

基于空间像峰值光强差的奇像差测量技术

涂远莹^{1,2} 王向朝^{1,2} 闫观勇^{1,2}

(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

摘要 提出一种基于空间像峰值光强差的光刻投影物镜奇像差测量技术。根据 Hopkins 部分相干成像理论, 推导双缝图形空间像光强分布以及峰值光强差的解析表达式。该测量技术以双缝图形为测量标记, 以空间像峰值光强差为测量对象。与基于成像位置偏移量的奇像差测量技术相比, 基于峰值光强差的奇像差测量技术降低了对空间像定位精度的要求, 并且高精度的光强度测量有效地提高了该技术的奇像差测量精度。利用光刻仿真软件 PROLITH 分析了传统照明与二极照明方式下该技术的奇像差测量精度, 仿真结果表明采用二极照明具有更高的测量精度。以彗差 Z_7 为例, 在传统照明和二极照明方式下, Z_7 的测量精度分别达到了 0.29 nm 与 0.19 nm。

关键词 光学制造; 光刻投影物镜; 波像差测量; 泽尼克系数; 峰值光强差

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0512002

Odd Aberration Measurement Technique Based on Peak Intensity Difference of Aerial Image

Tu Yuanying^{1,2} Wang Xiangzhao^{1,2} Yan Guanyong^{1,2}

(¹ Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An odd aberration measurement technique based on peak intensity difference of aerial image is proposed for lithographic projection lens. By using the Hopkins theory of partially coherent imaging, the analytical expressions of the aerial image and the peak intensity difference are derived for the double-slit pattern. This technique adopts a double-slit pattern as the measurement mark and the peak intensity difference of aerial image as the measurement parameter. Compared with the odd aberration measurement techniques based on image placement error (IPE), the technique based on the peak intensity difference can reduce the requirement for positioning accuracy of the aerial image, and accurate intensity measurement can improve the odd aberration measurement accuracy effectively. The odd aberration measurement accuracies under conventional illumination and dipole illumination are analyzed with PROLITH software. The simulation results show that the measurement accuracy can be further improved under dipole illumination. Taking coma Z_7 as an example, the measurement accuracies are up to 0.29 nm and 0.19 nm under conventional illumination and dipole illumination, respectively.

Key words optical fabrication; lithographic projection lens; wavefront aberration measurement; Zernike coefficient; peak intensity difference

OCIS codes 220.3740; 220.3630; 220.1010; 110.3000

1 引言

投影物镜是光刻机的重要分系统之一。投影物

镜波像差会造成光刻成像质量恶化和工艺窗口减小等问题^[1~3]。如彗差和三波差等奇像差引起光刻图

收稿日期: 2012-12-19; 收到修改稿日期: 2013-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(60938003, 61205102, 61275207)资助课题。

作者简介: 涂远莹(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事光刻成像方面的研究。E-mail: tuyuanying@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)

形横向位置偏移、图形线宽不对称等问题,影响光刻机的套刻精度,增加光刻成像的特征尺寸(CD)不均一性等^[4,5]。随着 CD 不断减小,波像差对光刻成像质量的影响越来越显著。因此需要快速、高精度的投影物镜波像差测量技术来减小和控制波像差对光刻成像质量的不利影响^[6,7]。

为此研究人员开发了一系列投影物镜波像差测量技术。其中一类为基于光刻胶图形的测量技术,如相位轮测量技术^[8]、三光束干涉测量技术^[9]和双光束干涉测量技术^[10]等,该类技术需要通过硅片涂胶、曝光、显影得到光刻胶图形后进行图形检测,测量时间较长。还有一类基于空间像的多照明设置空间像测量(TAMIS)技术^[11],它具有测量速度快、精度高等优点。在 TAMIS 技术基础上发展了一系列改进型 TAMIS 技术^[12~15]。这些技术在测量奇像差时需要测量图形位置或图形线宽。利用这些技术进一步提高波像差测量精度时受到测量过程中空间像定位精度和线宽测量精度的限制。此外,Peng 等^[16]提出了一种新的偶像差测量技术,该技术以光栅在成像面上的相邻峰值光强不均衡性为测量对象,在简化测量步骤的同时有效提高了偶像差的测量精度。然而上述利用空间像光强不均衡性的测量方法并未拓展到奇像差的测量过程。

为了降低传统奇像差测量技术对空间像定位精度和线宽测量精度的要求,并提高奇像差的测量精

度,本文提出一种基于双缝图形空间像峰值光强差的奇像差测量技术。该技术利用双缝图形空间像峰值光强在奇像差的影响下出现光强不对称的特点,并结合 TAMIS 技术的核心测量原理,通过测量双缝图形空间像峰值光强差获得投影物镜奇像差。利用光刻仿真软件 PROLITH 分析比较了本技术传统照明和二极管照明方式下的奇像差测量精度。

2 原 理

2.1 光刻成像模型

光刻成像过程可以简单描述为:照明光源发出的光束照明掩模并被掩模衍射,在投影物镜数值孔径(NA)内的部分衍射级次进入投影物镜并会聚到像面成像。图 1 为典型的光刻成像系统简图。为了分析方便,对掩模面坐标 (x_o, y_o) 、光瞳坐标 (f, g) 与像面坐标 (x_i, y_i) 进行坐标归一化^[17]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_o &= -\frac{Mx_o}{\lambda/NA}, & \hat{y}_o &= -\frac{My_o}{\lambda/NA}, \\ \hat{f} &= \frac{f}{NA/\lambda}, & \hat{g} &= \frac{g}{NA/\lambda}, \\ \hat{x}_i &= \frac{x_i}{\lambda/NA}, & \hat{y}_i &= \frac{y_i}{\lambda/NA}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 M 是投影物镜的横向放大率, λ 是光刻机曝光波长。

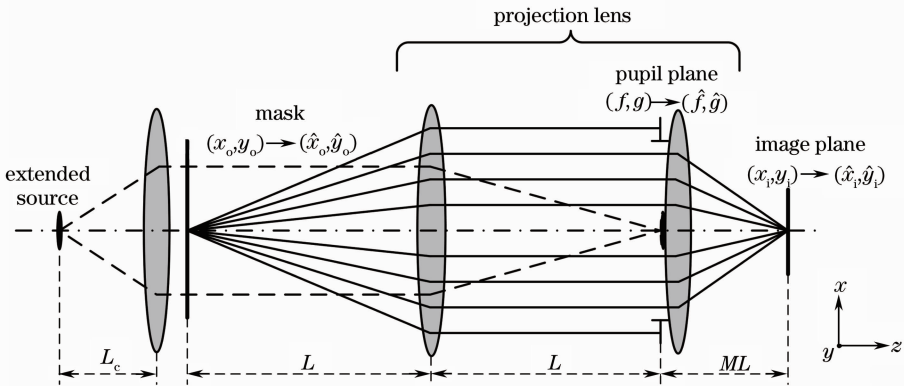


图 1 典型的光刻成像系统简图

Fig. 1 Scheme of a typical optical lithographic imaging system

根据 Hopkins 部分相干成像理论^[18],像面上的光强分布可表示为

$$\begin{aligned} I(\hat{x}_i, \hat{y}_i) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int u_{TCC}(\hat{f}', \hat{g}'; \hat{f}'', \hat{g}'') O(\hat{f}', \hat{g}') O^*(\hat{f}'', \hat{g}'') \times \\ &\quad \exp\{-i2\pi[(\hat{f}' - \hat{f}'')\hat{x}_i + (\hat{g}' - \hat{g}'')\hat{y}_i]\} d\hat{f}' d\hat{g}' d\hat{f}'' d\hat{g}'', \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $O(\hat{f}, \hat{g})$ 是掩模频谱, u_{TCC} 为交叉传递系数,定义为

$$u_{\text{TCC}}(\hat{f}', \hat{g}'; \hat{f}'', \hat{g}'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\hat{f}, \hat{g}) H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') H^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') d\hat{f} d\hat{g}, \quad (3)$$

式中 $J(\hat{f}, \hat{g})$ 是柯勒照明的有效光源强度分布函数。传统照明方式下有 $J(\hat{f}, \hat{g}) = (1/\pi\sigma^2) \text{circ}[(\hat{f}^2 + \hat{g}^2)^{1/2}/\sigma]$, 其中 σ 表示照明光源的部分相干因子。 σ 的值越小, 光源的相干性越高, 当 $\sigma = 1$ 时, 光源为完全非相干。 $H(\hat{f}, \hat{g})$ 是光瞳函数, 包含波像差因素, 可表示为

$$H(\hat{f}, \hat{g}) = \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\hat{f}, \hat{g})\right], \quad \hat{f}^2 + \hat{g}^2 < 1. \quad (4)$$

一般将上式中的波像差项 $W(\hat{f}, \hat{g})$ 用泽尼克多项式表示^[19]:

$$\begin{aligned} W(\hat{f}, \hat{g}) = & \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot R_n(\hat{f}, \hat{g}) = Z_1 + Z_2 \hat{f} + Z_3 \hat{g} + Z_4 [2(\hat{f}^2 + \hat{g}^2) - 1] + \\ & Z_5 (\hat{f}^2 - \hat{g}^2) + 2Z_6 \hat{f}\hat{g} + Z_7 \hat{f}[3(\hat{f}^2 + \hat{g}^2) - 2] + Z_8 \hat{g}[3(\hat{f}^2 + \hat{g}^2) - 2] + \\ & Z_9 [6(\hat{f}^2 + \hat{g}^2)^2 - 6(\hat{f}^2 + \hat{g}^2) + 1] + Z_{10} \hat{f}(\hat{f}^2 - 3\hat{g}^2) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

根据(5)式中波像差的光瞳分布特点, 波像差可分为奇像差与偶像差, 例如像散 Z_5 和球差 Z_9 为偶像差, 彗差 Z_7 和三波差 Z_{10} 为典型的 x 方向上的奇像差。奇像差影响光刻机的套刻精度、增加光刻成像的 CD 不均一性等, 需要高精度地测量这类波像差。

2.2 奇像差测量原理

2.2.1 双缝图形空间像

图 2 是本文采用的奇像差测量标记。测量标记为双缝结构, 白色区域为透光区域, 黑色区域为不透光区域, 缝宽和双缝中心距离分别为 200 nm 和 300 nm, 对两者进行如(1)式所示的坐标归一化后分别用 a 和 \hat{d} 表示。

该双缝掩模图形在 x 方向上的透射率函数为

$$t(\hat{x}_o) = \text{rect}\left(\frac{\hat{x}_o}{\hat{a}}\right) * \left[\delta\left(\hat{x}_o - \frac{\hat{d}}{2}\right) + \delta\left(\hat{x}_o + \frac{\hat{d}}{2}\right)\right]. \quad (6)$$

对其进行傅里叶变换, 得到

$$\mathcal{F}[t(\hat{x}_o)] = 2\hat{a} \text{sinc}(\hat{a}\hat{f}) \cos(\pi\hat{f}\hat{d}), \quad (7)$$

(7)式即为掩模频谱 $O(\hat{f})$ 。根据(3)式和(4)式计算 $u_{\text{TCC}}(\hat{f}', 0; \hat{f}'', 0)$, 并将 $u_{\text{TCC}}(\hat{f}', 0; \hat{f}'', 0)$ 与 $O(\hat{f})$ 代

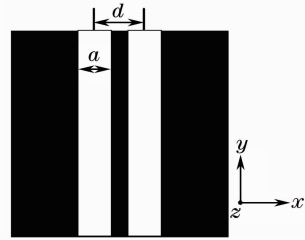


图 2 双缝测量标记

Fig. 2 Double-slit measurement mark

入(2)式, 则双缝图形测量标记在像面上的光强分布为

$$\begin{aligned} I(\hat{x}_i) = & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_{\text{TCC}}(\hat{f}', 0; \hat{f}'', 0) O(\hat{f}') O^*(\hat{f}'') \times \\ & \exp[-i2\pi(\hat{f}' - \hat{f}'')\hat{x}_i] d\hat{f}' d\hat{f}''. \end{aligned} \quad (8)$$

利用(8)式可以计算双缝图形的空间像光强分布以及峰值光强差, 且峰值光强差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta I = & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_{\text{TCC}}(\hat{f}', 0; \hat{f}'', 0) O(\hat{f}') O^*(\hat{f}'') \times \\ & 2i \sin[\pi\hat{d}(\hat{f}' - \hat{f}'')] d\hat{f}' d\hat{f}''. \end{aligned} \quad (9)$$

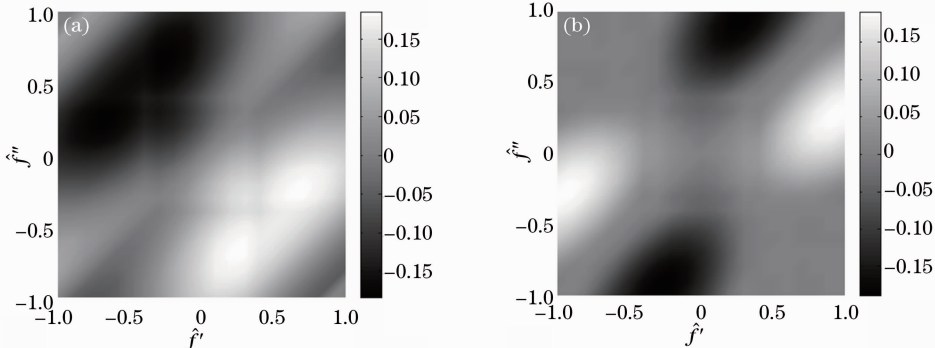


图 3 u_{TCC} 的虚部分布。(a) 彗差 Z_7 ; (b) 球差 Z_9

Fig. 3 Imaginary parts of u_{TCC} . (a) Coma aberration Z_7 ; (b) spherical aberration Z_9

当投影物镜只存在彗差 Z_7 或球差 Z_9 时, (8) 式中 u_{TCC} 的虚部分布情况分别如图 3(a), (b) 所示。

由图 3 可知, 奇像差 Z_7 破坏了 u_{TCC} 关于 \hat{f}' 和 \hat{f}'' 轴的奇对称性, 而偶像差 Z_9 没有改变该奇对称性。分析其他奇偶波像差的 u_{TCC} 分布, 该特性同样成立。根据积分中的对称性可知, 投影物镜存在奇像差时(9)式才具有非零值, 即只有奇像差引起双缝图形的空间像峰值光强差。利用(8)式分别计算投影物镜不存在波像差、存在彗差 Z_7 和球差 Z_9 时的空间像分布, 结果如图 4 所示。投影物镜不存在波像差和只存在 Z_9 时, 双缝图形的峰值光强相同, 只存在彗差 Z_7 时出现峰值光强差。

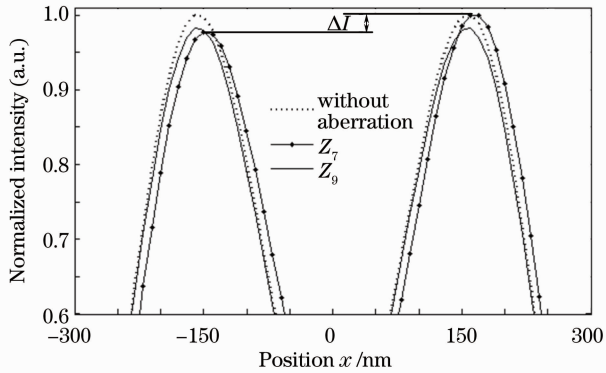


图 4 双缝图形空间像

Fig. 4 Aerial image of the double-slit pattern

2.2.2 奇像差与峰值光强差的线性关系

TAMIS 技术的核心测量原理是利用测量标记在成像过程中受到投影物镜波像差的影响, 成像位置发生偏移或最佳焦面发生偏移等, 且偏移量与光刻成像过程的照明条件、投影物镜数值孔径、波像差大小等有关, 因此改变投影物镜数值孔径和部分相干因子, 测量不同光刻成像条件下的成像位置偏移量或最佳焦面偏移量等测量对象, 通过数值处理即可得到波像差大小。根据上述 TAMIS 技术测量原理, 测量对象(成像位置偏移、最佳焦面偏移、线宽不对称和光强不均衡性等)与波像差之间的线性关系是测量波像差的前提。下面对图 4 所示的峰值光强差与 x 方向上的奇像差 ($Z_7, Z_{10}, Z_{14}, Z_{19}, Z_{23}, Z_{26}, Z_{30}$ 和 Z_{34}) 之间的线性关系进行分析与验证。各个奇像差的变化范围为 $-0.05 \lambda \sim 0.05 \lambda$ (λ 为曝光波长, 此处为 193 nm), 投影物镜 NA 为 0.55, 传统照明光源部分相干因子 σ 为 0.55。利用 PROLITH 软件分别计算上述奇像差导致的峰值光强差, 结果如图 5 所示。

根据标准线性模型 $y_i = Ax_i + B + \epsilon$ (A 和 B 为

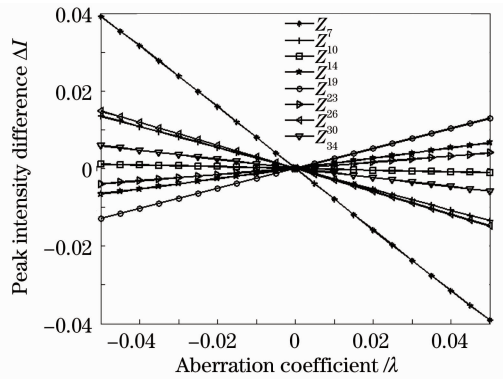


图 5 传统照明方式下奇像差与峰值光强差的线性关系
Fig. 5 Linear relationship between odd aberration and peak intensity difference under conventional illumination

线性拟合系数, ϵ 为误差项), 对图 5 中的数据进行线性拟合。利用残差平方和 (RSS) 作为线性关系的评估指标, 其中残差平方和是指误差项 ϵ 的平方和。按照图 5 标签顺序计算相应的 RSS, 结果分别为 $3.2 \times 10^{-7}, 4.8 \times 10^{-9}, 8.2 \times 10^{-9}, 1.1 \times 10^{-8}, 3.4 \times 10^{-10}, 3.3 \times 10^{-9}, 2.5 \times 10^{-8}$ 和 1.6×10^{-9} 。上述 RSS 极小, 说明传统照明方式下奇像差与峰值光强差之间具有良好的线性关系。分析其他 (NA, σ) 下的计算结果可知, 该线性关系也成立。

光刻成像过程中, 照明方式对空间像有重要影响。采用二极照明方式提高 x 方向上图形的光刻成像质量是一种常用的分辨率增强技术^[20]。下面讨论二极照明方式下奇像差与峰值光强差的线性关系。此时光源参数如图 6 所示, σ_c 的大小对应传统照明的 σ , σ_d 为固定值 0.3。奇像差与峰值光强差的关系如图 7 所示, 各奇像差对应的 RSS 分别为 $7.4 \times 10^{-6}, 1.9 \times 10^{-8}, 3.3 \times 10^{-6}, 3.0 \times 10^{-7}, 7.4 \times 10^{-7}, 2.7 \times 10^{-8}, 2.8 \times 10^{-7}$ 和 1.6×10^{-9} 。RSS 同样具有极小的数值, 即二极照明方式下奇像差与峰值光强差之间同样具有良好的线性关系。

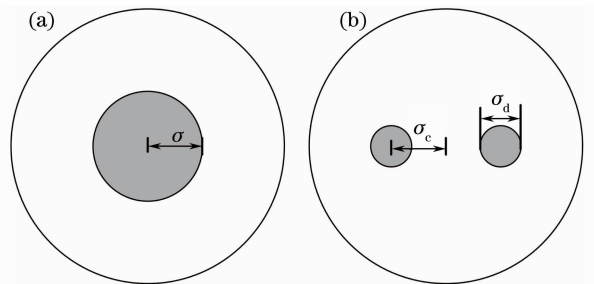


图 6 (a) 传统照明; (b) 二极照明

Fig. 6 (a) Conventional illumination; (b) dipole illumination

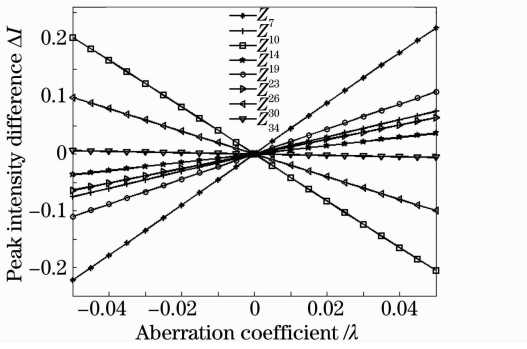


图7 二极照明方式下奇像差与峰值光强差的线性关系

Fig. 7 Linear relationship between odd aberration and peak intensity difference under dipole illumination

2.2.3 测量精度分析

根据(9)式和图5可知,在传统照明方式下对图2

所示的测量标记成像时, x 方向上的奇像差引起的峰值光强差可表示为

$$\Delta I(NA, \sigma) = S_7(NA, \sigma)Z_7 + S_{10}(NA, \sigma)Z_{10} + S_{14}(NA, \sigma)Z_{14} + S_{19}(NA, \sigma)Z_{19} + S_{23}(NA, \sigma)Z_{23} + S_{26}(NA, \sigma)Z_{26} + S_{30}(NA, \sigma)Z_{30} + S_{34}(NA, \sigma)Z_{34}, \quad (10)$$

式中 S 为波像差灵敏度,定义为单位波像差系数引起的峰值光强差,以 S_7 为例:

$$S_7(NA, \sigma) = \frac{\partial \Delta I(NA, \sigma)}{\partial Z_7}. \quad (11)$$

在多种照明条件下,即不同的 NA 和 σ ,记为 (NA_j, σ_j) ,其中 $j = 1, 2, 3, \dots$,波像差灵敏度不同。此时测量得到的峰值光强差可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta I(NA_1, \sigma_1) \\ \Delta I(NA_2, \sigma_2) \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7(NA_1, \sigma_1) & S_{10}(NA_1, \sigma_1) & \cdots & S_{34}(NA_1, \sigma_1) \\ S_7(NA_2, \sigma_2) & S_{10}(NA_2, \sigma_2) & & S_{34}(NA_2, \sigma_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_7 \\ Z_{10} \\ \vdots \\ Z_{34} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

(12)式是超定方程,可利用最小二乘法求解奇像差泽尼克系数。波像差灵敏度 S 的变化范围越大,可用于最小二乘拟合的数据越多,则最小二乘拟合的精度越高。因此波像差灵敏度 S 的变化范围是影响泽尼克系数测量精度的重要因素。基于TAMIS技术的波像差测量技术,它的测量精度可用下式评估^[16,21]:

$$A_M \propto \frac{A_Q}{|S_{\max} - S_{\min}|}, \quad (13)$$

其中 A_M 为奇像差测量精度, A_Q 是测量对象的测量精度,例如成像位置偏移、最佳焦面偏移、光强度等。 S_{\max} 和 S_{\min} 分别为多种照明条件下的最大和最小波像差灵敏度。本文中的奇像差测量技术以峰值光强差为测量对象,不需要像面上光强分布的位置信息,降低了对空间像定位精度的要求,能够有效减小定位误差对测量精度的影响。此外,高精度的光强度测量能有效地提高本技术的奇像差测量精度。

3 PROLITH 软件仿真

利用本技术测量奇像差时,需要计算(12)式中的波像差灵敏度。根据(11)式的波像差灵敏度定义,利用PROLITH软件计算时除所需波像差外其他的波像差均设为零,得到如图5所示的峰值光强差与波像差大小的对应关系,则线性拟合的斜率即

可作为波像差灵敏度。为评估本技术的测量精度,分析了奇像差灵敏度随 (NA, σ) 的变化情况。其中传统照明方式和二极照明方式的 σ/σ_c 变化范围为 $0.3 \sim 0.8$,投影物镜 NA 的变化范围为 $0.5 \sim 0.8$ 。 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 在两种照明方式下的波像差灵敏度分布如图8所示。

由图8可知,上述三种奇像差在二极照明方式下具有更大的波像差灵敏度变化范围,即采用二极照明能进一步提高本技术的奇像差测量精度。现有的空间像传感器的相对光强度测量精度高达 0.003 ^[16],这对提高本技术的测量精度有重要作用。根据(13)式计算本技术在两种照明方式下的奇像差测量精度,并与基于非对称型相移掩模光栅标记的彗差测量技术^[14]进行比较,结果如表1所示,其中CI和DI分别代表传统照明和二极照明。由表1可知,该技术的奇像差(Z_7, Z_{14})测量精度有明显提高。在传统照明方式下, Z_7 和 Z_{14} 的测量精度分别提高了 36% 和 27% 。在二极照明方式下, Z_7 和 Z_{14} 的测量精度分别提高了 58% 和 42% 。此外,该技术能高精度地测量高阶奇像差,例如二极照明方式下,高阶奇像差 $Z_{19}, Z_{23}, Z_{26}, Z_{30}$ 和 Z_{34} 的测量精度分别达到了 $0.30, 0.19, 0.54, 0.28, 0.28$ nm,可实现投影物镜奇像差的高精度测量。

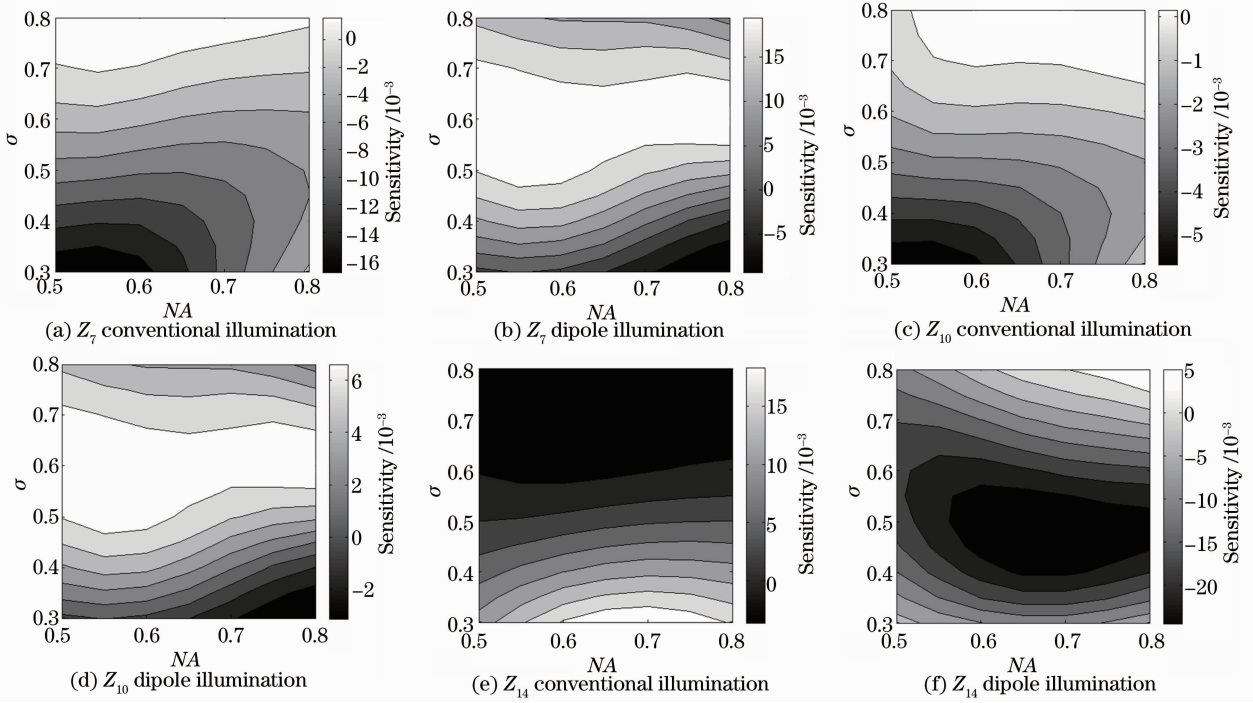


图 8 波像差灵敏度随(NA,σ)的变化情况

Fig. 8 Wavefront aberration sensitivities vary with NA and σ

表 1 波像差灵敏度与测量精度的仿真结果

Table 1 Simulation results of wavefront aberration sensitivities and measurement accuracies

Zernike coefficient	Measurement technique		Minimum sensitivity	Maximum sensitivity	Measurement accuracy / nm
Z_7	Improved TAMIS		0.01	2.21	0.45
	Present technique	CI	-0.0169	0.0039	0.29
DI		-0.0093	0.0230	0.19	
Z_{14}	Improved TAMIS		-2.67	0.35	0.33
	Present technique	CI	-0.0036	0.0210	0.24
DI		-0.0255	0.0065	0.19	
Z_{10}	Present technique	CI	-0.0056	0.0009	0.92
		DI	-0.0031	0.0078	0.55
Z_{19}	Present technique	CI	-0.0027	0.0075	0.59
		DI	-0.0106	0.0097	0.30
Z_{23}	Present Technique	CI	-0.0166	0.0027	0.31
		DI	-0.0089	0.0229	0.19
Z_{26}	Present technique	CI	-0.0039	0.0012	1.18
		DI	-0.0040	0.0072	0.54
Z_{30}	Present technique	CI	-0.0026	0.0041	0.90
		DI	-0.0155	0.0097	0.28
Z_{34}	Present technique	CI	-0.0026	0.0077	0.58
		DI	-0.0162	0.0051	0.28

投影物镜同时存在多种波像差时,可能对测量结果形成串扰,因此需要评估多种波像差同时存在的情况下该技术的测量表现。彗差 Z_7 ,三波差 Z_{10} 与五阶彗差 Z_{14} 对 x 方向上的光刻成像质量有重要影响^[22],以投影物镜同时存在上述三种奇像差为例。

在二极照明方式下,改变(NA,σ)设定四种照明条件,通过PROLITH软件得到相应的峰值光强差。将结果代入(12)式,利用最小二乘法求解得到泽尼克系数 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 。图9为两组波像差输入以及相应的计算输出结果,由图9可知,两组 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 的绝

对误差较大值分别为 0.0005λ , 0.0028λ , 0.0003λ 。上述结果说明该技术在多种奇像差同时存在的情况下仍然具有高测量精度。根据波像差的对称性, 可以将图2中双缝图形旋转 90° 测量相应的 y 方向上的奇像差(如 Z_8, Z_{11}, Z_{15} 等), 且测量精度与表1所示相同。

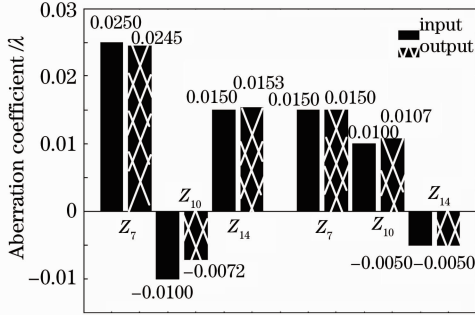


图9 波像差输入输出对比

Fig. 9 Comparison of input and output wavefront aberration

4 结 论

提出了一种基于空间像峰值光强差的投影物镜奇像差测量技术, 该技术能快速、高精度地测量投影物镜奇像差。基于 Hopkins 部分相干成像理论, 得到了双缝图形空间像峰值光强差与投影物镜奇像差之间的解析表达式, 证明了只有奇像差引起双缝图形空间像峰值光强差。利用光刻仿真软件 PROLITH 验证了在传统照明与二极照明方式下奇像差与峰值光强差之间的线性关系并分析了相应的波像差灵敏度。与基于成像位置偏移量的奇像差测量技术相比, 该技术有效提高了奇像差的测量精度, 且仿真结果表明二极照明方式下该技术具有更高的奇像差测量精度。

参 考 文 献

- 1 Donis G. Flagello, Jan Mulkens, Christian Wagner. Optical lithography into the millennium; sensitivity to aberrations, vibration and polarization [C]. *SPIE*, 2000, **4000**: 172~183
- 2 Paul Gräupner, Reiner Garreis, Aksel Göhnermeier *et al.*. Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 119~130
- 3 T. A. Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography [J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1997, **41**(1): 57~67
- 4 J. J. Chen, C. M. Huang, F. J. Shiu *et al.*. The influence of coma effect on scanner overlay [C]. *SPIE*, 2002, **4689**: 280~285
- 5 Jinwon Sung, Mahesh Pitchumani, Eric G. Johnson. Aberration measurement of photolithographic lenses by use of hybrid diffractive photomasks [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(11): 1987~1995

- 6 Marco Moers, Hans van der Laan, Mark Zellenrath *et al.*. Application of the aberration ring test (ARTEMIS™) to determine lens quality and predict its lithographic performance [C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 1379~1387
- 7 Lifeng Duan, Xiangzhao Wang, Guanyong Yan *et al.*. Experimental determination of aberration in lithographic lens by aerial image [C]. *SPIE*, 2011, **8169**: 816909
- 8 Lena Zavvalova, Bruce Smith, Toshifumi Suganaga *et al.*. *In-situ* aberration monitoring using phase wheel targets [C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 172~184
- 9 Hiroshi Nomura. Investigation of high-precision lithography lens aberration measurement based on three-beam interference theory: sensitivity versus coherent factor and variations with dose and focus [J]. *Opt. Rev.*, 2000, **7**(6): 525~534
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 Qiongyan Yuan, Xiangzhao Wang, Zicheng Qiu *et al.*. Coma measurement of projection optics in lithographic tools based on relative image displacements at multiple illumination settings [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24): 15878~15885
- 14 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
- 15 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. On-site coma measurement technique based on linewidth asymmetry of the aerial image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 673~678
- 王帆, 王向朝, 马明英等. 基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 673~678
- 16 Bo Peng, Xiangzhao Wang, Zicheng Qiu *et al.*. Even aberration measurement of lithographic projection optics based on intensity difference of adjacent peaks in alternating phase-shifting mask image [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(15): 2753~2760
- 17 H. H. Hopkins. Canonical pupil coordinates in geometrical and diffraction image theory [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1964, **4**(suppl. I): 31~35
- 18 Alfred Kwok-Kit Wong. *Optical Imaging in Projection Micro-Lithography* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005. 67~107
- 19 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 228~257
- 20 J. A. Torres, Y. Granik, F. Schellenberg. Contrast analysis and optimization for resolution enhancement technique [J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2003, **2**(2): 119~128
- 21 Zicheng Qiu, Xiangzhao Wang, Qunyu Bi *et al.*. Translational-symmetry alternating phase shifting mask grating mark used in a linear measurement model of lithographic projection lens aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3654~3663
- 22 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**(11): 2309~2317