

文章编号: 0253-2239(2006)07-1037-6

基于套刻误差测试标记的彗差检测技术*

马明英^{1,2} 王向朝¹ 王帆¹ 施伟杰¹ 张冬青¹

(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: 为了满足光刻机投影物镜彗差测量精度的要求, 提出一种基于套刻误差测试标记的彗差检测技术, 分析了彗差对套刻误差测试标记空间像的影响, 详细叙述了该技术的测量原理, 并利用 PROLITH 光刻仿真软件对不同数值孔径与部分相干因子设置下套刻误差相对于彗差的灵敏度系数进行了仿真实验。结果表明, 与目前国际上通常使用的投影物镜彗差检测技术相比, 该技术在传统照明条件下灵敏度系数 K_{z7} 与 K_{z14} 的变化范围分别增加了 27.5% 和 34.3%, 而在环形照明条件下则分别增加了 20.4% 和 22.1%, 因此彗差的测量精度可提高 20% 以上。

关键词: 光学测量; 光刻机; 彗差; 套刻误差; 投影物镜

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Novel Method for Measuring Coma with Fine Overlay Test Marks

Ma Mingying^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Wang Fan¹ Shi Weijie¹ Zhang Dongqing¹

(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 order to meet the demand of coma measurement accuracy of lithographic tool projection lens, a novel method for measuring coma based on fine overlay error metrology marks is proposed. The impact of coma on the aerial image of the fine overlay metrology marks is analyzed and the principle of the method is described in detail. The sensitivity coefficients of overlay error relative to coma are obtained by the simulation software PROLITH under different numerical aperture and partial coherent factor. The simulation results show that with the conventional illumination condition, the ranges of sensitivity coefficients K_{z7} and K_{z14} are increased by 27.5% and 34.3% respectively, 20.4% and 22.1% for annular illumination. Compared with the widely used projection lens coma measurement method TAMIS, the accuracy of coma measurement is increased by 20%.

Key words: optical measurement; lithographic tool; coma; overlay error; projection lens

1 引言

光刻机是集成电路制造与生产中的关键设备之一。套刻精度是衡量光刻机光刻性能的一个关键指标^[1,2]。光刻机投影物镜的彗差使掩模上的图形曝光、显影后在硅片上形成的图形在成像平面内发生位置偏移, 引起套刻误差, 从而影响套刻精度^[3~5]。随着光刻特征尺寸的不断减小, 彗差对光刻机套刻

精度的影响越来越突出^[6]。因此, 更高精度的彗差现场测量技术不可或缺。

目前, 多照明设置空间像测量技术(TAMIS)^[7~9]是国际上用于检测光刻机投影物镜彗差的主要技术。该技术通过透射式像传感器获得到掩模测试标记的成像位置偏移量计算彗差。但该技术依赖于硬件, 要求光刻机中必须安装透射式像传感器。另

* 国家 863 计划(2002AA4Z3000)资助课题。

作者简介: 马明英(1978~), 女, 河南鹤壁人, 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室博士研究生, 主要从事高分辨力步进扫描光刻机像质在线检测技术方面的研究。E-mail: mamy7812@yahoo.com.cn

导师简介: 王向朝(1957~), 男, 辽宁人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电技术的研究。E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-08-17; 收到修改稿日期: 2005-10-12

外,随着光刻工艺因子的不断减小^[10,11],对彗差测量精度的要求进一步提高,多照明设置空间像测量技术无法满足彗差测量精度的要求。

本文提出了一种基于套刻误差测试标记的彗差检测技术(Coma aberration measurement using fine overlay error marks, CMFO)。采用一种具有精细结构的套刻误差测试标记,根据在不同数值孔径与部分相干因子设置下曝光到硅片上的测试标记图形的套刻误差计算出光刻机投影物镜的彗差。与目前国际上通常使用的多照明设置空间像测量技术相比,本技术直接利用光刻机现场必备的套刻误差专用测量仪器,无需在光刻机中专门安装用于检测彗差的硬件,同时彗差检测精度得到提高。此外,该技术还可用于投影光刻机像面平移、像面旋转、倍率变化、畸变等套刻像质参量的检测。

2 原 理

2.1 彗差对套刻误差测试标记空间像的影响

如图 1 所示,本技术使用的套刻误差测试标记由线宽为 $0.25 \mu\text{m}$ 的内部密集线条标记 A 与线宽为 $2 \mu\text{m}$ 的外部孤立线条标记 B 两部分图形组成。曝光到硅片上的任意套刻误差测试标记图形的套刻误差为硅片上套刻误差测试标记图形的两部分图形中心的相对位置偏移量^[12],如图 2 所示,套刻误差测试标记的内部密集线条标记 A 图形的中心为 O_1 ,外部孤立线条标记 B 图形的中心为 O_2 , O_1 与 O_2 的相对位置偏移量 ΔX 与 ΔY 即为套刻误差。

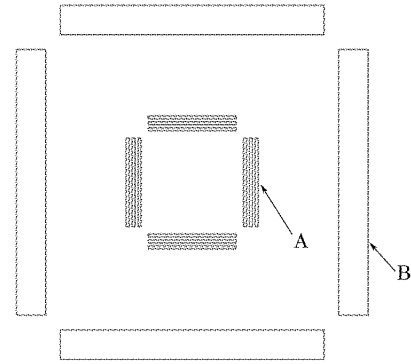


图 1 套刻误差测试标记

Fig. 1 Overlay error metrology mark

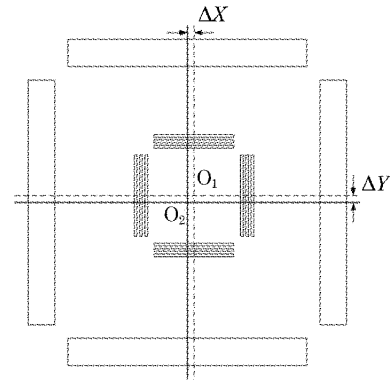


图 2 套刻误差示意图

Fig. 2 Schematic of overlay error

投影物镜的彗差通常使用泽尼克系数来表征。泽尼克系数由表示波像差的函数 $W(\rho, \theta)$ 分解为泽尼克多项式的形式后得到:

$$W(\rho, \theta) = Z_1 + Z_2 \cdot \rho \cos \theta + Z_3 \cdot \rho \sin \theta + Z_4 \cdot (2\rho^2 - 1) + Z_5 \cdot \rho^2 \cos 2\theta + Z_6 \cdot \rho^2 \sin 2\theta + Z_7 \cdot (3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta + Z_8 \cdot (3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta + \dots + Z_{14}(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta + Z_{15}(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta + \dots, \quad (1)$$

其中 ρ, θ 为物镜出瞳面上的归一化极坐标^[13]。泽尼克系数 Z_7, Z_8 分别表示 X 向三阶彗差与 Y 向三阶彗差, Z_{14}, Z_{15} 分别表示 X 向五阶彗差与 Y 向五阶彗差。

由(1)式可知,由三阶彗差得到的波像差函数 $W_{cl}(\rho, \theta)$ 可表示为

$$W_{cl}(\rho, \theta) = Z_7 \cdot (3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta + Z_8 \cdot (3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta. \quad (2)$$

根据位移定理,当投影物镜存在由 $W_{cl}(\rho, \theta)$ 表示的像差时,像面上的光强分布相对于无像差时产生成像位置偏移量为

$$\Delta X_{Z_7}(\rho) \propto Z_7(3\rho^2 - 2),$$

$$\Delta Y_{Z_8}(\rho) \propto Z_8(3\rho^2 - 2), \quad (3)$$

同理可知,五阶彗差引起空间像在成像平面内的位置偏移量

$$\Delta X_{Z_{14}}(\rho) \propto Z_{14}(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3), \quad (4)$$

$$\Delta Y_{Z_{15}}(\rho) \propto Z_{15}(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3).$$

对于图 1 中所示的套刻误差测试标记,线宽为 $0.25 \mu\text{m}$ 的密集线条标记 A 的空间像,由彗差引起的位置偏移量可由(3)式、(4)式表示。线宽为 $2 \mu\text{m}$ 的孤立线条标记 B 通过投影物镜时产生的 ± 1 级衍射光集中在物镜出瞳的中心附近,因此,对于线宽为 $2 \mu\text{m}$ 的孤立线条标记 B 的空间像,由三阶彗差与五

阶彗差引起的位置偏移量为

$$\begin{aligned} \Delta X_{Z_7}(\rho) &\propto -2Z_7, & \Delta Y_{Z_8}(\rho) &\propto -2Z_8, \\ \Delta X_{Z_{14}}(\rho) &\propto 3Z_{14}, & \Delta Y_{Z_{15}}(\rho) &\propto 3Z_{15}. \end{aligned} \quad (5)$$

由上述分析可知,当投影物镜存在彗差时,组成套刻误差测试标记的两部分图形的相对成像位置偏移量即彗差引起的套刻误差,:

$$\begin{aligned} \Delta X_{Z_7}(\rho) &\propto 3Z_7\rho^2, \\ \Delta Y_{Z_8}(\rho) &\propto 3Z_8\rho^2, \\ \Delta X_{Z_{14}}(\rho) &\propto Z_{14}(10\rho^4 - 12\rho^2), \\ \Delta Y_{Z_{15}}(\rho) &\propto Z_{15}(10\rho^4 - 12\rho^2), \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可知,由彗差引起的套刻误差的大小与光线的空间频率有关。在彗差一定的情况下,改变投影物镜的数值孔径或照明系统的部分相干因子将使不同空间频率光线的光强分布发生变化,从而使套刻误差测试标记在成像平面内的套刻误差发生变化,即彗差使套刻误差测试标记在成像平面内产生套刻误差,且套刻误差的大小与投影物镜的数值孔径、照明系统的部分相干因子有关。

2.2 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术检测原理

基于套刻误差测试标记的彗差检测技术是一种基于硅片曝光的彗差检测技术。如图3所示,其检测过程包括标记曝光、硅片后烘与显影、套刻误差获取与彗差计算等四个过程。在一系列不同的投影物镜数值孔径与照明系统的部分相干因子设置下,将若干套刻误差测试标记曝光在涂有光刻胶的硅片上。硅片后烘与显影后,在硅片上的光刻胶上形成套刻误差测试标记的图形。利用专用套刻误差测量仪器(如KLA-Tencor公司的Archer 10套刻误差测量仪器)可得到这些套刻误差测试标记图形在硅片上不同位置处,对应于不同数值孔径与部分相干因子设置的套刻误差。由于彗差引起的套刻误差与彗差成线性关系,且彗差各分量之间的影响互相独立,套刻误差可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta X_o(NA, \sigma) &= d_x + K_{Z_7}(NA, \sigma) \cdot Z_7 + \\ &K_{Z_{14}}(NA, \sigma) \cdot Z_{14} + R_x, \\ \Delta Y_o(NA, \sigma) &= d_y + K_{Z_8}(NA, \sigma) \cdot Z_8 + \\ &K_{Z_{15}}(NA, \sigma) \cdot Z_{15} + R_y, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Delta X_o(NA, \sigma), \Delta Y_o(NA, \sigma)$ 表示在不同数值孔径 NA 与部分相干因子 σ 设置下测得的套刻误差; d_x, d_y 为像面平移等套刻像质参量引起的套刻误差; $K_{Z_i}(NA, \sigma)$ 为套刻误差相对于彗差的灵敏度系数,其中 $i = 7, 8, 14, 15$,即 Z_i 为1 nm时由 Z_i 引起

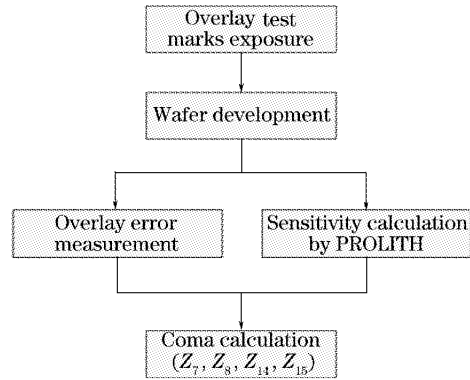


图3 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术彗差检测流程图

Fig. 3 Flow chart of measurement of coma using CMFO technique

的套刻误差大小; R_x, R_y 为残余误差。

灵敏度系数随投影物镜的数值孔径与照明系统的部分相干因子变化,可利用PROLITH等光刻仿真软件进行仿真计算得到。如计算灵敏度系数 $K_{Z_7}(NA, \sigma)$,可选择一定的数值孔径与部分相干因子,取泽尼克系数 Z_7 为一定值 x nm,其他泽尼克系数为0,再利用光刻仿真软件进行仿真得到由 X 向三阶彗差 Z_7 引起的套刻误差为 $\Delta X_o(NA, \sigma)$ 。那么数值孔径与部分相干因子的灵敏度系数 $K_{Z_7}(NA, \sigma)$ 可计算得到,

$$K_{Z_7}(NA, \sigma) = \frac{\Delta X_o(NA, \sigma)}{x}, \quad (8)$$

选择不同的数值孔径与部分相干因子设置,可利用光刻仿真软件进行仿真计算得到灵敏度系数 $K_{Z_7}(NA, \sigma)$ 的不同值。同理,可计算得到对应于不同数值孔径与部分相干因子设置的灵敏度系数 $K_{Z_8}(NA, \sigma), K_{Z_{14}}(NA, \sigma), K_{Z_{15}}(NA, \sigma)$ 的值。

根据不同数值孔径与部分相干因子设置下得到的套刻误差与灵敏度系数,再利用最小二乘法拟合(7)式即可计算出表征光刻机投影物镜彗差的泽尼克系数 Z_7, Z_8, Z_{14}, Z_{15} 。

在曝光视场中按照(7)式计算不同位置处由像面平移等套刻像质参量引起的套刻误差,将计算得到的各个 d_x 与 d_y 代入下式中,即可获得像面平移等套刻像质参量,

$$\begin{aligned} d_x &= T_x + x_0 M - y_0 \phi + x_0 r_0^2 D_3, \\ d_y &= T_y + y_0 M + x_0 \phi + y_0 r_0^2 D_3, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 T_x, T_y 分别为 X 向像面平移与 Y 向像面平移; M 为倍率变化量; ϕ 为像面旋转; D_3 为三级畸变。

由(7)式可看出,在套刻误差检测精度一定的情况下,灵敏度系数的变化范围是决定彗差检测精

度的关键因素。

3 仿真实验

我们使用 PROLITH 光刻仿真软件在曝光波长为 193 nm, 投影物镜数值孔径最大为 0.8 的条件下进行仿真实验。

图 4 为基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中利用 PROLITH 光刻仿真软件仿真计算得到的灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 随不同数值孔径与部分相干因子的等高图。图 5 为多照明设置空间像测量技术中利用 PROLITH 光刻仿真软件仿真计算得到

的灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 随不同数值孔径与部分相干因子的等高图。由图 4 与图 5 的比较可以看出, 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的变化范围大于多照明设置空间像测量技术中灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的变化范围。表 1 列出了不同条件下灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的变化范围。由表 1 可知, 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术与多照明设置空间像测量技术相比, 在传统照明条件下灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的变化范围提高了 27.5%, 而在环形照明条件下则提高了 20.4%。

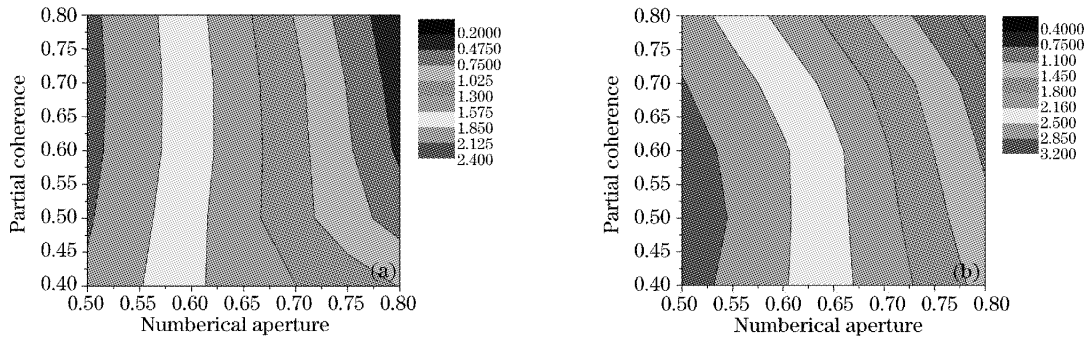


图 4 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 在 (a) 传统照明条件下与 (b) 环形照明条件下随数值孔径与部分相干因子变化等高图

Fig. 4 Contours of sensitivity coefficient $K_{z_7}(NA, \sigma)$ under conventional (a) and annular (b) illumination condition used by CMFO technique

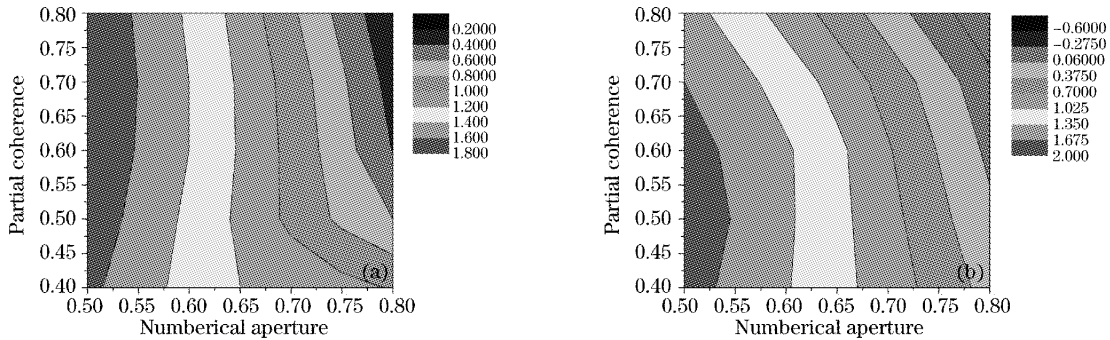


图 5 多照明设置空间像测量技术中灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 在 (a) 传统照明条件下与 (b) 环形照明条件下随数值孔径与部分相干因子变化等高图

Fig. 5 Contours of sensitivity coefficient $K_{z_7}(NA, \sigma)$ under conventional (a) and annular (b) illumination condition used by TAMIS technique

表 1 不同条件下灵敏度系数 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的仿真计算结果比较

Table 1 Comparison of simulation results of sensitivity coefficient $K_{z_7}(NA, \sigma)$ under different conditions

Conditions		Maximum	Minimum	Variation range
Conventional illumination	CMFO technique	2.21	0.26	1.95
	TAMIS technique	1.76	0.23	1.53
Annular illumination	CMFO technique	3.04	0.15	2.89
	TAMIS technique	1.84	-0.56	2.40

图 6 为基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中利用 PROLITH 光刻仿真软件仿真计算得到的灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 随不同数值孔径与部分相干因子的等高图。图 7 为多照明设置空间像测量技术中利用 PROLITH 光刻仿真软件仿真计算得到的灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 随不同数值孔径与部分相干因子的等高图。由图 6 与图 7 的比较可以看出, 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中灵敏

度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的变化范围大于多照明设置空间像测量技术中灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的变化范围。表 2 列出了不同条件下灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的变化范围。由表 2 可知, 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术与多照明设置空间像测量技术相比, 在传统照明条件下灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的变化范围提高了 34.3%, 而在环形照明条件下则提高了 22.1%。

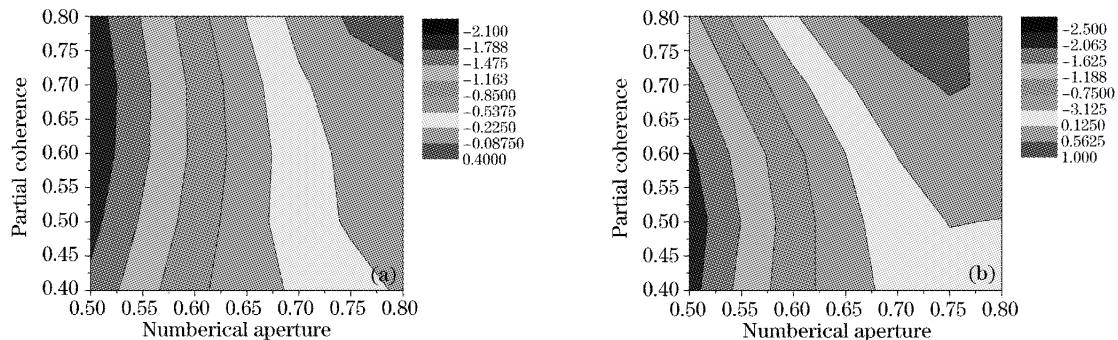


图 6 基于套刻误差测试标记的彗差检测技术中灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 在 (a) 传统照明条件下与 (b) 环形照明条件下随数值孔径与部分相干因子变化等高图

Fig. 6 Contours of sensitivity coefficient $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ under conventional (a) and annular (b) illumination condition used by CMFO technique

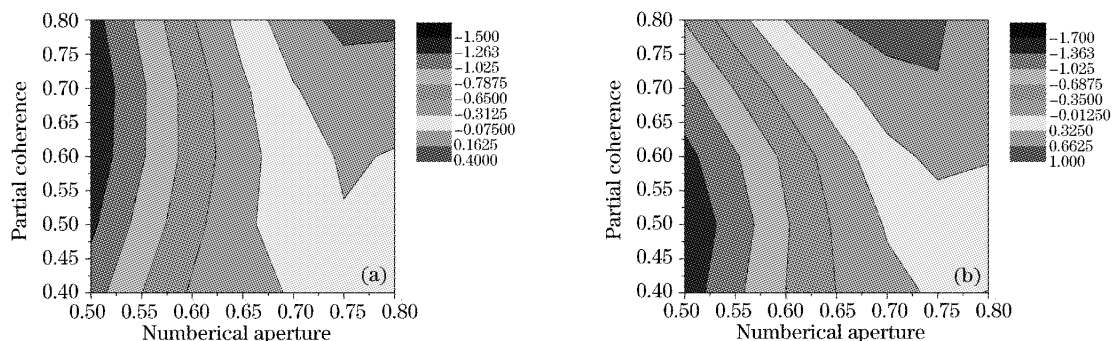


图 7 多照明设置空间像测量技术中灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 在 (a) 传统照明条件下与 (b) 环形照明条件下随数值孔径与部分相干因子变化等高图

Fig. 7 Contours of sensitivity coefficient $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ under conventional (a) and annular (b) illumination condition used by TAMIS technique

表 2 不同条件下灵敏度系数 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的仿真计算结果比较

Table 2 Comparison of simulation results of sensitivity coefficient $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ under different conditions

Conditions		Maximum	Minimum	Variation range
Conventional illumination	CMFO technique	0.20	-2.03	2.23
	TAMIS technique	0.22	-1.44	1.66
Annular illumination	CMFO technique	0.68	-2.30	2.98
	TAMIS technique	0.81	-1.63	2.44

Y 向彗差引起的 Y 向套刻误差的大小分别与 X 向相应彗差引起的 X 向套刻误差的大小相同, 因此灵敏度系数 $K_{z_8}(NA, \sigma)$ 与 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的值相

等, 灵敏度系数 $K_{z_{15}}(NA, \sigma)$ 与 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的值相等, 从而 $K_{z_{15}}(NA, \sigma)$ 与 $K_{z_{14}}(NA, \sigma)$ 的变化情况分别与 $K_{z_8}(NA, \sigma)$ 与 $K_{z_7}(NA, \sigma)$ 的变化情况相同。

4 结 论

提出了一种基于套刻误差测试标记的彗差检测技术,利用 PROLITH 光刻仿真软件对不同数值孔径与部分相干因子设置下套刻误差相对于彗差的灵敏度系数进行了仿真实验。结果表明,与目前国际上通常使用的多照明设置空间像测量检测技术相比,该技术在传统照明条件下,灵敏度系数 K_{z_7} 与 $K_{z_{14}}$ 的变化范围分别增加了 27.5% 与 34.3%,而在环形照明条件下则分别增加了 20.4% 与 22.1%。因此,在传统照明条件下,彗差的检测精度可提高 25% 以上,而在环形照明条件下则可提高 20% 以上。

参 考 文 献

- 1 Ronfu Chu, Chungwei Hsu, Tsu-Wen Hwang. Characterizing lens distortion to overlay accuracy by using fine measurement pattern[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3677**: 83~94
- 2 Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqing *et al.*. An in-situ method for measuring the overlay performance of a lithographic system with mirror-symmetry FOCAL marks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 398~402 (in Chinese)
施伟杰,王向朝,张冬青等. 基于镜像焦面检测对准标记的套刻性能原位测量技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 398~402
- 3 M. A. van den Brink, C. G. M. de Mol, R. A. George. Matching performance for multiple wafer steppers using an advanced metrology procedure[C]. *Proc. SPIE*, 1988, **921**: 180~197
- 4 Jieh-Jang Chen, Chen-Ming Huang, Fan-Jia Shiu *et al.*. Influence of coma effect on scanner overlay[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4689**: 280~285
- 5 Hiroshi Nomura, Takashi Sato. Overlay error due to coma and asymmetric illumination dependence on pattern feature[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3332**: 83~94
- 6 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. On-site coma measurement technique base on linewidth asymmetry of the aerial image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 673~678 (in Chinese)
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
- 7 Hans van der Laan, Marcel Hans 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
- 8 Fan Wang, Xiangzhao Wang, Mingying Ma *et al.*. Coma measurement by transmission image sensor with PSM[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5645**: 208~216
- 9 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. In-situ measurement methods of lens aberration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(6): 33~36 (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]. *激光与光电子进展*, 2004, **41**(6): 33~36
- 10 Paul Gräcupner, Reiner Garreis, Aksel Göhnermeier *et al.*. Impact of wavefront errors on low k_1 processes at extreme high NA[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5040**: 119~130
- 11 Christian Wagner, Winfried Kaiser, Jan Mulkens *et al.*. Advanced technology for extending optical lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4000**: 344~357
- 12 Takashi Sato, Hiroshi Nomura. Coma aberration measurement by relative shift of displacement with pattern dependence[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**: 3553~3557
- 13 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 517~543