

文章编号: 0258-7025(2007)08-1130-06

一种检测光刻机激光干涉仪测量系统 非正交性的新方法

何乐^{1,2}, 王向朝¹, 马明英^{1,2}, 施伟杰¹, 王帆^{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 提出一种精确检测光刻机激光干涉仪测量系统非正交性的新方法。将对准标记曝光到硅片表面并进行显影; 利用光学对准系统测量曝光到硅片上的对准标记理论曝光位置与实际读取位置的偏差; 由推导的位置偏差与非正交因子、坐标轴尺度比例、过程引入误差的线性模型, 根据最小二乘原理计算出干涉仪测量系统的非正交性。实验结果表明, 利用该方法使用同一硅片在不同旋转角下进行测量, 干涉仪测量系统非正交因子的测量重复精度优于 $0.01 \mu\text{rad}$, 坐标轴尺度比例的测量重复精度优于 0.7×10^{-6} 。使用不同的硅片进行测量, 非正交因子的测量再现性优于 $0.012 \mu\text{rad}$, 坐标轴尺度比例的测量再现性优于 0.6×10^{-6} 。

关键词 测量; 激光干涉仪; 非正交性; 光学对准; 工件台; 光刻机

中图分类号 TN 305.7 文献标识码 A

Novel Method for Measuring Non-Orthogonality of Interferometer System in Step and Scan Lithographic Tool

HE Le^{1,2}, WANG Xiang-zhao¹, MA Ming-ying^{1,2}, SHI Wei-jie¹, WANG Fan^{1,2}

¹ Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A novel method for measuring the non-orthogonality of the interferometer system in a step and scan lithographic tool is presented. First a linear module among the non-orthogonal factor, scaling factor and process related system error has been developed. By real lithographic process the alignment marks are transferred to the wafer, and after development the positions of marks are read out by optic alignment system in the same lithographic tool. The measurement data are used to calculate the non-orthogonal factor and scaling factor of the interferometer by the linear model according to the least square principle. Experimental results show that by this method with the same wafer in different rotation, the measurement repeatability of the non-orthogonal factor is better than $0.01 \mu\text{rad}$, and the measurement repeatability of the y to x scaling factor is better than 0.7×10^{-6} . With different wafer in the same condition, the measurement reproducibility of the non-orthogonal factor is better than $0.012 \mu\text{rad}$, and the measurement reproducibility of the y to x scaling factor is better than 0.6×10^{-6} .

Key words measurement; interferometer; non-orthogonality; optic alignment; wafer stage; lithographic tool

1 引言

当前主流光刻设备已普遍采用步进扫描的工作

方式,能够实现低于 100 nm 的光刻工艺^[1~3]。特征尺寸的降低要求光刻过程中掩模与硅片具有更稳定的物像关系,不仅体现于高精度的对准技术,更重要

收稿日期: 2006-11-02; 收到修改稿日期: 2007-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(60578051)和国家 863 计划(2002AA4Z3000)资助项目。

作者简介: 何乐(1978—),男,江苏人,博士研究生,主要从事光刻模型、设备优化算法开发等方面的研究。

E-mail: hele0511@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—),男,辽宁人,研究员,博士生导师,目前研究领域为信息光电子技术。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

的是确保曝光过程中硅片与掩模以一致的匀速直线运动进行扫描^[4~6]。在步进扫描式光刻机中,使用平面镜干涉仪测量工件台的水平位置^[7,8],测量结果被实时反馈到运动控制系统,确保硅片与掩模的同步扫描。由于加工和安装精度的限制,工件台相邻的两个侧面不绝对正交,干涉仪发出的测量光束之间也不绝对平行,使干涉仪测量系统存在非正交性误差,导致测量值与真实值存在偏差而降低了光刻机的套刻精度^[9,10]。为了检测出这种非正交性误差,通常以干涉仪测量轴的非正交夹角表示干涉仪测量系统的非正交因子,测量轴单位尺度的比值表示非正交性导致的测量轴尺度偏差。现有技术通常采用相对测量的手段实现。其特征是采用刻有正交标记的参考硅片作为测量和参考媒介,利用光学对准系统读取每一个标记的位置,根据测量位置拟合得到两条直线,通过几何法求出直线的夹角以确定测量系统的非正交因子^[11~13]。由于坐标轴尺度偏差难以计算,这类技术也采用将硅片旋转 90° 后再进行对准测量,利用几何关系建立旋转后的测量位置与理论位置的线性关系,并考虑测量坐标轴尺度偏差的影响,通过拟合和方程求解的手段确定测量系统的非正交因子和坐标轴尺度偏差。由于干涉仪测量系统会受到曝光过程的影响,如照明光束引起的工件台变形、硅片变形等,因而使脱离实际曝光过程的检测方法无法测得准确的结果。

本文提出一种检测光刻机激光干涉仪测量系统非正交性的新方法。该方法步进能精确地测量出干涉仪测量系统的非正交因子和坐标轴尺度偏差,也能测量出硅片上片的位置偏差和硅片形变因子。该方法利用硅片曝光来进行检测,考虑了曝光过程对干涉仪测量系统的影响,因而检测结果更加准确。

2 测量原理

2.1 计算模型

步进扫描式光刻机的双频激光干涉仪测量系统由工件台、平面镜激光干涉仪组成^[14,15],如图 1 所示。其中,方镜安装于工件台的侧面。工件台自身的非正交夹角 φ ,干涉仪测量光束的非平行性夹角 $(\alpha_1 + \alpha_2)$, $(\beta_1 + \beta_2)$ 以及方镜的非正交夹角 θ 共同导致了干涉仪测量系统的非正交性。理论上,干涉仪测得的工件台位置与理论位置的偏差可表示为

$$\Delta P = P_{\text{actual}} - P_{\text{theory}} = \frac{\partial P}{\partial O}O + \frac{\partial P}{\partial S}S + e, \quad (1)$$

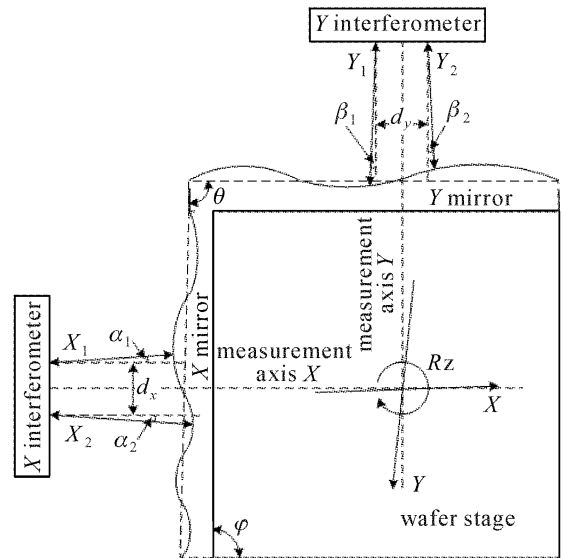


图 1 干涉仪测量系统的基本组成

Fig. 1 Structure of interferometer measurement system in a step and scan lithographic tool

式中 P_{theory} 与 P_{actual} 分别为工件台的理论位置与实测位置, O 为干涉仪测量系统的非正交因子, S 为干涉仪测量系统的测量坐标轴尺度, e 为其他误差。(1)式所表示的关系近似线性,若推导出该线性关系并证明非线性误差足够小而不影响计算结果,就可由推导的线性关系求解干涉仪测量系统的非正交性。

在硅片上某处曝光一个图样,之后硅片旋转一个角度再测量出图样的位置。在曝光与测量过程中共包含了设置值、期望值、测量值和实际值。设置值表示图样曝光的理论位置,用下标 S 表示;期望值表示硅片旋转后图样的理想位置,用下标 E 表示;测量值表示测量的图样位置,用下标 M 表示;实际值表示曝光和测量时工件台移动到的实际位置,用下标 A 表示。此外,约定用上标 e 表示曝光过程, r 表示测量过程。

由坐标系旋转原理建立期望值与设置值的关系

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r = T \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_S^e, \quad T = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 α 为硅片旋转角。设 X 轴测量尺度与标准尺度的关系为

$$S_x = (1 + N)S_0, \quad (3)$$

式中 S_0 为标准尺度, S_x 为 X 轴测量尺度, N 为倍率缩放因子,为干涉仪的标定常数。考虑到干涉仪测量系统非正交性易受到工作环境的影响,故采用系统非正交性的增量 ΔO 和 ΔS_{yx} 作为研究对象,其中 S_{yx} 表示 Y 轴测量尺度与 X 轴测量尺度的比例。以 X 轴测量尺度为基准,确定设置位置与实际曝光位置的

关系为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_S^e = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^e + \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_S^e \Delta S_{yx} - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_S^e \Delta O, \quad (4)$$

对准测量位置与工件台实际位置的关系为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_M^r = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^r + \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_M^r \Delta S_{yx} - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_M^r \Delta O. \quad (5)$$

理想情况下,工件台在标记曝光时的位置和对准测量时的位置应满足(2)式关系。实际情况下,由于硅片上片时存在位置偏差和旋转角偏差,同时硅片自身也会由于环境和化学反应产生膨胀变形,这些因素通过对准系统扫描硅片上标记图样的过程转移到工件台定位上,得到

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^r = (1 + \Delta M) \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\mu \\ \Delta\mu & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^e \\ \Delta X_\alpha \\ \Delta Y_\alpha \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $(1 + \Delta M)$ 为硅片的膨胀系数, $\Delta\mu$ 为硅片上片的旋转角偏差, $\Delta X_\alpha, \Delta Y_\alpha$ 分别为 X, Y 方向硅片上片的位置偏差。将(6)式中影响极小的高阶项滤除,整理得到

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^r = T \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^e + \begin{pmatrix} \Delta M & -\Delta\mu \\ \Delta\mu & \Delta M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r + \begin{bmatrix} \Delta X_\alpha \\ \Delta Y_\alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由(2)和(5)式将对准测量的位置偏差写为

$$\begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_M^r - \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r = \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^r + \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_M^r \Delta S_{yx} - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_M^r \Delta O \right] - \begin{bmatrix} T \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_S^r \\ \Delta X_\alpha \\ \Delta Y_\alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式并滤除影响极小的高阶项,整理得到

$$\begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_\alpha \\ \Delta Y_\alpha \end{bmatrix} - T \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_S^r - \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_A^r \right] + \begin{pmatrix} \Delta M & -\Delta\mu \\ \Delta\mu & \Delta M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r + \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_M^r \Delta S_{yx} - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_M^r \Delta O, \quad (9)$$

再将(4)式代入(9)式,整理得到

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta X_\alpha \\ \Delta Y_\alpha \end{bmatrix} - T \begin{pmatrix} 0 \\ Y \Delta S_{yx} - X \Delta O \end{pmatrix}_S^e + \begin{pmatrix} \Delta M & -\Delta\mu \\ \Delta\mu & \Delta M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r + \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_M^r \Delta S_{yx} - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_M^r \Delta O = \\ & \left[T \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_S^e - \begin{pmatrix} 0 \\ X \end{pmatrix}_E^r \right] \Delta O + \left[\begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_E^r - T \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix}_S^e \right] \Delta S_{yx} + \\ & \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta X_\alpha + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta Y_\alpha + \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_E^r \Delta M + \begin{pmatrix} -Y \\ X \end{pmatrix}_E^r \Delta\mu = \\ & \mathbf{C}_\alpha (\Delta O \quad \Delta S_{yx} \quad \Delta X_\alpha \quad \Delta Y_\alpha \quad \Delta M \quad \Delta\mu)^T, \quad (10) \end{aligned}$$

式中 \mathbf{C}_α 为与硅片旋转角 α 相关的测量数据矩阵。(10)式表明测量位置偏差同6个影响因子之间是线性关系。当测量数据充分时,可建立求解6个影响因子的超定方程组。根据最小二乘原理求解,将(10)式改写为矩阵形式

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}_\alpha \mathbf{P}, \quad (11)$$

式中 \mathbf{D} 为位置偏差矩阵, \mathbf{P} 表示7个待定参数,解得最后的结果为

$$\mathbf{P} = (\mathbf{C}_\alpha^T \mathbf{C}_\alpha)^{-1} \mathbf{C}_\alpha^T \mathbf{D}, \quad (12)$$

其残差为

$$R^2 = \left\| [1 - \mathbf{C}_\alpha (\mathbf{C}_\alpha^T \mathbf{C}_\alpha)^{-1} \mathbf{C}_\alpha^T] \mathbf{D} \right\| \sigma^2, \quad (13)$$

式中 σ 为测量值与期望值偏差的标准差。

2.2 对准测量方案

首先将掩模上的对准标记曝光到硅片表面,之后通过离轴光学对准系统测量标记位置,得到对准

标记实际曝光位置与期望位置间精确的位置偏移。检测过程中采用的硅片对准标记结构如图2所示,该标记分为四个部分,其中垂向分布的光栅部分用

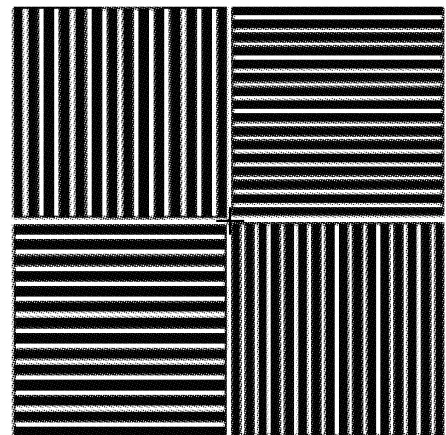


图2 硅片对准标记

Fig. 2 Sketch of the alignment mark

于测量 X 方向的位置偏移,横向分布的光栅部分用于测量 Y 方向的位置偏移^[16]。将对准标记曝光后,该标记的图样被转移到硅片表面。将硅片显影后重新送入光刻机,利用光刻机的离轴光学对准系统进行读数^[17,18]。图 3 给出了整个硅片上对准标记的曝光分布图样,包括在 X 方向上固定间隔的 3 行横排标记,以及在 Y 方向上固定间隔的 3 列纵向标记,

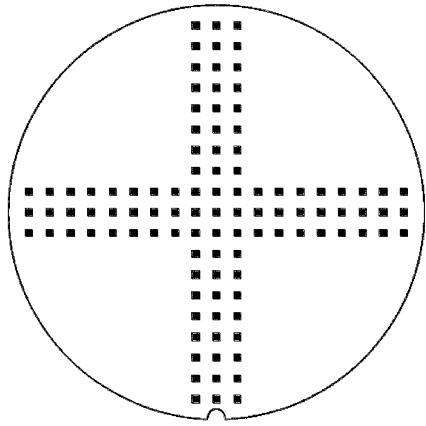


图 3 测量方案中对准标记在硅片表面曝光位置的分布图样

Fig. 3 Exposure positions layout of the alignment marks on a wafer

且分别关于硅片坐标轴对称。采用对称分布的结构是为增加测量点的数量,也可消除固有系统误差。

在进行对准测量时,为简化计算难度,分别采用了旋转 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 或 270° 的方案。对每一个转角下的测量结果根据(12)式计算干涉仪测量系统的非正交性,对所求结果进行平均,得到最终的非正交性测量结果。

3 实验与分析

采用扫描式光刻样机为实验平台,设置干涉仪测量系统的非正交因子初始值为 0,坐标轴尺度比例初始值为 1,并作用于光刻机的双频干涉仪。利用工艺编辑软件编写位置对准标记的曝光文件,使用 200 mm 硅片,选择曝光场为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,标记距离 5 mm,共 93 个标记。直接进行非零层曝光,曝光后将硅片显影,显影后送入同一光刻机进行对准,分别在硅片旋转 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 时对每一个标记图样进行测量。再从结果日志文件中提取出测量数据代入(11)式,在每一个转角下得到具有 186 个线性方程的超定方程组,根据(12)式利用 MATLAB 进行求解,计算结果如表 1 所示。

表 1 设置非正交性因子的初值为 0 以及坐标轴尺度比例的初值为 1 后首次实验的计算结果

Table 1 Measurement results when the initial non-orthogonal factor was 0 and the initial y to x scaling was 1

	$\Delta O / \mu\text{rad}$	$\Delta S_{yx} / (\times 10^{-6})$	ΔM	$\Delta \mu / \mu\text{rad}$	$\Delta X / \mu\text{m}$	$\Delta Y / \mu\text{m}$
0°	-7.212	3.111	0.008	-6.966	11.231	5.025
90°	-7.194	2.810	0.010	-6.932	10.180	4.828
180°	-7.213	3.714	0.009	-6.295	10.015	5.107
270°	-7.202	2.972	0.015	-7.027	11.467	5.083
Mean value	-7.20525	3.15180	0.01050	-6.80500	10.72325	5.01075
σ	0.00900	0.39450	0.00311	0.34226	0.73205	0.12660

表 2 以表 1 中非正交性因子的平均值与栅格尺度比例的平均值作为初始值后再次实验的计算结果

Table 2 Measurement results when the average non-orthogonal factor and y to x scaling in Table 1 were used as initial values

	$\Delta O / \mu\text{rad}$	$\Delta S_{yx} / (\times 10^{-6})$	ΔM	$\Delta \mu / \mu\text{rad}$	$\Delta X / \mu\text{m}$	$\Delta Y / \mu\text{m}$
0°	-0.061	1.048	0.008	-5.835	9.527	6.033
90°	-0.084	1.901	0.011	-7.012	10.130	5.241
180°	-0.067	2.337	0.013	-6.502	11.011	5.568
270°	-0.075	2.581	0.017	-6.883	10.628	6.001
Mean value	-0.07175	1.96680	0.01050	-6.55800	10.32400	5.71075
σ	0.00998	0.67400	0.00311	0.52840	0.64219	0.37821

由表 1 可以看到,由于设置了理想初值,首次实验中非正交因子、坐标轴尺度比例的偏差较大,这个结果反映了干涉仪测量系统当前的非正交性。由表

2 可以看到,以首次实验的计算值作为初始值,再次实验的计算结果中非正交性因子变化明显变小,说明计算结果较为准确地趋向表 1 的计算结果。不同

旋转角下的四次测量结果中非正交性因子的测量重复精度优于 $0.01 \mu\text{rad}$,坐标轴尺度比例测量重复精度优于 0.7×10^{-6} 。此外,由表 1 和表 2 也可以看到,上片误差与硅片膨胀因子受非正交性初始值的影响很小,因此该方法也可用来统计光刻机上片误差与硅片的膨胀系数。

利用卡方拟合优度来测量结果的准确度^[19,20],公式为

$$\chi^2 = \frac{R^2}{F} = \frac{R^2}{2n-6}, \quad (14)$$

式中 F 为自由度, n 为测量点数量。根据表 2 对应的测量数据,计算得到拟合优度为 0.997,该结果表明计算结果较好地符合实际情况。

图 4 与图 5 给出了以表 1 中非正交性测量平均值为初始值,使用同一片硅片在实验间隔为 30 min

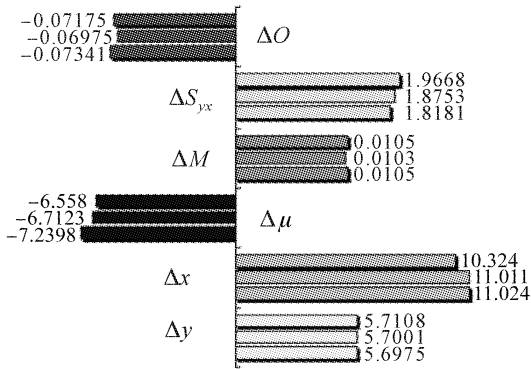


图 4 以表 1 中非正交性测量平均值作为初始值,使用同一硅片进行三次实验后计算结果的对比
Fig. 4 Results comparison of three experiments with the same wafer when the average non-orthogonal factor and y to x scaling in Table 1 were used as initial values

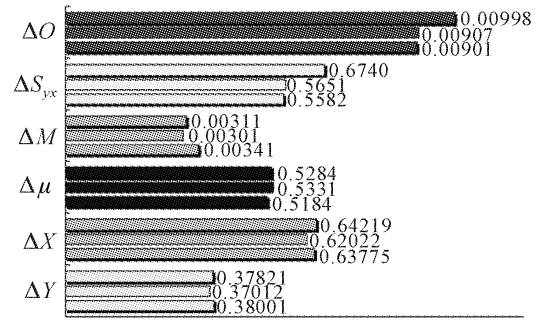


图 5 以表 1 中非正性测量平均值作为初始值,使用同一硅片进行三次实验后计算结果的标准差变化
Fig. 5 List of the standard deviations of three experiments with the same wafer when the average non-orthogonal factor and y to x scaling in Table 1 were used as initial values

时,进行三次实验的结果对比。其中,每一次实验后硅片被洗净再进行下一次的实验。可以看到,使用同一片硅片进行三次测量,非正交因子的最大标准差优于 $0.01 \mu\text{rad}$,坐标轴尺寸比例的最大标准差优于 0.7×10^{-6} 。上片误差与硅片膨胀的结果变化趋于稳定,上片位置偏差的最大标准差在 X 方向优于 $0.70 \mu\text{m}$, Y 方向优于 $0.40 \mu\text{m}$,旋转角偏差的最大标准差优于 $0.54 \mu\text{rad}$,硅片膨胀系数差值的最大标准差优于 0.0035 。

表 3 给出了使用 4 片不同硅片在同一非正交性初值下,进行同样测量的结果比对。该结果表明,使用不同的硅片利用该方法进行测量,非正交因子的测量再现性优于 $0.012 \mu\text{rad}$,坐标轴尺度比例的测量再现性优于 0.6×10^{-6} 。该精度与使用同一硅片的测量结果基本相符。由于硅片个体差异的影响,上片误差与硅片膨胀大于使用同一硅片的计算结果。

表 3 4 片不同的硅片进行同一实验的计算结果

Table 3 Calculation results for four different wafers with the same initial values

	$\Delta O / \mu\text{rad}$	$\Delta S_{yx} / (\times 10^{-6})$	ΔM	$\Delta \mu / \mu\text{rad}$	$\Delta X / \mu\text{m}$	$\Delta Y / \mu\text{m}$
Wafer 1	-0.084	2.667	0.010	-6.835	11.123	9.075
Wafer 2	-0.062	1.297	0.024	-7.712	12.575	9.196
Wafer 3	-0.077	1.628	0.008	-8.502	11.202	8.501
Wafer 4	-0.089	2.131	0.027	-5.998	10.997	8.322
Mean value	-0.07800	1.93080	0.01730	-7.26180	11.47430	8.77350
σ	0.01175	0.59874	0.00964	1.08322	0.73867	0.42721

该方法中,根据测量结果建立的是超定方程组,在某些特殊情况下,仅使用(13)式会产生求解误差较大的情况,此时对超定方程组的求解需要使用其他方法,如使用矩阵的单值分解结合最小二乘原理

可取得较好的计算结果^[21]。

4 结 论

提出了一种检测光刻机激光干涉仪测量系统非

正交性的新方法。将对准标记曝光到硅片表面并进行显影,利用光学对准系统测量对准标记理论曝光位置与实际读取位置的偏差;根据实际曝光和对准测量流程,推导了对准标记图样的位置偏移量与干涉仪测量系统非正交因子、坐标轴尺度比例、硅片上片偏差和膨胀等参数的线性关系;代入测量数据由最小二乘原理计算得到干涉仪测量系统的非正交性。实验结果表明,利用该方法使用同一硅片在不同旋转角下进行测量,干涉仪测量系统非正交因子的测量重复精度优于 $0.01 \mu\text{rad}$,坐标轴尺度比例的测量重复精度优于 0.7×10^{-6} 。使用不同的硅片进行测量,非正交因子的测量再现性优于 $0.012 \mu\text{rad}$,坐标轴尺度比例的测量再现性优于 0.6×10^{-6} 。

参 考 文 献

- R. Rubingh, Y. van Dommelen, S. Tempelaars *et al.*. Performance of a high productivity 300 mm dual stage 193 nm 0.75 NA TWINSCAN at: 1100B system for 100 nm applications [J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2003, **2**(1):8~18
- Atsushi Otake, Emi Araya, Hikaru Momose *et al.*. Design and development of novel monomers and copolymers for 193-nm lithography [C]. *SPIE*, 2004, **5376**:591~598
- Itaru Fujita, Fumio M. Sakai, Shigeyuki Uzawa. Next-generation scanner to sub-100-nm lithography [C]. *SPIE*, 2003, **5040**:811~821
- Liu Dan, Cheng Zhaogu, Gao Haijun *et al.*. Progress of wafer stage and reticle stage for step-and-scan-lithography system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(5):14~20
刘 丹,程兆谷,高海军等. 步进扫描投影光刻机工件台和掩模台的进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(5):14~20
- Gerard de Zwart, Martin A. van den Brink, Richard A. George *et al.*. Performance of a step-and-scan system for DUV lithography [C]. *SPIE*, 1997, **3051**:817~835
- Boudewijn Sluijk, Tom Castenmiller, Richard du Croo de Jongh *et al.*. Performance results of a new generation of 300-mm lithography systems [C]. *SPIE*, 2001, **4346**:544~557
- K. C. Fan, M. J. Chen. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages [J]. *Precision Engineering*, 2000, **24**(1):15~23
- Philip D. Henshaw, Donald P. DeGloria, Sandra A. Kelly *et al.*. Real-time stage position measurement with nanometer-scale accuracy [C]. *SPIE*, 1997, **3051**:913~921
- J. Montoya, R. K. Heilmann, M. L. Schattenburg. Measuring two-axis stage mirror non-flatness using linear/angular interferometers [C]. *ASPE*, 2004, (34):382~385
- M. A. van den Brink, J. M. D. Stoeldraijer, H. F. D. Linders *et al.*. Overlay and field by field leveling in wafer steppers using an advanced metrology system [C]. *SPIE*, 1992, **1673**:330~346
- Syed A. Rizvi. A problem in position metrology [J]. *SRC Newsletter*, 1992, **10**(1):6~8
- Henry A. Hill. Interferometric servo control system for stage metrology [P]. United States Patent, US007046367, 2006-05-16
- C. J. Evans, A. D. Davies, T. Schmitz *et al.*. Interferometric figure metrology; enabling in-house traceability [C]. *SPIE*, 2001, **4450**:81~93
- Tao Zhu, Yanqiu Li. Study on control strategy of wafer stage and reticle stage of EUVL [C]. *SPIE*, 2006, **6149**:512~515
- Honda Kazuhiro. Instrument and method for metrology [P]. United States Patent, US006928184, 2005-08-09
- Jaap H. M. Neijzen, Robert D. Morton, Peter Dirksen *et al.*. Improved wafer stepper alignment performance using an enhanced phase grating alignment system [C]. *SPIE*, 1999, **3677**:382~394
- Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqin *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
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
- Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqin *et al.*. In-situ measurement method of dense-line depth of focus of a lithographic projection system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):85~90
施伟杰,王向朝,张冬青等. 基于光学对准的光刻机投影物镜密集线焦深原位检测技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):85~90
- Sun Shanze, Dai Zhongwei. Probability and Statistics [M]. Beijing: Science Press, 2002. 150~180
孙山泽,戴中维. *概率与统计*[M]. 北京:科学出版社, 2002. 150~180
- Seth Roberts, Harold Pashler. How Persuasive is a Good Fit? A Comment on Theory Testing [M]. USA: University of California, 2000. 20~35
- Wei Musheng. Theory and Calculation of Generalized Least Squares Problem [M]. Beijing: Science Press, 2006. 136~178
魏木生. *广义最小二乘问题的理论和计算*[M]. 北京:科学出版社, 2006. 136~178