

文章编号: 0253-2239(2006)03-0398-5

基于镜像焦面检测对准标记的套刻性能原位测量技术

施伟杰^{1,2} 王向朝¹ 张冬青^{1,2} 马明英^{1,2} 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: 套刻性能是现代高精度步进扫描投影光刻机的重要性能指标之一。提出了一种基于镜像焦面检测对准标记(简称“镜像焦面检测对准标记”)的光刻机套刻性能原位测量技术。该技术通过对曝光在硅片上的镜像焦面检测对准标记图形进行光学对准,利用标记图形对准位置与理想位置偏差实现套刻性能的原位检测。实验结果表明该技术在套刻误差的精确测量的同时还可以全面、定量地计算影响光刻机单机套刻误差的场内参量及场间参量。与目前套刻性能原位测量技术相比,该技术有效地避免了测量精度对轴向像质限制的依赖,简化了光刻机整机性能检测的过程。

关键词: 光学测量; 原位检测; 套刻性能; 光刻机; 焦面检测对准标记

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

An In-Situ Method for Measuring the Overlay Performance of a Lithographic System with Mirror-Symmetry FOCAL Marks

Shi Weijie^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Zhang Dongqing^{1,2} Ma Mingying^{1,2} Wang Fan^{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: Overlay is one of key performances for modern lithographic projection systems with high-precision, a novel method for in-situ measuring the overlay performance of a lithographic system with the marks is presented. In the method, many mirror-symmetry focus calibration using alignment procedures (FOCAL) marks are printed on a wafer. The printed images of these marks are aligned by an optical alignment system and the alignment positions of the images are recorded. From the positions, overlay performance can be obtained. Through the experiments, it is demonstrated that the overlay errors, intrafield parameters and interfield parameters can be obtained with high accuracy. Compared to the XY-SETUP technique, the method avoids the dependency of measurement accuracy on the corrections of axial aberrations and makes it much simpler to perform a full-scale evaluation of a lithographic system.

Key words: optical measurement; in-situ measurement; overlay performance; optical microlithography; focus calibration using alignment procedures mark

1 引 言

套刻性能是套刻误差及影响套刻误差各种因素的总和。套刻误差指实际曝光在硅片上的图形的位置与其名义位置之间的偏差距离,与光刻特征尺寸和产率并称为现代扫描投影光刻机的三大性能指标。对于单机而言,影响套刻误差的主要因素包括由投影物镜垂轴像质引起的场内参量(intrafield

parameters)和由工件台运动及硅片表面形貌引起的场间参量(interfield parameters)^[1]。随着光刻特征尺寸的不断减小,芯片制造商对套刻误差的要求越来越高(通常为特征尺寸的 1/3)。套刻误差的原位检测与套刻性能的分析已成为现代投影光刻机中不可或缺的功能,对影响单机套刻误差的场内和场间参量的计算与分析也成为保证套刻性能的重要手段。

作者简介: 施伟杰(1978~),男,满族,吉林柳河人,中国科学院上海光学精密机械研究所光学工程专业博士研究生,主要从事分辨率步进扫描光刻机像质原位检测技术的研究。E-mail: shiweijie@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-04-22; 收到修改稿日期: 2005-06-10

目前,XY-SETUP 技术是光刻机套刻性能主要测量技术。该技术将硅片移至最佳焦面上进行多场曝光,然后对曝光图形的位置进行检测。通过对曝光图形对准位置的计算,得到光刻系统套刻误差及影响套刻误差的各项场内参量与场间参量^[2]。但是由于离焦、像面倾斜等轴向像质对曝光图形位置的影响,即便离焦在焦深范围内,曝光图形的位置测量误差也将达到 10% 以上。因此该方法的测量精度严重依赖于对离焦、像面倾斜等轴向像质参量的限制程度。

本文提出一种基于镜像焦面检测对准(FOCAL)^[3] 标记的套刻性能测量技术(overlay performance measurement using mirror-symmetry FOCAL marks, OPMFM) 技术。其中 FOCAL(focus calibration using alignment procedures)是一种焦面检测对准技术^[4,5],焦面检测对准标记是一种具有精细结构的对准标记。OPMFM 技术利用镜像焦面检测对准标记的成像规律有效避免了目前套刻性能原位测量技术中测量精度对轴向像质限制的依赖。实验结果表明该技术在套刻误差的精确测量的同时还可以全面、定量地计算影响光刻机单机套刻误差的场内参量及场间参量,从而简化了光刻机整机性能检测的过程。

2 检测原理

提出的 OPMFM 技术是一种基于硅片曝光的单机套刻性能测量技术。与 XY-SETUP 技术和焦面检测对准技术相同,该技术的测试过程包括标记曝光、硅片显影、对准读数与场内及场间参量计算等四个过程,如图 1 所示。OPMFM 技术将若干镜像

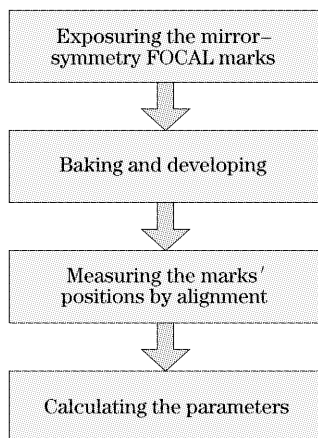


图 1 OPMFM 技术像质检测流程图

Fig. 1 Flow chart of the measurement of overlay performance using the OPMFM technique

焦面检测对准标记(如图 2 所示)在一定离焦范围内(离焦范围通常不超过 ± 2 倍焦深)重复曝光在涂有光刻胶的硅片上。具有若干个曝光场的硅片经过后烘和显影后,由光学对准系统对曝光在硅片上的镜像焦面检测对准标记图形进行对准,记录下不同离焦量下镜像焦面检测对准标记在曝光视场中的对准位置坐标。从图 2 中可以看出,镜像焦面检测对准标记由左右两个焦面检测对准图形构成,两个图形的周期与线条宽度完全相同。所不同的是两个图形精细结构相对于宽线条的位置互为镜像。光学对准系统分别对镜像焦面检测对准标记的左右两个焦面检测对准图形进行对准,记录其对准位置坐标为 $P_L(x_L, y_L)$ 和 $P_R(x_R, y_R)$ 。根据透镜成像关系计算镜像焦面检测对准标记左右两个焦面检测对准图形在曝光视场中成像的理论位置也就是名义位置为 $P_{0L}(x_{0L}, y_{0L})$ 与 $P_{0R}(x_{0R}, y_{0R})$ 。对准偏移量 $AO_L(\Delta x_L, \Delta y_L)$ 和 $AO_R(\Delta x_R, \Delta y_R)$ 分别为各焦面检测对准图形对准位置与其对应的名义位置的差值,即

$$\begin{cases} \Delta x_{L(R)} = x_{L(R)} - x_{0L(R)}, \\ \Delta y_{L(R)} = y_{L(R)} - y_{0L(R)}. \end{cases} \quad (1)$$

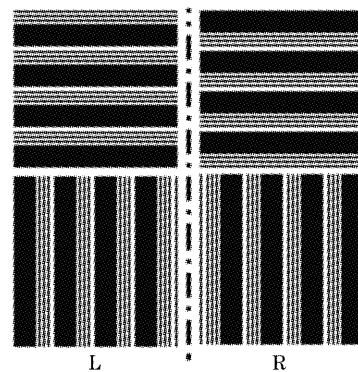


图 2 镜像焦面检测对准标记示意图

Fig. 2 Sketch map of the mirror-symmetry FOCAL mark

在光刻曝光系统中,导致焦面检测对准图形对准位置与理论曝光位置有偏差的原因可以归纳为两个方面。一方面由于离焦、场曲、像散等轴向像质的影响,焦面检测对准标记精细结构线宽发生变化而导致的对准位置偏移,这部分偏移量用 $AO^{(v)}$ 表示。另一方面由于畸变、平移、旋转等光刻系统垂轴像质对焦面检测对准标记曝光位置的影响而产生的对准位置的偏移,这部分偏移量用 $AO^{(h)}$ 表示。由此,上述对准偏移量 AO_L 和 AO_R 可以下式表示:

$$AO_L = AO_L^{(v)} + AO_L^{(h)}, \quad (2)$$

$$AO_R = AO_R^{(v)} + AO_R^{(h)}, \quad (3)$$

根据焦面检测对准技术测量原理^[6,7]可知,由轴向像质引起的对准偏移量 AO^o 的大小将随离焦的变化而变化。当硅片在最佳焦平面上曝光时系统分辨能力较强,标记精细结构可以被完全转移到硅

片上,对准偏移量较大。而当硅片在离焦的平面上曝光时,系统分辨能力较差,标记的精细结构不能被无失真的转移到硅片上,导致光学对准的偏移量较小。该过程如图 3(b)、图 3(c)所示。

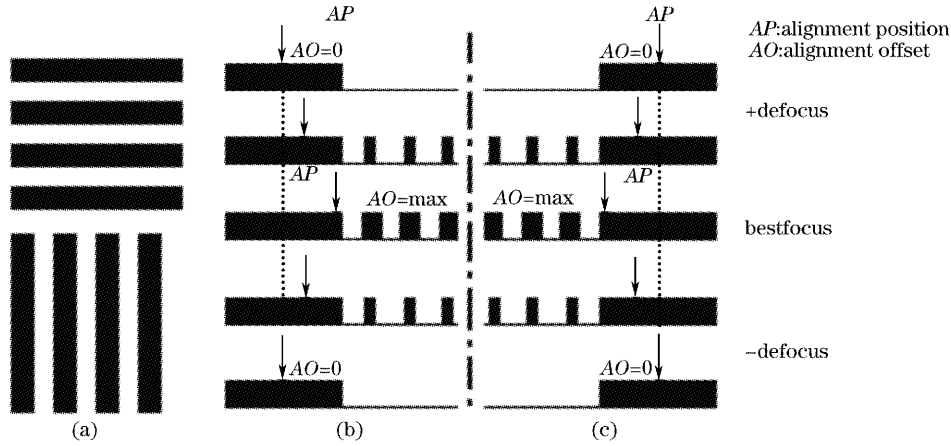


图 3 镜像焦面检测对准图形的对准。(a)对准参考光栅,(b)左 FOCAL 标记对准,(c)右 FOCAL 标记对准

Fig. 3 Alignment of mirror-symmetry FOCAL pattern. (a) Alignment reference grating, (b) alignment of the left parts of mirror-symmetry FOCAL patterns, (c) alignment of the right parts of mirror-symmetry Focal patterns

注意到在图 2 所示的镜像焦面检测对准标记示意图中,左右两部分图形之间距离小于 0.3 mm,相对于一个曝光视场而言可以认为两个图形的成像条件近似相同。即由轴向像质影响精细结构线宽的变化而导致的对准偏移量大小也近似相等。但由于精细结构位置的镜像结构导致偏移量的方向相反(如图 3 所示),即 $AO_R^o \approx -AO_L^o$ 。利用镜像焦面检测对准标记的这一近似,将(2)式和(3)式相加得

$$AO_L^h \approx AO_R^h = (AO_R + AO_L)/2. \quad (4)$$

可以看出(4)式已不包含轴向像质对对准偏移量的影响因素,因此可以说该技术有效避免了轴向像质对测量结果的影响。将(4)式中的对准偏移量以坐标的形式表示如下:

$$\Delta x' = (\Delta x_R + \Delta x_L)/2, \quad (5)$$

$$\Delta y' = (\Delta y_R + \Delta y_L)/2. \quad (6)$$

计算视场中若干标记的水平偏移量 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 并利用最小二乘法拟合下式,即可获得光刻系统中影响套刻性能的各个场内参量^[8]。

$$\begin{cases} \Delta x' = dx + x_0 M_{ag} - y_0 \phi + x_0 r_0^2 D_3, \\ \Delta y' = dy + y_0 M_{ag} + x_0 \phi + y_0 r_0^2 D_3, \end{cases} \quad (7)$$

其中 dx 、 dy 为标记在 x 向与 y 向的平移; M_{ag} 为曝光系统的放大倍率变化量; ϕ 为曝光视场绕光轴的旋转; D_3 为曝光系统的三级畸变(初级畸变)。

在各个曝光场中按照(7)式计算每个曝光场的场内参量,将计算得到的各个 dx 与 dy 代入下式中,即可获得影响套刻误差的场间参量:

$$\begin{cases} dx = dx_w + x_w M_w - y_w \phi_w + y_w^2 D_2, \\ dy = dx_w + y_w M_w + x_w \phi_w + x_w^2 D_2, \end{cases} \quad (8)$$

其中 x_w 、 y_w 为曝光场中心点在硅片坐标系下的坐标; dx_w 、 dy_w 为硅片的平均偏移; M_w 为硅片比例缩放(wafer scaling); ϕ_w 为硅片绕光轴的旋转角度; D_2 为硅片弓形形变(wafer bow)。

对整个硅片上所有标记图形的水平对准偏移量 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 分别进行数理统计计算,即可获得表征 x 向与 y 向套刻误差的均值与方差。

3 实验与实验结果分析

3.1 场内参量测量结果与分析

在相同测试条件下,分别在 ASML 公司的 PAS5500/550D 型步进扫描投影光刻机上进行 OPMFM 测试与 XY-SETUP 测试。为了说明 OPMFM 技术与轴向像质校正的无关性,OPMFM 测试采用焦面检测对准测试的曝光方法,即在 16 个不同离焦位置处对硅片进行曝光。对准后记录镜像焦面检测对准标记的对准位置信息。利用 Mathwork 公司的 Matlab6.5 科学计算语言编程,计算像面平移、像面旋转、放大率变化量及三阶畸变等影响套刻性能场内参量,并与 XY-SETUP 的测量结果相比较,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,除了 x 向与 y 向像面平移外,对于像面旋转、放大率变化量与三阶畸变等参量的

测量而言,OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术的测量结果接近,其最大相对误差不超过 10%。而对 x 向与 y 向像面平移而言,XY-SETUP 的测量数值远远大于 OPMFM 的测量数值。这是因为 XY-SETUP 测试技术本身没有考虑轴向像质参量对测试结果的影响。由于离焦和像面倾斜等轴向像质参量过大导致了 XY-SETUP 测试中像面平移的计算结果的偏大,因此在进行 XY-SETUP 测试前需要进行轴向像质的校正工作。利用焦面检测对准技术对轴向像质参量进行校正后,再进行 XY-SETUP 与 OPMFM 测试,将测量得到的场内参量结果列于表 2 中。

表 1 采用 OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术的场内参量测量结果

Table 1 Intrafield parameters obtained by OPMFM technique and XY-SETUP technique

Intra-field parameters	XY-SETUP	OPMFM	Relative err.
Translation in x /nm	4111.006	-23.454	100.5%
Translation in y /nm	1960.848	-1.975	99.6%
Rotation / μ rad	124.261	124.039	0.2%
Magnification / $\times 10^{-6}$	0.734	0.702	4.3%
3 rd distortion /(nm/cm ³)	2.760	2.987	8.2%

表 2 轴向像质校正后采用 OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术获得的场内参量

Table 2 Intrafield parameters obtained by OPMFM technique and XY-SETUP technique after FOCAL calibration

Intrafield parameters	XY-SETUP	OPMFM	Relative err.
Translation in x /nm	-19.307	-19.690	1.9%
Translation in y /nm	-0.797	-0.810	1.6%
Rotation / μ rad	124.458	124.009	0.3%
Magnification / $\times 10^{-6}$	0.289	0.268	7.8%
3 rd distortion /(nm/cm ³)	1.660	1.499	6.4%

从表 2 中可以看出轴向像质参量校正后,OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术的测试结果基本相同,各项参量的相对误差不大于 10%,其中 x 向与 y 向像面平移相对误差均小于 2%。这说明 OPMFM 技术具有与 XY-SETUP 技术相当的测量精度。比较表 1 与表 2 中 OPMFM 技术场内参量的测量结果可以看出,在轴向像质校正前和校正后,像面平移的绝对误差小于 5 nm,而像面旋转的绝对误差小于 0.5 μ rad。这说明 OPMFM 技术对场内参量的检测过程不依赖于轴向像质的校正程度,因此与 XY-SETUP 相比,OPMFM 技术具有较高的可靠性。在轴向像质校正前和校正后,放大率变化量与三阶畸变测量结果的减小。这是由于在进行轴向像质补偿时

投影物镜中可变镜片位置得到了优化的结果。

3.2 场间参量测量结果与分析

利用轴向像质校正后 OPMFM 测试得到的各曝光场的像面平移数据按照(8)式进行场间参量的求解,并将计算结果与 XY-SETUP 测试的测量结果相比较。

从表 3 中可以看出两种测试对场间参量的计算结果误差很小。其中对硅片平均偏移的测量误差在 3 nm 以内,远小于工件台的定位精度 10 nm。对硅片旋转、硅片比例缩放及硅片弓形形变的测量结果误差均小于 0.03 个测量单位,在实际测量中可以忽略不计。表 3 说明 OPMFM 技术对场间参量的测量精度与 XY-SETUP 测试的测量精度相同,可以实现对场间参量的精确测量。

表 3 轴向像质校正后采用 OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术获得的场间参量

Table 3 Interfield parameters obtained by OPMFM technique and XY-SETUP technique after FOCAL calibration

Inter-field parameters	XY-SETUP	OPMFM	Error
Wafer offsets in x /nm	-22.102	-24.329	-2.227
Wafer offsets in y /nm	-0.897	-1.126	-0.229
Wafer rotation / μ rad	-0.027	-0.023	0.004
Skew / $\times 10^{-6}$	-0.132	-0.104	0.028
Bow distortion(nm/cm ²)	0.019	0.014	-0.005

3.3 套刻误差的测量结果与分析

对两种测试中所获得的标记偏移量进行数理统计计算,分别获得 X 向、 Y 向的套刻误差,如表 4 所示。

表 4 采用 OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术的套刻误差测量结果

Table 4 Overlay errors obtained by OPMFM technique and XY-SETUP technique

	Overlay errors in x direction		Overlay errors in y direction	
	Mean /nm	St. dev. /nm	Mean /nm	St. dev. /nm
OPMFM	-23.5	186.6	-0.8	984.1
XY-SETUP	-21.8	205.8	-0.8	854.3

从表 4 中可以看出 OPMFM 技术与 XY-SETUP 技术对套刻误差的测量结果接近,其中套刻误差的平均值相差不超过 2 nm。表 4 中两种测试的方差值是平均值的十倍到百倍,这是由于场内参量及场间参量还没有进行校正的结果。按照表 2、表 3 中 OPMFM 技术的计算结果对场内参量及场间参量进行校正,校正后重新进行 OPMFM 测试,获得套刻误差如图 4 所示。

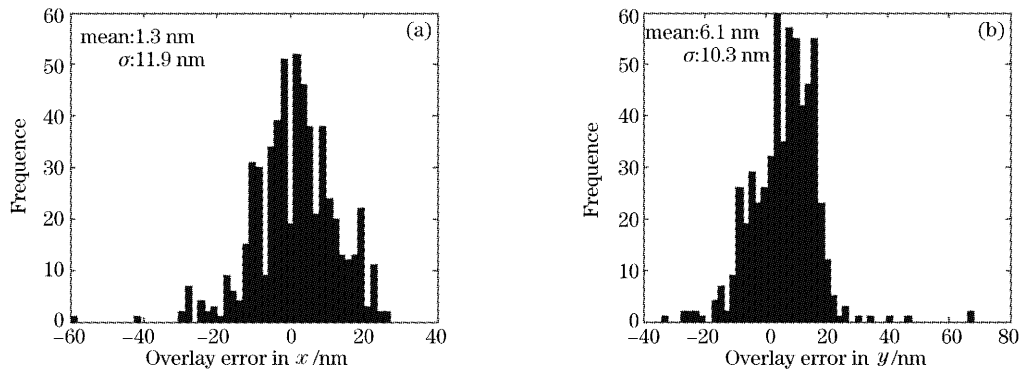


图 4 场内及场间参量校正后 OPMFM 测量得到套刻误差结果

Fig. 4 Overlay errors measured by OPMFM technique after the calibration of the intrafield and interfield parameters

图 4 说明在场内参量与场间参量得到校正后, OPMFM 技术计算得到的 x 向与 y 向套刻误差分别为 1.3 ± 35.7 nm (mean \pm 3sigma) 和 6.1 ± 30.9 nm。这说明硅片上 99.7% 的标记其套刻误差小于 40 nm, 满足 PAS5500/550D 型光刻机套刻误差小于等于 40 nm 的性能要求。

4 结 论

提出了一种基于镜像焦面检测对准标记的光刻机套刻性能原位测量的新技术, 即 OPMFM 技术。实验表明该技术可以精确测量投影光刻机的套刻误差及引起套刻误差的场内、场间参量。与 XY-SETYP 技术相比, 该技术有效地避免了测量精度对轴向像质限制的依赖, 简化了光刻机整机性能检测的过程。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. In-situ measurement methods of lens aberrations [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
- 3 Bert Vleeming, Barbra Heskamp, Hans Bakker. ArF step and scan system with 0.75 NA for the 0.10 μ m node[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 634~650
- 4 P. Dirksen, W. de Laat, H. Megens. Latent image metrology for production wafer steppers[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2440**: 701~711
- 5 Peter Dirksen, Jan E. Van Der Werf. U. S Patent 5674650. 1997
- 6 Weijie Shi, Xiangzhao Wang, Dongqing Zhang. Application of BP-neural networks in the FOCAL technique[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5645**: 233~239
- 7 Dongqing Zhang, Xiangzhao Wang, Weijie Shi. A new method to determine the energy range for the FOCAL technique[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5645**: 180~187
- 8 M. vd. Brink, H. Franken, S. Wittekoek *et al.*. Automatic on-line wafer stepper calibration system[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1261**: 298~314