是入射光的琼斯矢量,  $\mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g})$  是偏振传递矩阵函数, 表示为

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

(1)式中  $\mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f}, \hat{g})$  是投影物镜的偏振像差, 用  $2 \times 2$  的琼斯矩阵表示, 可以用泡利矩阵分解为具有物理意义的泡利光瞳  $P_i(\hat{f}, \hat{g})$  (包含  $P_{a_0\text{-Amp}}$ 、 $P_{a_0\text{-Pha}}$ 、 $P_{a_1\text{-Rea}}$ 、 $P_{a_1\text{-Ima}}$ 、 $P_{a_2\text{-Rea}}$ 、 $P_{a_2\text{-Ima}}$ 、 $P_{a_3\text{-Rea}}$  和  $P_{a_3\text{-Ima}}$ , 分别对应整个光瞳上泡利系数  $a_0$  的振幅、相位、 $a_1 \sim a_3$  的实部和虚部)<sup>[15-16]</sup>。各个泡利光瞳可以用泽尼克多项式  $R_m$  进一步分解为

$$P_i(\hat{f}, \hat{g}) = \sum_m Z_m^{P_i} \cdot R_m(\hat{f}, \hat{g}), \quad (3)$$

从而使偏振像差可以用一系列泡利-泽尼克系数  $Z_m^{P_i}$  表示<sup>[16]</sup>。

线性偏振照明方式下, 采用如图 2 所示的线空比为 1:1、相移为  $180^\circ$  的 Alt-PSM, 当周期  $\hat{p}$  满足  $\pm 1$  级干涉条件  $1/[2(1+\sigma)] < \hat{p} < 3/[2(1+\sigma)]$  时, 忽略泡利-泽尼克系数的二次项后, 空间像的 IPE 和 BFS 与泡利-泽尼克偏振像差的奇像差项和偶像差项之间是线性关系<sup>[17]</sup>

$$I_{\text{PE}} = \sum_{m\text{-odd}} S_m^{P_i} \cdot Z_m^{P_i}, B_{\text{FS}} = \sum_{m\text{-even}} S_m^{P_i} \cdot Z_m^{P_i}, \quad (4)$$

式中  $I_{\text{PE}}$  和  $B_{\text{FS}}$  分别表示 IPE 和 BFS。泡利-泽尼克系数  $Z_m^{P_i}$  表示泡利光瞳  $P_i$  中的第  $m$  项泽尼克系数,  $S_m^{P_i}$  表示  $Z_m^{P_i}$  引起的 IPE/BFS 灵敏度。

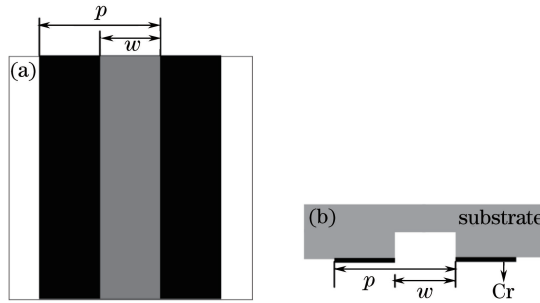


图 2 (a)交替相移掩模; (b)交替相移掩模剖面图  
Fig. 2 (a) Alt-PSM; (b) profile map of Alt-PSM mask

## 2.2 偏振像差的检测方法

(4)式中, 灵敏度  $S_m^{P_i}$  的取值受入射光偏振态影响。当采用 X 或 Y 方向线性偏振光照时, 只有泡利光瞳  $P_{a_0\text{-Pha}}$  和  $P_{a_1\text{-Ima}}$  对应的灵敏度  $S_m^{P_{a_0\text{-Pha}}}$  和  $S_m^{P_{a_1\text{-Ima}}}$  不为 0, 即只有泡利光瞳  $P_{a_0\text{-Pha}}$  和  $P_{a_1\text{-Ima}}$  引起 Alt-PSM 空间像的 IPE 和 BFS<sup>[17-18]</sup>。另外, 由于高阶像差比较小, 因此可以忽略<sup>[6, 17]</sup>。此时, 在给定的数值孔径和部分相干因子  $\sigma$  条件下, (4)式表示的偏振像差引起的空间像成像位置偏移量可以表示为

$$\Delta X(NA, \sigma) = S_7^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_7^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{10}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{10}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{14}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{14}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_7^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_7^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{10}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{10}^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{14}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{14}^{P_{a_1\text{-Ima}}}, \quad (5)$$

$$\Delta Y(NA, \sigma) = S_8^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_8^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{11}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{11}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{15}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{15}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_8^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_8^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{11}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{11}^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{15}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{15}^{P_{a_1\text{-Ima}}}, \quad (6)$$

$$\Delta Z(NA, \sigma) = S_5^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_5^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_9^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_9^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{12}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{12}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_{16}^{P_{a_0\text{-Pha}}} Z_{16}^{P_{a_0\text{-Pha}}} + S_5^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_5^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_9^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_9^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{12}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{12}^{P_{a_1\text{-Ima}}} + S_{16}^{P_{a_1\text{-Ima}}} Z_{16}^{P_{a_1\text{-Ima}}}, \quad (7)$$

式中  $\Delta X(NA, \sigma)$  和  $\Delta Y(NA, \sigma)$  是在给定的照明参数  $NA$  和  $\sigma$  条件下透射像传感器检测到的 X 与 Y 方向成像位置偏移量,  $\Delta Z(NA, \sigma)$  是传感器检测到的最佳焦面偏移量。各阶 X 方向奇像差、Y 方向奇像差和偶像差的灵敏度  $S_m^{P_i}$  可以分别表示为

$$S_{m-X}^{P_i} = \frac{\partial \Delta X(NA, \sigma)}{Z_m^{P_i}}, S_{m-Y}^{P_i} = \frac{\partial \Delta Y(NA, \sigma)}{Z_m^{P_i}}, S_{m-Z}^{P_i} = \frac{\partial \Delta Z(NA, \sigma)}{Z_m^{P_i}}. \quad (8)$$

在  $n$  组不同的  $NA$  和  $\sigma$  条件下利用传感器测量  $X$  方向成像位置偏移量,可得矩阵方程组

$$\begin{bmatrix} \Delta X(NA_1, \sigma_1) \\ \Delta X(NA_2, \sigma_2) \\ \Delta X(NA_3, \sigma_3) \\ \vdots \\ \Delta X(NA_n, \sigma_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7^{P_{a_0}-Pha}(NA_1, \sigma_1) & S_{10}^{P_{a_0}-Pha}(NA_1, \sigma_1) & S_{14}^{P_{a_0}-Pha}(NA_1, \sigma_1) & S_7^{P_{a_1}-Ima}(NA_1, \sigma_1) & S_{10}^{P_{a_1}-Ima}(NA_1, \sigma_1) & S_{14}^{P_{a_1}-Ima}(NA_1, \sigma_1) \\ S_7^{P_{a_0}-Pha}(NA_2, \sigma_2) & S_{10}^{P_{a_0}-Pha}(NA_2, \sigma_2) & S_{14}^{P_{a_0}-Pha}(NA_2, \sigma_2) & S_7^{P_{a_1}-Ima}(NA_2, \sigma_2) & S_{10}^{P_{a_1}-Ima}(NA_2, \sigma_2) & S_{14}^{P_{a_1}-Ima}(NA_2, \sigma_2) \\ S_7^{P_{a_0}-Pha}(NA_3, \sigma_3) & S_{10}^{P_{a_0}-Pha}(NA_3, \sigma_3) & S_{14}^{P_{a_0}-Pha}(NA_3, \sigma_3) & S_7^{P_{a_1}-Ima}(NA_3, \sigma_3) & S_{10}^{P_{a_1}-Ima}(NA_3, \sigma_3) & S_{14}^{P_{a_1}-Ima}(NA_3, \sigma_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_7^{P_{a_0}-Pha}(NA_n, \sigma_n) & S_{10}^{P_{a_0}-Pha}(NA_n, \sigma_n) & S_{14}^{P_{a_0}-Pha}(NA_n, \sigma_n) & S_7^{P_{a_1}-Ima}(NA_n, \sigma_n) & S_{10}^{P_{a_1}-Ima}(NA_n, \sigma_n) & S_{14}^{P_{a_1}-Ima}(NA_n, \sigma_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_7^{P_{a_0}-Pha} \\ Z_{10}^{P_{a_0}-Pha} \\ Z_{14}^{P_{a_0}-Pha} \\ S_7^{P_{a_1}-Ima} \\ S_{10}^{P_{a_1}-Ima} \\ S_{14}^{P_{a_1}-Ima} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

可简写为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{S}_X \cdot \mathbf{Z}_X, \quad (10)$$

式中  $\Delta \mathbf{X}$  是成像位置  $X$  方向偏移量矩阵,  $\mathbf{S}_X$  是偏振像差引起成像位置  $X$  方向偏移量的灵敏度矩阵,  $\mathbf{Z}_X$  是各阶泡利-泽尼克偏振像差  $X$  方向奇像差项矩阵。

当采用  $X$  或  $Y$  方向线性偏振光照明时, (10) 式灵敏度矩阵  $\mathbf{S}_X$  中灵敏度系数间满足关系式<sup>[17-18]</sup>

$$S_{m1}^{P_{a_1}-Ima} = c_i \cdot S_m^{P_{a_0}-Pha}, \quad (11)$$

式中

$$c_i = \begin{cases} 1/2, & \text{when } \mathbf{E}_0 = [1, 0]^T \\ -1/2, & \text{when } \mathbf{E}_0 = [0, 1]^T \end{cases}, \quad (12)$$

即灵敏度系数间线性相关。此时, 灵敏度矩阵的秩  $\text{rank}(\mathbf{S}_X) < 6$ , 可知单独采用  $X$  或  $Y$  方向线性偏振照明时, 不能通过 (10) 式求解  $\mathbf{Z}_X$  即各  $X$  方向奇像差项。所以, 在建模求解泡利-泽尼克偏振像差过程中, 为了消除灵敏度矩阵的线性相关性, 需要同时利用  $X$  和  $Y$  两个方向的线性偏振照明。为此, 在  $m$  组不同的  $NA$  和  $\sigma$  条件下, 分别将  $X$  和  $Y$  方向线性偏振照明时测得的矩阵方程组

$$\Delta \mathbf{X}^{X-\text{Pol}} = \mathbf{S}_X^{X-\text{Pol}} \cdot \mathbf{Z}_X, \Delta \mathbf{X}^{Y-\text{Pol}} = \mathbf{S}_X^{Y-\text{Pol}} \cdot \mathbf{Z}_X, \quad (13)$$

组合成总的矩阵方程组

$$\Delta \mathbf{X}_{\text{com}} = \mathbf{S}_{X\text{com}} \cdot \mathbf{Z}_X, \quad (14)$$

式中

$$\Delta \mathbf{X}_{\text{com}} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}^{X-\text{Pol}} \\ \Delta \mathbf{X}^{Y-\text{Pol}} \end{bmatrix}, \mathbf{S}_{X\text{com}} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_X^{X-\text{Pol}} \\ \mathbf{S}_X^{Y-\text{Pol}} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

此时, 通过 (14) 式的超定方程组, 可以采用最小二乘法求解泡利-泽尼克偏振像差  $X$  方向奇像差项

$$\mathbf{Z}_X = \mathbf{S}_{X\text{com}}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{com}}, \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{Z}_X = [Z_7^{P_{a_0}-Pha}, Z_{10}^{P_{a_0}-Pha}, Z_{14}^{P_{a_0}-Pha}, Z_7^{P_{a_1}-Ima}, Z_{10}^{P_{a_1}-Ima}, Z_{14}^{P_{a_1}-Ima}]^T, \quad (17)$$

上标  $T$  表示转置。

同理, 在  $X$  和  $Y$  线性偏振照明时, 利用传感器分别测量  $m$  组不同  $NA$  和  $\sigma$  条件下的  $Y$  方向成像位置偏移量和最佳焦面偏移量, 可以求解泡利-泽尼克偏振像差  $Y$  方向奇像差项和偶像差项

$$\mathbf{Z}_Y = \mathbf{S}_{Y\text{com}}^{-1} \cdot \Delta Y_{\text{com}}, \quad (18)$$

$$\mathbf{Z}_Z = \mathbf{S}_{Z\text{com}}^{-1} \cdot \Delta Z_{\text{com}}, \quad (19)$$

式中

$$\mathbf{Z}_Y = [Z_8^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_{11}^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_{15}^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_8^{P_{a_1-\text{Ima}}}, Z_{11}^{P_{a_1-\text{Ima}}}, Z_{15}^{P_{a_1-\text{Ima}}}]^T, \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}_Z = [Z_5^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_9^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_{12}^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_{16}^{P_{a_0-\text{Pha}}}, Z_5^{P_{a_1-\text{Ima}}}, Z_9^{P_{a_1-\text{Ima}}}, Z_{12}^{P_{a_1-\text{Ima}}}, Z_{16}^{P_{a_1-\text{Ima}}}]^T. \quad (21)$$

### 3 仿真结果与分析

根据上述检测方法,采用传统照明方式,其有效光源强度分布的表达式为  $J(\hat{f}, \hat{g}) = 1/(\pi\sigma^2) \cdot \text{circ}(\sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2}/\sigma)$ , 光源的部分相干因子  $\sigma$  的取值范围为  $[0.3, 0.8]$ , 步长为 0.05; 照明光波长  $\lambda = 193 \text{ nm}$ ; 投影物镜的数值孔径  $NA$  的取值范围为  $[0.80, 1.35]$ , 步长为 0.05; 横向放大因子  $M = 0.25$ ; Alt-PSM 的线宽  $w = 55 \text{ nm}$ , 周期  $p = 110 \text{ nm}$ 。设置光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  和  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中泡利-泽尼克系数  $Z_5^{P_i} \sim Z_{16}^{P_i}$  的取值范围为  $[0, 20 \text{ m}\lambda]$ , 在此范围内随机生成 20 组泡利-泽尼克系数。分别将各组泡利-泽尼克系数对应的偏振像差代入光刻仿真软件 PROLITH, 在  $X$  和  $Y$  线性偏振照明时, 采用上述不同的  $NA$  和  $\sigma$  照明条件, 生成 Alt-PSM 的空间像。然后, 用数值计算软件 Matlab 对生成的空间像进行分析, 得到不同照明条件下偏振像差引起的 IPE 和 BFS。采用所提的偏振像差检测方法求解获得泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  和  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中的低阶泡利-泽尼克系数。其中一组求解结果如图 3 所示, 图 3(a) 是泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  中输入和测量的泡利-泽尼克系数对比图, 图 3(b) 是泡利光瞳  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中输入和测量的泡利-泽尼克系数对比图。

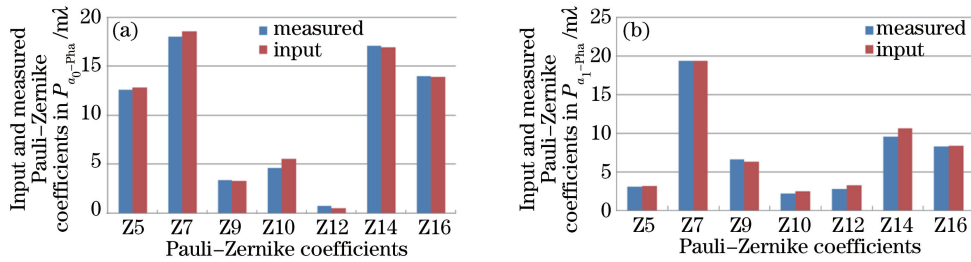


图 3 输入和测量的泡利-泽尼克系数对比图。(a) 泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  中; (b) 泡利光瞳  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中

Fig. 3 Comparison of input and measured Pauli-Zernike coefficients. (a) In Pauli pupil  $P_{a_0-\text{Pha}}$ ; (b) in Pauli pupil  $P_{a_1-\text{Ima}}$

由图 3 可知, 在表示标量像差的泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  中, 测量获得的各阶泡利-泽尼克系数与输入泡利-泽尼克系数相比, 其最大差异为  $-0.92 \text{ m}\lambda$ , 而在表示  $X/Y$  坐标轴方向相位延迟的泡利光瞳  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中, 其最大差异为  $1.07 \text{ m}\lambda$ 。结果证明该方法可以很好地测量标量像差和  $X/Y$  坐标轴方向的相位延迟。 $Y$  方向奇像差的求解原理和过程与上述  $X$  方向奇像差的相同, 不再赘述。

为了进一步评估此方法的有效性, 分别计算 20 组偏振像差测量结果的误差平均值和标准差 (STD), 并采用 (平均值 + 标准差) 表示像差的检测精度。计算获得的泡利-泽尼克偏振像差的误差平均值和标准差如图 4 所示。图 4(a) 是泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  中泡利-泽尼克系数的误差平均值和标准差, 图 4(b) 是泡利光瞳  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中泡利-泽尼克系数的误差平均值和标准差。

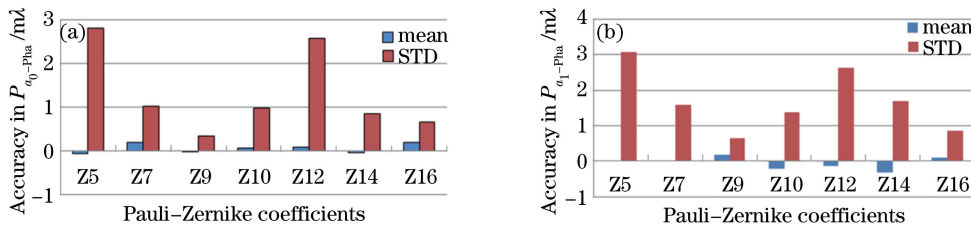


图 4 泡利-泽尼克系数的测量误差平均值和标准差。(a) 泡利光瞳  $P_{a_0-\text{Pha}}$  中; (b) 泡利光瞳  $P_{a_1-\text{Ima}}$  中

Fig. 4 Mean and STD of measured Pauli-Zernike coefficients. (a) In Pauli pupil  $P_{a_0-\text{Pha}}$ ; (b) in Pauli pupil  $P_{a_1-\text{Ima}}$



由图 4 可知,在泡利光瞳  $P_{a_0-Pha}$  中,泡利-泽尼克系数测量误差的平均值最大为  $0.19 m\lambda$ ,标准差最大为  $2.81 m\lambda$ ;而在泡利光瞳  $P_{a_1-Ima}$  中,其测量误差的平均值最大为  $-0.31 m\lambda$ ,标准差最大为  $3.07 m\lambda$ 。由此可知,重建的标量像差优于 X/Y 坐标轴方向的相位延迟。从像差的种类来看,奇像差的检测精度相差不多,最大值为  $1.60 m\lambda$ ;球差的检测精度最高,最大值只有  $0.97 m\lambda$ ;而像散的检测精度最低,最大值为  $3.07 m\lambda$ 。这是因为在所设置的照明条件( $NA, \sigma$ )范围内,像散的灵敏度变化范围最小,而球差的灵敏度变化范围最大。

仿真结果验证了所提检测方法可以快速、精确地获得泡利光瞳  $P_{a_0-Pha}$  和  $P_{a_1-Ima}$  中的泡利-泽尼克系数,具有检测系统结构简单、容易操作、测量精度高的优势。

## 4 结 论

提出了一种基于矢量空间像的投影物镜偏振像差检测方法。利用透射像传感器测量 X 和 Y 两种线性偏振照明方式、不同照明条件( $NA, \sigma$ )下的 Alt-PSM 空间像 IPE 与 BFS,计算获得泡利光瞳  $P_{a_0-Pha}$  和  $P_{a_1-Ima}$  的低阶泡利-泽尼克系数。利用光刻仿真软件对此方法进行了验证,结果表明两光瞳的奇像差(彗差和三波差)的检测精度优于  $1.60 m\lambda$ ,球差的检测精度优于  $0.97 m\lambda$ ,像散的检测精度优于  $3.07 m\lambda$ 。此方法可以精确检测低阶泡利-泽尼克偏振像差,在将来的工作中,可以通过选择更加合适的照明条件和考虑偏振像差间的串扰来增加可测像差项数。

## 参 考 文 献

- 1 Totzeck M, Graupner P, Heil T, *et al.* How to describe polarization influence on imaging[C]. SPIE, 2005, 5754: 23-37.
- 2 Zhang Q, Song H, Lucas K. Polarization aberration modeling via Jones matrix in the context of OPC[C]. SPIE, 2007, 6730: 67301Q.
- 3 Tu Yuanying. Study on polarization aberration measurement and compensation techniques for lithographic projection optics [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 87-89.  
涂远莹. 光刻投影物镜偏振像差检测与补偿技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密仪器研究所, 2013: 87-89.
- 4 Tu Yuanying, Wang Xiangzhao. Polarization aberration compensation method for lithographic projection lens based on a linear model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622002.  
涂远莹, 王向朝. 一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622002.
- 5 Kye J, McIntyre G, Norihiro Y, *et al.* Polarization aberration analysis in optical lithography systems[C]. SPIE, 2006, 6154: 61540E.
- 6 Yamamoto N, Kye J, Levinson H J. Polarization aberration analysis using Pauli-Zernike representation[C]. SPIE, 2007, 6520: 65200Y.
- 7 Geh B, Ruoff J, Zimmermann J, *et al.* The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA[C]. SPIE, 2007, 6520: 65200F.
- 8 Shiode Y, Ebiyama T. Study of polarization aberration measurement using SPIN method [C]. SPIE, 2006, 6154: 615431.
- 9 Fujii T, Kudo Y J, Ohmura Y, *et al.* Polarization properties of state-of-art lithography optics represented by first canonical coordinate of Lie group[C]. SPIE, 2007, 6520: 65204W.
- 10 Fujii T, Kogo J, Suzuki K, *et al.* Polarization characteristics of state-of-art lithography optics reconstructed from on-body measurement[C]. SPIE, 2008, 6924: 69240Z.
- 11 Nomura H, Higashikawa I. Mueller matrix polarimetry for immersion lithography tools with a polarization monitoring system at the wafer plane[C]. SPIE, 2009, 7520: 752012.
- 12 Nomura H, Higashikawa I. *In-situ* Mueller matrix polarimetry of projection lenses for 193-nm lithography[C]. SPIE, 2009, 7640: 76400Q.
- 13 Dong L, Li Y, Dai X, *et al.* Measuring the polarization aberration of hyper-NA lens from the vector aerial image[C]. SPIE, 2009, 9283: 928313.
- 14 Wong A K. Optical imaging in projection microlithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 102-107.
- 15 Arfken G B, Weber H J. Mathematical methods for physicists[M]. Burlington: Harcourt/Academic Press, 2001: 207.
- 16 McIntyre G R, Kye J, Neureuther A R. Polarization aberrations in hyper-numerical-aperture projection printing: A

- comparison of various representations[J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2006, 5(3): 033001.
- 17 Shen L N, Li S K, Wang X Z, *et al.* Analytical analysis of the impact of polarization aberration of projection lens on lithographic imaging[J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2015, 14(4): 043504.
- 18 Tu Y Y, Wang X Z, Li S K, *et al.* Analytical approach to the impact of polarization aberration on lithographic imaging [J]. Opt Lett, 2012, 37(11): 2061-2063.