

文章编号: 0253-2239(2006)05-0673-6

基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术

王 帆^{1,2} 王向朝¹ 马明英^{1,2} 张冬青^{1,2} 施伟杰^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在高数值孔径、低工艺因子的光刻技术中, 投影物镜彗差对光刻质量的影响变得越来越突出, 因而需要一种快速、高精度的彗差原位测量技术。为此提出了一种新的基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术, 利用国际上公认的半导体行业光刻仿真软件 PROLITH 对该方法的测量精度进行了仿真分析。结果表明, 与基于硅片曝光的彗差测量方法相比, 基于空间像的彗差测量技术速度上的优势十分明显。其测量精度优于 1.4 nm, 较国际前沿的多照明设置空间像测量技术(TAMIS)提高 30% 以上, 测量速度提高 1/3 左右。在 ASML 公司的 PAS5500 型步进扫描投影光刻机上, 多次测量了投影物镜彗差, 结果表明, 该技术测量重复精度优于 1.2 nm, 能实现高精度的彗差原位测量。

关键词: 光学测量; 光刻; 像差; 投影物镜; 成像质量; 泽尼克系数

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

On-Site Coma Measurement Technique Base on Linewidth Asymmetry of the Aerial Image

Wang Fan^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Ma Mingying^{1,2} Zhang Dongqing^{1,2} Shi Weijie^{1,2}

(¹ Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: In high numerical aperture and low technic factor lithography process, degradation of the image quality because of the coma aberration in the projection lens has become a serious problem. Fast and accurate on-site measurement of coma aberration is required. A novel on-site coma measurement technique based on linewidth asymmetry of the aerial image is proposed. Compared with the resist-based coma measurement techniques, the technique based on the aerial image possess the advantage of time-saving. The simulation results of PROLITH show that the measurement accuracy of the technique is better than 1.4 nm. The accuracy increases approximately 30 percent and 1/3 measuring time is saved compared with the TAMIS technique. Using the technique, the coma of the projection lens on PAS5500 scanner of ASML is measured. The experiment shows that the reproducibility of the coma measurement is better than 1.2 nm, and this technique can meet the requirement of the high-accuracy coma measurement.

Key words: optical measurement; optical lithography; aberrations; projection lens; image quality; Zernike coefficients

1 引 言

在高数值孔径、低工艺因子的光刻技术中, 光刻机投影物镜彗差导致的光刻质量下降是一个严重的问题^[1~3]。投影物镜彗差使掩模上的对称图形曝光、显影后在硅片上形成的图形不对称, 从而影响光刻分

辨力^[4]。彗差还可产生依赖于图形特征与照明条件的图形中心位置偏移, 从而影响套刻精度^[5]。因此光刻机投影物镜彗差的原位测量技术不可或缺。

利用干涉仪可以在投影物镜的制造过程中测量各种像差^[6~8], 但无法对已经安装在光刻机中的物

作者简介: 王 帆(1980~), 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事高分辨力步进扫描光刻机像差原位检测技术的研究。E-mail: wf@ustc.edu.cn

收稿日期: 2005-04-11; 收到修改稿日期: 2005-08-15

镜进行原位测量,为此人们开发了一系列投影物镜彗差的原位测量技术^[9]。现有的彗差原位测量技术可分为两类。一类是传统的基于硅片曝光的彗差原位测量技术,主要包括多照明设置畸变测量法(DAMIS)、三光束干涉法^[10,11]、相位环检测^[12,13]等。该类测量技术需在硅片涂胶、曝光、显影以及图形检测上耗费较多的时间,且测量精度易受光刻工艺的影响。另一类是基于空间像的彗差原位测量技术,目前仅有多照明设置空间像测量技术(TAMIS)^[14,15]一种。该测量技术具有速度快、稳定性强等优点,用于原位测量 90 nm 光刻机彗差。

本文提出一种基于双线空间像线宽不对称度的彗差原位测量技术。该技术利用国际上公认的半导体行业光刻仿真软件 PROLITH,根据像传感器在多种照明条件下测得的双线标记空间像线宽不对称度,获得投影物镜彗差,并与 TAMIS 技术进行了比较。

表 1 各阶泽尼克系数及其对应像差

Table 1 Zernike polynomials from the 1st to 16th orders

Coefficient	Equation	Aberration
Z_1	1	None
Z_2	$\rho \cos \theta$	x -tilt
Z_3	$\rho \sin \theta$	y -tilt
Z_4	$2\rho^2 - 1$	Defocus
Z_5	$\rho^2 \cos 2\theta$	3rd-order astigmatism Hor./Ver.
Z_6	$\rho^2 \sin 2\theta$	3rd-order degree astigmatism $\pm 45^\circ$
Z_7	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	3rd-order x -coma
Z_8	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	3rd-order y -coma
Z_9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	3rd-order spherical
Z_{10}	$\rho^3 \cos 3\theta$	Three-leaf clover rotated 30°
Z_{11}	$\rho^3 \sin 3\theta$	Three-leaf clover
Z_{12}	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta$	5th-order astigmatism Hor./Ver.
Z_{13}	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta$	5th-order degree astigmatism $\pm 45^\circ$
Z_{14}	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta$	5th-order x -coma
Z_{15}	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta$	5th-order y -coma
Z_{16}	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$	5th-order spherical

根据像差对成像质量的影响,可以将 Z_5 以上的像差分为两部分。在泽尼克多项式中 ρ 与 $2n\theta$ ($n=0,1,2,3,\dots$) 的函数对应的像差称为偶像差,主要包括像散(Z_5, Z_6, Z_{12}, Z_{13})与球差(Z_9, Z_{16})等,它主要影响空间像的 Z 向(轴向)位置。在泽尼克多项式中 ρ 与 $(2n+1)\theta$ 的函数对应的像差称为奇像差。主要包括彗差(Z_7, Z_8, Z_{14}, Z_{15})与三波差(Z_{10}, Z_{16})等。它主要影响空间像在 XY 平面内的(垂向)位置与光强分布。

像差的影响与投影物镜出瞳面光强分布有关。物镜出瞳面光强分布则受物镜数值孔径、照明条件以及掩模图案的形状、方向、尺寸等因素的影响。

2 原 理

2.1 像差对空间像的影响

投影物镜的波像差是指实际波前与理想波前在物镜出瞳面上的光程差。波像差可分解为泽尼克多项式的形式^[16]:

$$w(\rho, \theta) = Z_1 + Z_2 \cdot \rho \cos \theta + Z_3 \cdot \rho \sin \theta + Z_4 \cdot (2\rho^2 - 1) + Z_5 \cdot \rho^2 \cos 2\theta + Z_6 \cdot \rho^2 \sin 2\theta + Z_7 (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta + Z_8 (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta + Z_9 (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) + \dots, \quad (1)$$

其中 ρ, θ 为出瞳面上的归一化极坐标, Z_2 与 Z_3 项表征波前倾斜, Z_4 项表征焦面偏移, Z_5 与 Z_6 项表征三阶像散, Z_7 表征 X 方向的三阶彗差, Z_8 表征 Y 方向的三阶彗差, Z_9 表示表征三阶球差。各项泽尼克系数表征的像差形式详见表 1。

2.2 双线标记空间像线宽的不对称度

图 1(a) 中的白色部分为透光部分, 黑色部分为

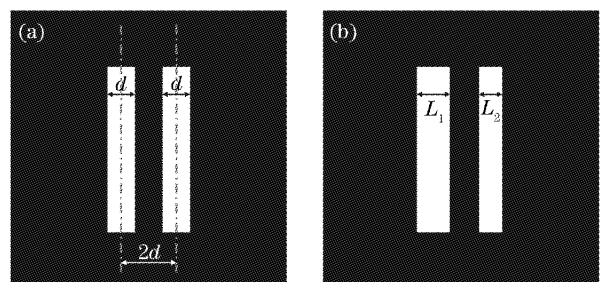


图 1 掩模上双线标记(a)及其空间像轮廓(b)示意图
Fig. 1 Schematic of 2-bar mark on the reticle (a) and its aerial profile (b)

不透光部分, 标记线宽为 d , 间距为 $2d$ 。奇像差导致的 XY 平面内空间像光强分布的变化使得图中标记的空间像线宽不对称。给定光强阈值下的标记空间像轮廓如图 1(b) 所示。定义空间像线宽不对称度为

$$A = L_1 - L_2, \quad (1)$$

其中 L_1 与 L_2 为给定阈值下的空间像线宽。

奇像差中 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 影响 Y 向双线标记空间像 X 方向线宽的不对称度为 A_x , Z_8, Z_{11}, Z_{15} 影响 X 方向双线标记空间像 Y 向线宽的不对称度为 A_y 。同种条件下, Z_7, Z_{10}, Z_{14} 产生的 A_x 与 Z_8, Z_{11}, Z_{15} 产生的 A_y 相等。下面仅就 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 对 A_x 的影响进行分析。

在物镜最大数值孔径 $NA = 0.8$, 环形照明部分相干因子 $\sigma = 0.55 \sim 0.85$, 曝光波长为 193 nm , 双线线宽 $d = 150 \text{ nm}$ 的条件下, 利用 PROLITH 光刻仿真软件分别对 Z_7, Z_{10}, Z_{14} 导致的 A_x 进行了计算, 结果如图 2 所示。由图可知, 空间像线宽不对称度与各项奇像差成线性关系。分析其他条件下的仿真计算结果可知, 该线性关系也成立, 且奇像差之间交叉项的影响可以忽略。一般对于 Y 方向线条, 有

$$A_x = S_1(NA, \sigma)Z_7 + S_2(NA, \sigma)Z_{10} + S_3(NA, \sigma)Z_{14}, \quad (2)$$

其中 S_1, S_2, S_3 为灵敏度:

$$\begin{aligned} S_1(NA, \sigma) &= \frac{\partial A_x(NA, \delta)}{\partial Z_7}, \\ S_2(NA, \sigma) &= \frac{\partial A_x(NA, \delta)}{\partial Z_{10}}, \\ S_3(NA, \sigma) &= \frac{\partial A_x(NA, \delta)}{\partial Z_{14}}. \end{aligned} \quad (3)$$

灵敏度可利用光刻仿真软件计算得到。如设定一定的 Z_7 值而取其他泽尼克系数为零, 利用光刻仿真软件计算出此时的 A_x , 则可将此时的 A_x 除以 Z_7 作为 A_x 对 Z_7 的偏导数 S_1 。

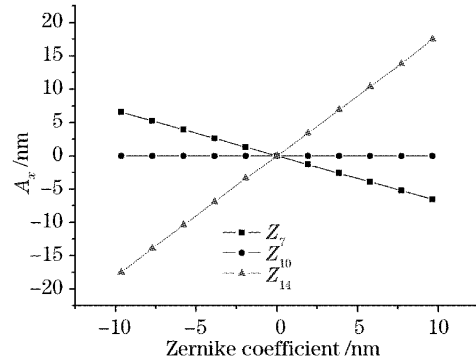


图 2 A_x 与奇像差的关系

Fig. 2 A_x as the function of odd aberrations

2.3 彗差测量

空间像线宽不对称度可利用透射像传感器 (TIS) 测量。透射像传感器包括工件台上的透射像传感器标记以及光强探测器两部分。通过透射像传感器扫描掩模上的类似标记的空间像可以得到其光强分布并计算得到线宽不对称度。

测试掩模采用线宽 150 nm 的双线标记, 此时三波差 Z_{10} 的影响可以忽略。对于 Y 方向线条, 有

$$A_x(NA, \sigma) = S_1(NA, \sigma)Z_7 + S_3(NA, \sigma)Z_{14}, \quad (4)$$

其中 $A_x(NA, \sigma)$ 为在给定的数值孔径与部分相干因子下透射像传感器测量到的 Y 方向线条空间像线宽不对称度。在 5 个 NA 和 σ 条件下测量 A_x , 可得到矩阵方程组为:

$$\begin{bmatrix} A_x(NA_1, \sigma_1) \\ A_x(NA_2, \sigma_2) \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial A_x(NA_1, \sigma_1) / (\partial Z_7) & \partial A_x(NA_1, \sigma_1) / (\partial Z_{14}) \\ \partial A_x(NA_2, \sigma_2) / (\partial Z_7) & \partial A_x(NA_2, \sigma_2) / (\partial Z_{14}) \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_7 \\ Z_{14} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

该方程组可简写为 $\mathbf{L} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Z}$ 。其中 \mathbf{L} 为在不同 NA, σ 设定下测得的 A_x , \mathbf{Z} 为要求解的泽尼克系数向量, \mathbf{S} 为灵敏度矩阵。该方程组是超定的, 可通过最小二乘法求解。

利用透射像传感器在 5 个 NA 与 σ 设定下测量视场内不同位置处的空间像线宽不对称度 (A_x, A_y), 由方程组 (5) 即可得出视场内相应位置的泽尼克系数 Z_7, Z_8, Z_{14}, Z_{15} 。

相对于多照明设置空间像测量技术测量技术, 基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术排除

了 Z_2, Z_3 与标记位置误差的影响, 可降低测量误差。同时, 需测量的泽尼克系数由三个减少至两个, 可以减少 NA 和 σ 设定的数量, 从而节约 1/3 左右的测量时间。

3 实 验

3.1 仿真

在透射像传感器测量精度一定的情况下, 灵敏度的变化范围是彗差测量精度的关键因素。下面就多照明设置空间像测量技术测量技术与基于双线空

间像线宽不对称度的彗差测量技术的灵敏度变化范围进行比较。假定曝光波长为 193 nm, 被测物镜最大数值孔径为 0.8。

在不同 NA 与照明设定情况下, 利用 PROLITH 计算得到双线标记 A_x 与 TAMIS 测量技术测试的 Z_7 灵敏度, 如图 3。图 3(a) 与图 3(b) 分别反映了传统照明与环形照明环带宽度为 0.3 时, 双线标记 A_x 的 Z_7 灵敏度与 NA、 σ 之间的关系。图 3(c) 与图 3(d) 分别

反映了传统照明与环形照明环带宽度为 0.3 时, TAMIS 测量技术测试的 Z_7 灵敏度与 NA、 σ 之间的关系。由图 3 可知, 考虑到所有的照明条件与物镜数值孔径设定, 双线标记 A_x 的 Z_7 灵敏度在 $-1.10 \sim 2.00$ 间变化, 变化范围为 3.30; 而 TAMIS 测量技术测试的 Z_7 灵敏度在 $-0.40 \sim 1.97$ 间变化, 变化范围为 2.37。采用基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术可增大 Z_7 灵敏度变化范围 30.8%。

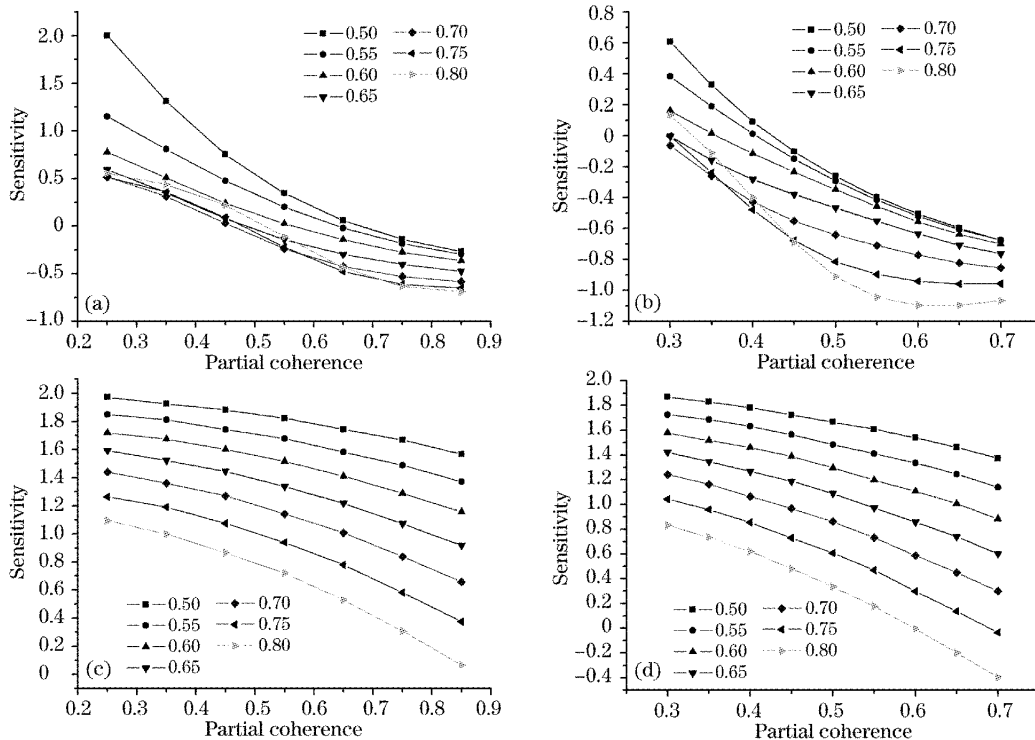


图 3 Z_7 灵敏度与数值孔径 NA、部分相干因子 σ 的关系。(a) 传统照明, 双线标记, (b) 环形照明, 双线标记, (c) 传统照明, 密集线标记, (d) 环形照明, 密集线标记

Fig. 3 Sensitivity of Z_7 versus the numerical aperture NA and the partial coherent factor σ . (a) Conventional illumination, 2-bar mark, (b) annular illumination, 2-bar mark, (c) conventional illumination, dense line mark, (d) annular illumination, dense line mark

在不同 NA 与照明设定的情况下, 利用 PROLITH 计算得到双线标记 A_x 与 TAMIS 测量技术测试的 Z_{14} 灵敏度, 如图 4 所示。图 4(a) 与图 4(b) 分别反映了传统照明与环形照明环带宽度为 0.3 时, 双线标记 A_x 的 Z_{14} 灵敏度与 NA、 σ 之间的关系。图 4(c) 与图 4(d) 分别反映了传统照明与环形照明环带宽度为 0.3 时, TAMIS 测量技术测试的 Z_{14} 灵敏度与 NA、 σ 之间的关系。由图 4 可知, 考虑到所有的照明条件与物镜数值孔径设定, 双线标记 A_x 的 Z_{14} 灵敏度在 $-5.71 \sim 1.81$ 间变化, 变化范围为 7.52; 而 TAMIS 测量技术测试的 Z_{14} 灵敏度在 $-2.04 \sim 0.83$ 间变化, 变化范围为 2.87。因此采用基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术可增大 Z_{14} 灵敏度变化

范围 162%。

综上所述, 采用基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术可分别将 Z_7 、 Z_{14} 灵敏度变化范围分别增加 30.8% 与 162%。考虑到基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术排除了 Z_2 、 Z_3 与标记位置误差的影响, 降低了测量误差; 在相同硬件的情况下, 采用基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术可提高彗差测量精度 30% 以上。TAMIS 测量彗差精度为 2 nm^[14], 因此基于双线空间像线宽不对称度的彗差测量技术的精度优于 1.4 nm。

3.2 实验

在 ASML 公司的 PAS5500 型步进扫描投影光刻机上, 利用本技术测量了投影物镜的彗差。在 5

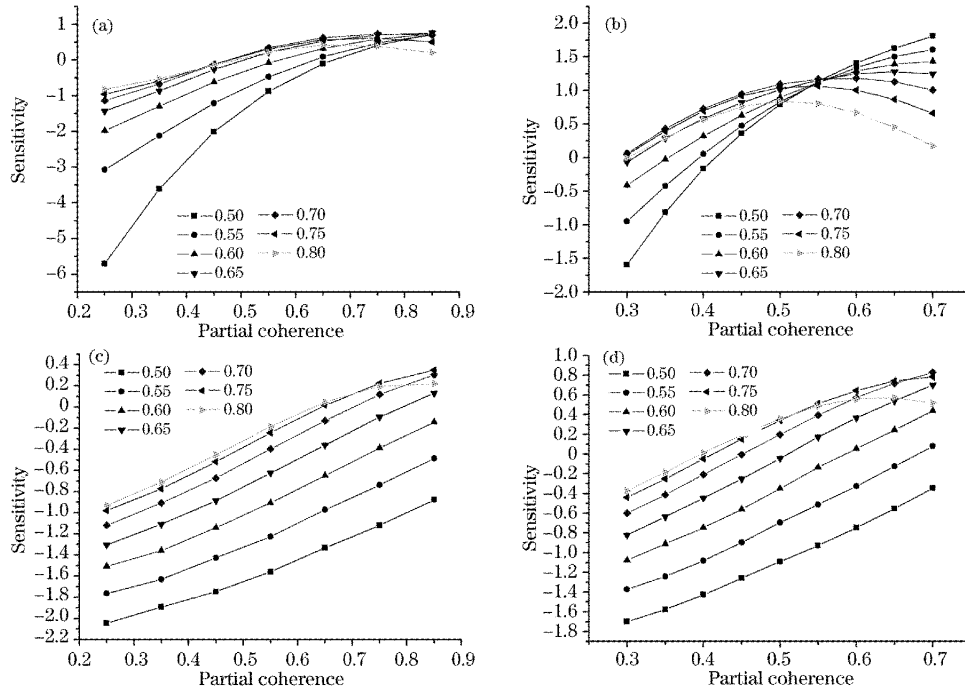


图 4 Z_{14} 灵敏度与数值孔径 NA 、部分相干因子 σ 的关系。(a) 传统照明, 双线标记, (b) 环形照明, 双线标记, (c) 传统照明, 密集线标记, (d) 环形照明, 密集线标记

Fig. 4 Sensitivity of Z_{14} versus the numerical aperture NA and the partial coherent factor σ . (a) Conventional illumination, 2 bar mark, (b) annular illumination, 2 bar mark, (c) conventional illumination, dense line mark, (d) annular illumination, dense line mark

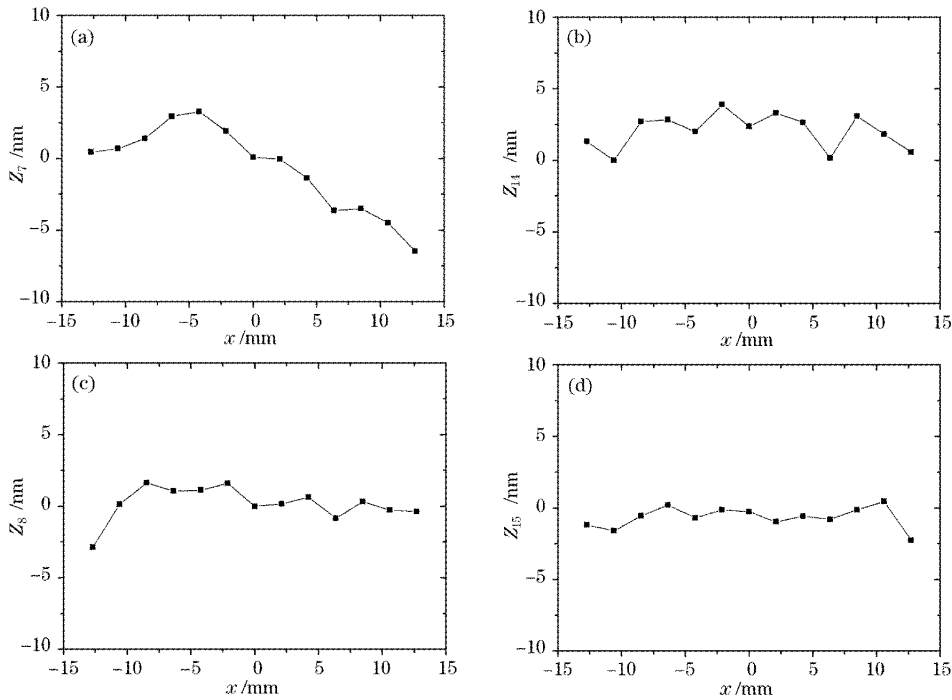


图 5 视场内不同位置处投影物镜彗差相关泽尼克系数的测量结果。(a) Z_7 测量结果, (b) Z_{14} 测量结果, (c) Z_8 测量结果, (d) Z_{15} 测量结果

Fig. 5 Measurement results of the Zernike coefficients corresponding to coma of the projection lens. Z_7 (a), Z_{14} (b), Z_8 (c), Z_{15} (d), in various positions

种照明方式下,通过透射像传感器测量视场内不同位置处双线标记空间像的线宽不对称度 A 。将测得的线宽不对称度 A 代入彗差计算模型,得到表征彗差的泽尼克系数 Z_7, Z_8, Z_{14}, Z_{15} 。测量得到的曝光视场内不同位置处的泽尼克系数如图 5 所示。

相同条件下多次进行本测试,各彗差相关泽尼克系数测量重复精度均优于 1.2 nm,而 TAMIS 测量技术测量重复精度为 2 nm^[14],因而可实现彗差的高精度原位检测。

4 结 论

提出了一种基于双线空间像线宽不对称度的彗差原位测量技术,该技术能快速、精确地测量光刻机投影物镜彗差,减少了对照明条件的数量需求,可提高测量速度 1/3 左右。与此同时,由于彗差灵敏度的提高,该技术彗差测量精度较 TAMIS 测量技术测量技术提高 30% 以上,优于 1.4 nm。在 PAS5500 型步进扫描投影光刻机上的实验结果表明,该技术测量重复精度优于 1.2 nm。

参 考 文 献

- Paul Gräepner, Reiner Garreis, Aksel Göehnermeier *et al.*. Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5040**: 119~130
- Joost Sytsma, Hans van der Laan, Marco Moers *et al.*. Improved imaging metrology needed for advanced lithography [J]. *Semiconductor International*, 2001
- Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868 (in Chinese)
李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 865~868
- T. A. Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography [J]. *IBM J. Res. Develop*, 1997, **41**(1): 57~67
- J. J. Chen, C. M. Huang, F. J. Shiu *et al.*. Influence of coma effect on scanner overlay [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4689**: 280~285
- Hideo Hata, Hideki Nogawa, Shigeyuki Suda. Development of 157-nm full-field scanners [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5377**: 806~815
- Kafai Lai, Gregg Gallatin, Mark van de Kerkhof *et al.*. New paradigm in lens metrology for lithographic scanner; evaluation and exploration[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5377**: 160~171
- Yuji Chiba, Kazuhiro Takahashi. New-generation projection optics for ArF lithography [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4691**: 679~686
- Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. In-situ measurement methods of lens aberrations [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(6): 33~37 (in Chinese)
王帆,王向朝,马明英等. 光刻机投影物镜像差现场测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(6): 33~36
- H. Nomura, T. Sato. Techniques for measuring aberrations in lenses used in photolithography with printed patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13): 2800~2807
- H. Nomura, K. Tawarayama, T. Kohno. Aberration measurement from specific photolithographic images; a different approach[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1136~1147
- César M. Garza, Will Conley, Bernie Roman *et al.*. Ring test aberration determination and device lithography correlation[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 36~44
- Marco Moers, Hans van der Laan, Mark Zellenrath *et al.*. Application of the aberration ring test (ARTEMISTM) to determine lens quality and predict its lithographic performance [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 1379~1387
- 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]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 394~407
- van der Laan, Marco H. Moers. Method of measuring aberration in an optical imaging system[P]. US Patent 6646729. 2003-11
- M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th ed. Pergamon, Cambridge, 1999. 517~543