

# 激光与光电子学进展

## 光刻投影物镜畸变检测技术

曹译莎<sup>1,2</sup>, 唐锋<sup>1,2\*</sup>, 王向朝<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1,2</sup>, 冯鹏<sup>1</sup>, 卢云君<sup>1,2</sup>, 郭福东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049

**摘要** 光刻投影物镜的畸变是影响光刻机套刻精度最重要的因素之一, 畸变会导致物镜的横向放大率随视场的增大而变化, 曝光到硅片上的图形相对于其理想位置发生偏移, 从而引起套刻误差。在物镜的装调和使用过程中都需要对畸变进行检测和优化调整, 而目前高端光刻投影物镜的畸变小于 1 nm, 对其进行高精度检测是该领域的难点。对三种常用的光刻机畸变检测技术(曝光检测、空间像检测和波前检测)的原理和特点进行了分析, 并对其发展方向进行了展望。对于 16~19 nm 及 16 nm 以下的光刻节点, 多通道检测技术是提高畸变检测精度与速度的重要发展方向。

**关键词** 测量与计量; 光刻术; 畸变检测; 曝光; 空间像传感器; 相位测量干涉仪

中图分类号 O439; TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922012

## Measurement Techniques for Distortion of Lithography Projection Objective

Cao Yisha<sup>1,2</sup>, Tang Feng<sup>1,2\*</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup>, Liu Yang<sup>1,2</sup>, Feng Peng<sup>1</sup>, Lu Yunjun<sup>1,2</sup>,  
Guo Fudong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** One of the most critical elements influencing lithography overlay accuracy is the distortion of the lithography projection objective. The distortion causes transverse magnification of the objective to change with the increase in the field of view, and the pattern exposed on the silicon wafer is displaced relative to its ideal position, which causes overlay errors. During the alignment and use of the objective, distortion must be detected and optimized. At present, the distortion of advanced lithography projection optics is less than 1 nm, and its high-precision measurement is a difficult point in this field. This paper examines the principles and characteristics of three widely used lithography distortion detection technologies-exposure measurement, aerial image measurement, and wavefront measurement-as well as their future development potential. To increase the accuracy and speed of distortion detection, multichannel detection technology is an important development path for lithography nodes of 16–19 nm and below 16 nm.

**Key words** measurement and metrology; lithography; distortion measurement; exposure; aerial image sensor; phase measurement interferometer

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-07-05

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101006)

通信作者: \*tangfeng@siom.ac.cn

## 1 引 言

光刻工艺是半导体器件制造工艺中的一个重要步骤,该工艺先利用曝光和显影在光刻胶层上刻画几何图形结构,然后通过刻蚀工艺将光掩模上的图形逐层转移到所在衬底上,最终在硅片上形成几十层复杂的电路结构,且每一层图形都要精确转移到硅片上的正确位置。套刻精度是衡量光刻工艺的关键参数之一,可表示为硅片上新一层图形与上一层图形的位置误差(套刻误差),现有光刻技术的套刻精度已经达到了  $1.4 \text{ nm}^{\text{[1]}}$ 。集成电路芯片是通过多层电路叠加而成,套刻精度会直接影响最终的产品性能。投影物镜是光刻机的核心部件,光刻机投影物镜的畸变是影响套刻精度最重要的因素之一。畸变会导致曝光到硅片上的图形相对于其理想位置发生偏移,从而引起套刻误差。目前,投影物镜畸变的峰谷(PV)值达到了  $0.7 \text{ nm}$ ,在物镜的装调和使用过程中都需要对畸变进行检测和优化调整,因此,对畸变进行高精度检测具有重要意义。

不同光刻投影物镜畸变检测方法的数据处理流程基本相同,即先检测不同视场的成像位置偏移量,然后拟合得到畸变。根据成像位置偏移量的测量方式,可将光刻投影物镜的畸变检测技术大致分为曝光法、空间像测量法、波前测量法三类。曝光法通过测量套刻误差计算畸变,流程复杂,但原理简单。Litel 仪器<sup>[2]</sup>和上海微电子装备(SMEE)<sup>[3]</sup>都提出了消除工件台定位误差对畸变检测精度影响的方法,但曝光法的畸变检测精度仍然受套刻测量仪测量误差的影响。空间像测量法通过空间像传感器依次检测每个测量标记的空间像位置,与标记的理想成像位置比较得到成像位置偏移量,NIKON<sup>[4]</sup>、ASML (ASML Holding N. V)<sup>[5-8]</sup>和 SMEE<sup>[9]</sup>都开发了空间像畸变检测技术。这种方法

具有稳定性高、成本低、适合实时检测的优点<sup>[10-11]</sup>,但检测精度受硅片台定位误差和空间像位置检测精度的影响。为了提高畸变检测精度,SMEE 提出了差分测量技术<sup>[9]</sup>,可减小硅片台定位误差对检测精度的影响。波前测量法根据波前信息计算出每个波前测试标记的实际成像位置,最终根据理想成像位置和实际成像位置的差值拟合计算投影物镜的畸变,该技术可同时测量投影物镜的波像差。NIKON<sup>[12-13]</sup>和 SMEE<sup>[14-15]</sup>使用夏克-哈特曼(Shack-Hartmann)波前传感器测量波像差和畸变;美国桑迪亚国家实验室(SNL)等机构用点衍射干涉仪对极紫外线(EUV)光刻投影光学系统的畸变进行测量<sup>[16]</sup>;ASML 在 2003 年发布了基于剪切干涉仪的 ILIAS<sup>TM</sup><sup>[17]</sup>系统,可在线高精度、快速测量和分析整个像场的波前像差和畸变,并在 2013 年开发了多通道并行 PARIS(Parallel ILIAS)传感器<sup>[18-19]</sup>,能同步获得 7 个视场点的像差数据。相比夏克-哈特曼传感器或点衍射干涉仪,剪切干涉仪不需要采用小孔产生参考波前,在物像面均采用光栅作为检测标记,能更好地利用光刻机照明系统的光能,更适合进行光刻机原位检测。

本文首先介绍了畸变的成因、定义、分类和技术参数要求,然后阐述了光刻投影物镜的畸变检测原理,最后对三种常见光刻机畸变检测技术的原理和特点进行了分析,并对光刻投影物镜畸变检测技术的发展方向进行了展望。

## 2 畸变分析

### 2.1 畸变产生的原因

畸变产生的原因是轴外物点的主光线通过光学系统时存在球差<sup>[20-21]</sup>。光轴上的物点经主光线所成的像不存在球差,与理想像点重合,即不产生畸变。轴外物点经主光线成像时的原理如图 1 所示<sup>[22]</sup>。

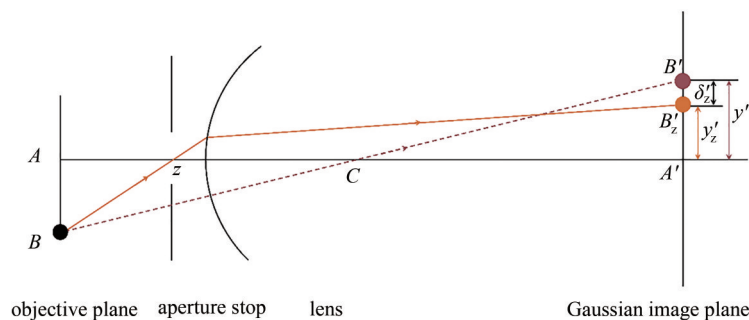


图 1 畸变的形成原理<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Formation principle of the distortion<sup>[22]</sup>

其中,光阑中心 $z$ 为光轴上一点, $A$ 为轴上物点, $A'$ 为 $A$ 的高斯像点, $B$ 点为平面物体的任意一个轴外点,过 $B$ 点以及球心 $C$ 点作辅助光轴与像面交于 $B'$ 点, $B'$ 点即为 $B$ 点的理想像点。当 $B$ 点以主光线成像时,由 $B$ 点发出的主光线 $B_z$ 相对于辅助光轴有一孔径角,会产生球差,导致主光线 $B_z$ 与高斯像面交于 $B'_z$ 点, $B'_z$ 点为物点 $B$ 的实际像点,偏离了理想像点 $B'$ ,产生了畸变。实际像点 $B'_z$ 像高 $y'_z$ 与高斯像点 $B'$ 像高 $y'$ 的差 $\delta'_z$ 就是系统的畸变。

畸变是一种单色几何像差,除了平面反射镜外,其他光学系统都不能成完整的像,即所成像不可能绝对清晰和无畸变<sup>[23]</sup>。像差是光学系统所成像与理想像之间的差异,可分为单色像差和色差。当系统以单色光进行成像时产生的像差为单色像差,可以用几何像差和波像差描述。单色像差可分为球差、彗差、像散、场曲和畸变五种,一般情况下这五种像差同时出现<sup>[24]</sup>,完全消除像差是不可能的。

## 2.2 畸变的定义

在理想光学系统中,一对共轭面上的垂轴放大率是常数,即物像平面上各部分的垂轴放大率均相等,因此物和像是相似的。但对于实际光学系统,只有近轴区域才具有该性质,物像面之间的垂轴放大率不再是常数,而是随视场的变化而变化。实际像相对理想像会发生变形,与实际物体失去相似性,这种使实际像发生变形的像差也被称为畸变<sup>[22]</sup>。当光学系统只存在畸变时,整个物平面能形成清晰的像,但像的大小和理想像不等。

畸变的数学定义有两种,一种是绝对畸变 $\delta y'_z$ ,表示不同视场的主光线通过光学系统后与高斯像面的交点高度 $y'_z$ 和理想像高 $y'$ 的差值,可表示为

$$\delta y'_z = y'_z - y' \quad (1)$$

另一种是相对畸变 $q'$ ,即绝对畸变 $\delta y'_z$ 与理想像高 $y'$ 的比值,可表示为

$$q' = \frac{\delta y'_z}{y'} \times 100\% = \frac{\bar{\beta} - \beta}{\beta} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\bar{\beta}$ 为光学系统某视场的实际垂轴放大率, $\beta$ 为光学系统在该物距的理想垂轴放大率。

## 2.3 畸变的分类

由畸变成因和定义可以发现,折射球面本身的特性会引起畸变,这种畸变是关于光轴中心对称的,也被称为径向对称畸变(Radial distortion)<sup>[25]</sup>。此外,如果光学系统包含多个光学元件,装配不当

也会使光学元件发生偏心或倾斜,导致偏心畸变(Decentering distortion)<sup>[26-27]</sup>和薄棱镜畸变<sup>[28]</sup>。

### 1) 径向对称畸变

径向对称畸变会导致像点从理想位置向内或向外发生偏移,且该畸变围绕光轴严格对称。在极坐标为 $(r, \theta)$ 的像点上,径向对称畸变沿着方向 $r$ 。完美球面透镜的径向对称畸变可表示为

$$\delta_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (3)$$

式中, $\delta_r$ 为完美球面透镜在理想像点 $R$ 沿 $r$ 方向的径向对称畸变,下标 $r$ 表示径向对称畸变, $k$ 为对应阶数的畸变系数( $k_1, k_2, k_3$ 分别对应三阶、五阶、七阶径向畸变系数)。笛卡儿坐标系中的像点 $(x, y)$ 可表示为

$$x = r \cos \theta \quad (4)$$

$$y = r \sin \theta \quad (5)$$

像点 $(x, y)$ 在笛卡儿坐标系下的径向对称畸变可表示为

$$\delta_{rx} = k_1 x (x^2 + y^2) + O[(x, y)^5] \quad (6)$$

$$\delta_{ry} = k_1 y (x^2 + y^2) + O[(x, y)^5] \quad (7)$$

式中, $\delta_{rx}, \delta_{ry}$ 分别为完美球面透镜在理想像点 $R$ 处的三阶径向对称畸变在 $x$ 方向和 $y$ 方向上的投影, $O[(x, y)^5]$ 为五阶及更高阶次的径向对称畸变,为高阶小量,可以省略。图2(a)为光学系统存在 $k_1 = -0.5$ 的负径向对称畸变时,实际像点与理想像点的偏移示意图。其中,箭头的起点为理想像点的位置,终点为实际像点的位置,长度为径向对称畸变的大小。可以发现:视场越大,径向偏移量越大,畸变也越大;在光轴附近,几乎没有偏移,中心视场点的畸变为0。当只存在径向对称畸变时,物平面上所有通过原点直线的像均为直线,其他直线的像则会发生弯曲<sup>[29]</sup>。当光学系统的实际像高大于理想像高时会产生正畸变(枕形畸变),此时放大率随视场的增大而增大。如果物体为垂直于光轴的线条图案,经理想光学系统所成的像如图3(a)所示,带有正畸变的光学系统对线条图案的成像结果如图3(b)所示。当光学系统的实际像高小于理想像高时会产生负畸变(桶形畸变),此时放大率随视场的增大而减小,存在负畸变的光学系统对线条图案的成像结果如图3(c)所示。如果物体为圆心在光轴的一个圆,用存在畸变的光学系统对其所成的像与理想像构成了一个同心圆,正畸变时圆的半径变大,负畸变时圆的半径变小。

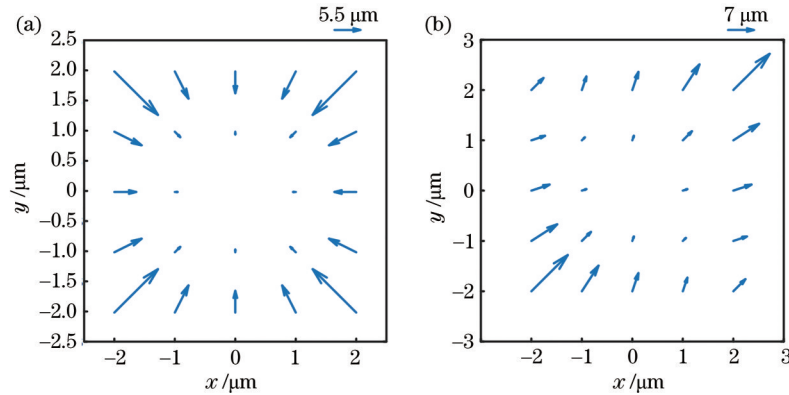


图 2 光学系统的畸变。(a)径向对称畸变( $k_1=-0.5$ );(b)偏心畸变( $p_1=p_2=0.5$ )

Fig. 2 Distortion of the optical system. (a) Radial symmetry distortion ( $k_1=-0.5$ ); (b) decentering distortion ( $p_1=p_2=0.5$ )

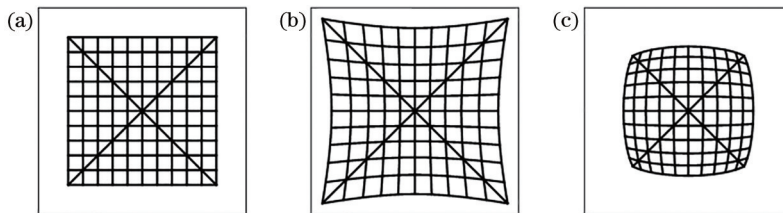


图 3 光学系统的成像结果。(a)无畸变光学系统的成像结果;(b)存在正畸变的光学系统的成像结果( $k_1=0.5$ );(c)存在负畸变的光学系统的成像结果( $k_1=-0.5$ )

Fig. 3 Imaging results of the optical system. (a) Imaging result of an optical system without distortion; (b) imaging result of an optical system with positive distortion ( $k_1=0.5$ ); (c) imaging result of an optical system with negative distortion ( $k_1=-0.5$ )

## 2) 偏心畸变和薄棱镜畸变

实际光学系统中各透镜的光学中心不是严格共线的,从而导致了偏心畸变。偏心畸变既有径向分量 $d_r$ ,也有切向分量 $d_t$ ,如图4所示。其中, $R$ 为理想像点, $R_s$ 为实际像点。直角坐标系下的偏心畸变<sup>[28,30]</sup>可表示为

$$\delta_{xd} = p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy + O[(x, y)^4], \quad (8)$$

$$\delta_{yd} = 2p_1xy + p_2(x^2 + 3y^2) + O[(x, y)^4], \quad (9)$$

式中, $\delta_{xd}$ 和 $\delta_{yd}$ 分别为光学系统在像点 $(x, y)$ 处的二阶偏心畸变在 $x$ 方向和 $y$ 方向的投影,下标d表示偏心畸变, $p_1$ 和 $p_2$ 为光学系统的偏心畸变系数, $O[(x, y)^4]$ 为四阶及更高阶次的偏心畸变,为高阶小量,可以忽略。图2(b)为光学系统的偏心畸变示意图,可以发现,偏心畸变大体上相对于左下角和右上角的连线对称,这表明镜头在垂直于该方向上有一个旋转角度。

薄棱镜畸变主要由镜头设计制造和相机装配不合格导致,如一些镜头元件或图像传感阵列的轻微倾斜。这种类型的畸变可通过在光学系统中附加一个薄棱镜模拟,以产生额外的径向畸变和切向畸变。

## 2.4 畸变的技术参数要求

光学系统的畸变大小取决于物点所在视场的位置,物点到光轴的距离越大,畸变就越大。光学系统在不同的应用场合有不同的畸变要求,一般来

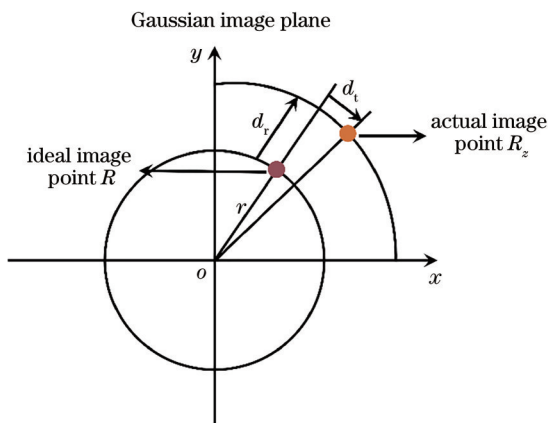


图 4 偏心畸变中的径向畸变分量和切向畸变分量

Fig. 4 Radial distortion component and tangential distortion component in decentering distortion



说,只要接收器感觉不出其所成像的变形(相对畸变  $q' \leq 4\%$ ),就可忽略该畸变像差,如目视仪器<sup>[22,31]</sup>。对于计量仪器中的投影系统、制版物镜、万能工具显微镜和航空测量摄影物镜等,畸变会带来较大的测量误差,相对畸变  $q'$  需尽可能小。光刻投影物镜可将掩模图形按照一定的缩放比例成像到硅片面<sup>[1]</sup>,畸变会使投影到硅片上的图案偏离理想位置,从而影响套刻精度。光刻投影物镜的畸变要求随光刻分辨率的减小会更加严格。表 1 为不同光刻机型号投影物镜的绝对畸变  $\delta y'_z$ ,可以发现,随着光刻机的发展,绝对畸变  $\delta y'_z$  从 60 nm 逐渐减小到了 0.4 nm。

表 1 不同光刻机投影物镜的绝对畸变  
Table 1 Absolute distortion of the projection objective of different lithography machines unit: nm

Lithography model	$\delta y'_z$
ASML PAS 5500/100D	60
ASML PAS 5500/450F	20
ASML TWINSCAN XT:860M	10
ASML TWINSCAN XT:1250B	8
ASML TWINSCAN NXT:1950i	0.6
ASML NXE: 3100	1.5
ASML NXE: 3400B	0.4

### 3 光刻投影物镜的畸变检测方法

#### 3.1 光刻投影物镜的畸变检测原理

为控制光刻投影物镜的成像质量(像质),在物镜的装调和使用过程中都需要用高精度像质检测技术对畸变进行检测和优化调整。在投影物镜集装装配阶段对成像质量进行离线检测,在物镜使用

中对成像质量进行原位检测,然后根据检测结果通过调整投影物镜的可动镜片等方式补偿像差,改善成像质量<sup>[32]</sup>。

光刻投影物镜的畸变要求是所有光学系统中最严格的,达到了 nm 量级,这也对畸变参数的检测提出了更高的要求。不同检测方法的数据处理流程基本相同,如图 5 所示。先确定物面上不同视点经过投影物镜所成像的实际位置  $(x_{ri}, y_{ri})$ ,然后将其与理想成像位置  $(x_i, y_i)$  进行对比,得到  $x$  方向和  $y$  方向的成像位置偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ ,最后拟合得到畸变误差。

图 6 为光刻投影物镜的畸变检测原理。掩模板

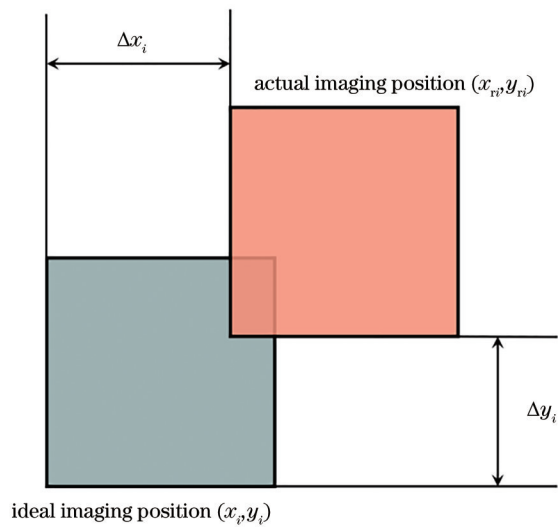


图 5 实际成像位置与理想成像位置的示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of actual imaging position and ideal imaging position

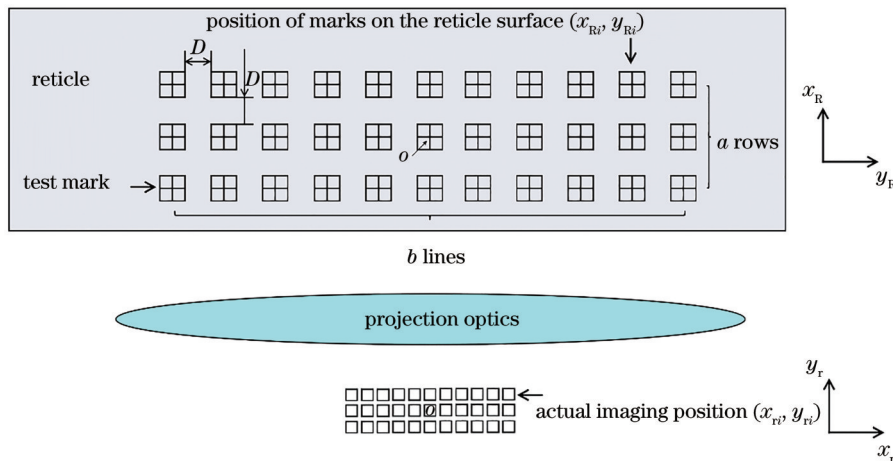


图 6 光刻投影物镜的畸变检测原理  
Fig. 6 Distortion detection principle of the lithography projection objective

上有  $n = ab$  个标记, 标记间距为  $D$ 。首先, 测量每个标记在掩模面的位置  $(x_{Ri}, y_{Ri})$ , 然后将掩模板通过投影物镜成像, 测量标记的实际成像位置坐标  $(x_{ri}, y_{ri})$ , 标记的理想成像位置坐标  $(x_i, y_i)$  相当于标记在掩模面位置坐标  $(x_{Ri}, y_{Ri})$  的  $M$  倍, 即

$$(x_i, y_i) = (Mx_{Ri}, My_{Ri}), \quad (10)$$

成像位置偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  为标记实际成像位置与理想成像位置的差, 可表示为

$$(\Delta x_i, \Delta y_i) = (x_{ri}, y_{ri}) - (x_i, y_i)。 \quad (11)$$

除畸变外, 对准误差 (Alignment error)、跟踪误差 (Tracking error)、掩模板的制造误差、加工过程的硅片畸变等系统误差也会导致成像位置偏移<sup>[33-34]</sup>。这些特定因素导致的系统误差可以通过适当调整进行补偿。将不同误差因素导致的成像位置偏移分量相加即可得到  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ , 可表示为

$$\Delta x_i = T_{xi} - \theta_i y_i + M_x x_i - k_1 x_i r_i^2 + r_x, \quad (12)$$

$$\Delta y_i = T_{yi} + \theta_i x_i + M_y y_i - k_1 y_i r_i^2 + r_y, \quad (13)$$

式中,  $T_{xi}$ 、 $T_{yi}$ 、 $\theta_i$  分别为测试第  $i$  个掩模标记成像位置偏移量时工件台的平移和旋转误差,  $M_x$ 、 $M_y$  分别为物镜在  $x$  方向和  $y$  方向的倍率误差,  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个掩模标记的理想成像位置,  $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$  为第  $i$  个掩模标记的理想像点到像面坐标系原点的距离,  $r_x$ 、 $r_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的拟合残差值。由  $i$  个标记可得到  $2i$  个方程, 共  $3i + 3$  个未知数, 包括  $i$  组工件台的误差 ( $T_{xi}$ 、 $T_{yi}$ 、 $\theta_i$ ) 与 1 组物镜的倍率误差 ( $M_x$ 、 $M_y$ ) 和畸变 ( $k_1$ )。假设  $T_{xi}$ 、 $T_{yi}$ 、 $\theta_i$  在所有视场点均相同, 则共有 6 个未知数, 方程组足够多时就能拟合得到被测物镜的倍率和畸变参数。考虑到方程的计算复杂度, 式 (12) 和式 (13) 描述的成像位置误差模型仅包含了常见的误差来源。误差模型越全面, 就能更准确地将成像位置偏移量分解为不同误差, 以便后续对误差进行补偿。研究表明, 建模计算的精度和不确定性取决于采样的视场点数<sup>[35-36]</sup>。一般情况下, 采样点越多, 计算结果越准确<sup>[37]</sup>。但在实践中, 考虑到采样成本和吞吐量, 在单个硅片中采样的偏移量通常有限<sup>[38]</sup>, 可能没有足够的测量样本对更复杂的模型参数进行估计, 因此要平衡模型复杂度与采样数量的矛盾。合适的模型应满足的条件: 功能上可描述已知潜在误差来源的参数、拟合后的残差最小且不相关 (即随机噪声)<sup>[39]</sup>。为了消除掩模板的制造误差对畸变检测的影响<sup>[40]</sup>, 可提前用掩模板位置测量设备检测掩模板标记的位置误差, 然

后基于测量结果对标记的理想成像位置和实际成像位置偏移量进行修正。常用的掩模板位置测量工具有 Zeiss PROVE、KLA LMS IPRO6、LMS IPRO4。

目前主流的光刻机为步进重复光刻机 Stepper 和步进扫描光刻机 Scanner, Stepper 的典型视场为  $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ , 曝光场为视场的  $1/4$ ; Scanner 的曝光狭缝 (Exposure slit) 尺寸为  $26 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  (ASML)、 $26 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$  (ASML) 或  $26 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  (NIKON), 通过扫描可实现  $26 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$  的曝光场。投影物镜本身的畸变, Stepper 和 Scanner 均在静态模式下检测, Scanner 可以在动态模式下 (物面和像面做相对运动) 测量物镜的动态畸变。动态畸变是扫描狭缝内静态畸变在扫描方向  $y$  上的加权平均值, 权重因子取决于扫描方向  $y$  上的光强分布、扫描策略等。光刻投影物镜的畸变检测装置如图 7 所示。物面装载一块包含畸变测试掩模标记的掩模板, 用控制器驱动曝光狭缝移动, 使照明系统发出的光每次只照射一个标记, 通过投影物镜对其成像。像平面可以是涂胶硅片、传感器或相位测量干涉仪, 依次照亮每个标记, 并根据标记的成像位置偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  拟合得到畸变。

根据成像位置偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  的获得方法, 可将光刻投影物镜的畸变检测技术大致分为曝光法、空间像测量法、波前测量法三类。曝光法需要将成像位置偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  转化为套刻标记的套刻误差  $[d'_{(x+x)_i}, d'_{(y+y)_i}]$ , 其中,  $X$ 、 $Y$  表示不同方向的场间误差,  $x$ 、 $y$  表示不同方向的场内误差; 空间像测量法、波前测量法则需对标记的实际成像位置  $(x_{ri}, y_{ri})$  进行测量。

### 3.2 基于曝光的畸变检测技术

基于曝光的畸变检测流程如图 8 所示, 先将测量标记在硅片上曝光两层, 形成套刻标记, 显影后用套刻测量仪测量套刻误差  $[d'_{(x+x)_i}, d'_{(y+y)_i}]$  并拟合得到畸变。曝光标记的绝对成像位置偏移量  $[d_{(x+x)_i}, d_{(y+y)_i}]$  分为系统误差和非系统误差。系统误差包含场间误差  $(d_{xi}, d_{yi})$  (下标  $i$  为曝光场序号) 和场内误差  $(d_{xi}, d_{yi})$ , 如图 9 所示。场间误差 (网格误差) 是工件台移动造成的误差, 包括平移和旋转, 即曝光场实际中心位置与理想中心位置的偏差; 场内误差主要由工件台、透镜畸变和倍率误差

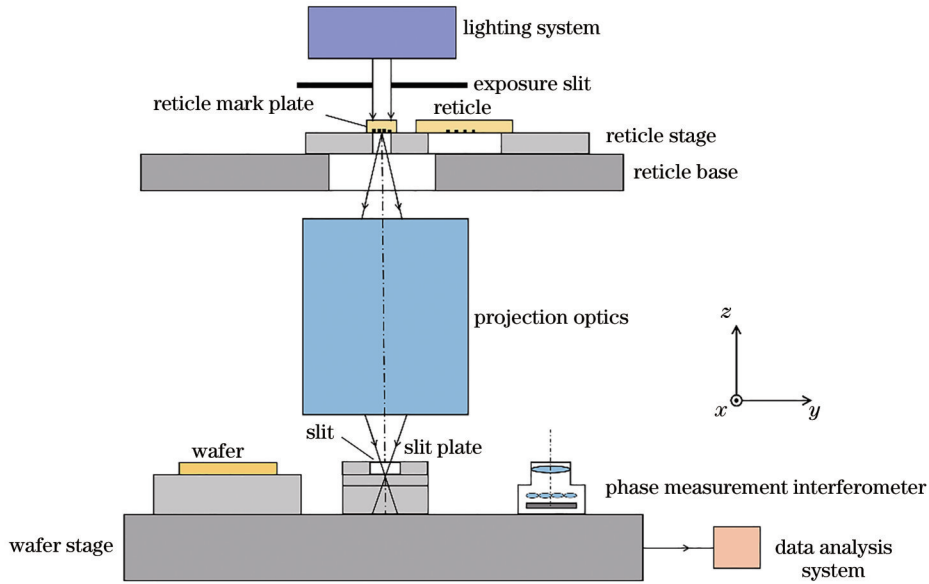


图 7 光刻投影物镜畸变检测装置的示意图

Fig. 7 Diagram of the distortion measurement device of lithography projection objective

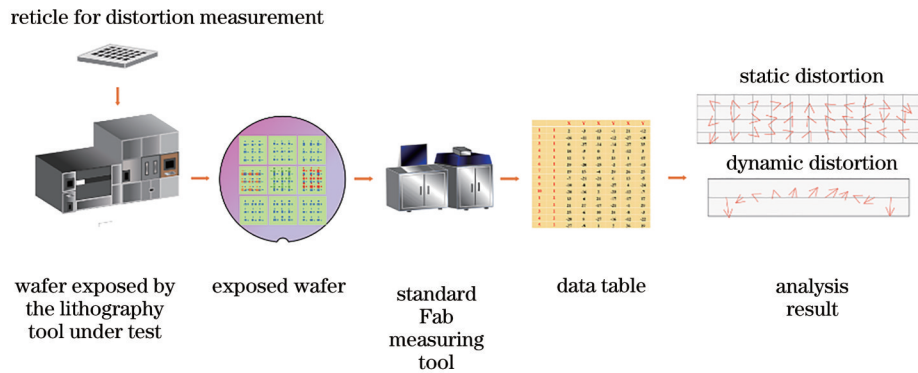


图 8 基于曝光的畸变检测流程图

Fig. 8 Flow chart of distortion measurement based on exposure

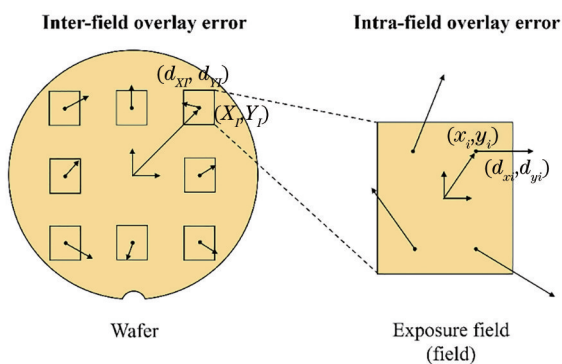


图 9 场间误差和场内误差<sup>[36,41]</sup>

Fig. 9 Inter-field error and intra-field error<sup>[36,41]</sup>

造成,可表示为曝光场内不同视场点的实际位置与理想位置的偏差。模型中的非系统误差虽然不能被修正,但可通过减少制造过程中的方差最

小化<sup>[36]</sup>。

场间误差 $(d_{xI}, d_{yI})$ 可由 Perloff 模型<sup>[42]</sup>描述为

$$d_{xI} = T_{xI} - \Phi_{xI} Y_I + r_x, \quad (14)$$

$$d_{yI} = T_{yI} + \Phi_{yI} X_I + r_y, \quad (15)$$

式中,  $(X_I, Y_I)$  为第  $I$  个曝光场的理想中心位置,  $(d_{xI}, d_{yI})$  为第  $I$  个曝光场的实际中心位置与理想中心位置  $(X_I, Y_I)$  的偏差,  $T_{xI}, T_{yI}, \Phi_{xI}, \Phi_{yI}$  分别为第  $I$  个曝光场下工件台在  $x$  方向和  $y$  方向的平移误差和旋转误差,  $r_x, r_y$  为  $x$  方向和  $y$  方向的场间拟合残差。

场内误差 $(d_{xi}, d_{yi})$ <sup>[35]</sup>可表示为

$$d_{xi} = T_x - \theta y_i + M_x x_i - k_1 x_i r_i^2 + r_x, \quad (16)$$

$$d_{yi} = T_y + \theta x_i + M_y y_i - k_1 y_i r_i^2 + r_y, \quad (17)$$

式中,  $(x_i, y_i)$  为该曝光场内第  $i$  个测量标记的理想像点到所在曝光场理想中心位置  $(X_I, Y_I)$  的距离,



$(d_{xi}, d_{yi})$  为由场内误差引起的成像位置偏移量,  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $\theta$  分别为场内工件台的平移误差和旋转误差, 对于同一曝光场内所有视场点为常数;  $M_x$ 、 $M_y$  为物镜在  $x$  方向和  $y$  方向的倍率误差, 对于曝光场内所有视场点,  $M_x$ 、 $M_y$  和  $k_1$  均相同;  $r_x$ 、 $r_y$  为  $x$  方向和  $y$  方向的场内拟合残差。第  $I$  个曝光场的测量标记绝对成像位置偏移量  $[d_{(X+x)_i}, d_{(Y+y)_i}]$  为场间误差与场内误差的和, 可表示为

$$d_{(X+x)_i} = d_{XI} + d_{xi} = T_{X+x} - \theta y_i + M_x x_i - k_1 x_i r_i^2 + r_{X+x}, \quad (18)$$

$$d_{(Y+y)_i} = d_{YI} + d_{yi} = T_{Y+y} + \theta x_i + M_y y_i - k_1 y_i r_i^2 + r_{Y+y}, \quad (19)$$

式中,  $T_{X+x}$ 、 $T_{Y+y}$ 、 $\theta$  为场间和场内总的工件台平移和旋转误差,  $r_{X+x}$ 、 $r_{Y+y}$  为场内和场间在  $x$  方向和  $y$  方向的拟合残差。套刻误差  $[d'_{(X+x)_i}, d'_{(Y+y)_i}]$  为硅片上两层曝光图形的相对成像位置偏移量, 可表示为

$$d'_{(X+x)_i} = d_{(X+x)bi} - d_{(X+x)ai}, \quad (20)$$

$$d'_{(Y+y)_i} = d_{(Y+y)bi} - d_{(Y+y)ai}, \quad (21)$$

式中, 下标 a、b 分别表示第一层与第二层曝光标记,  $[d_{(X+x)ai}, d_{(Y+y)ai}]$ 、 $[d_{(X+x)bi}, d_{(Y+y)bi}]$  分别为第一层与

第二层曝光标记的绝对成像位置偏移量, 可通过式 (18)、式 (19) 计算,  $[d'_{(X+x)_i}, d'_{(Y+y)_i}]$  为第一层与第二层曝光标记的相对成像位置偏移量, 即套刻误差。

### 3.2.1 经典的曝光畸变检测流程

掩模板上包含 BOX 测量标记阵列, BOX 测量标记如图 10 所示。其中, 阴影格表示镀铬, 空白格表示可透光。为了检测光刻投影物镜的畸变, 需要在硅片上曝光两层 BOX 标记, 形成套刻标记。曝光第一层时, 将掩模板上的 BOX 标记阵列整场曝光到硅片上, 标记的实际成像位置  $(x_i, y_i)$  受畸变影响, 且所有标记具有相同的场间误差参数; 曝光第二层时, 将照明区域限制到掩模板上的一小块区域, 只有中心视场的标记被照亮。设置硅片台的步进距离为  $D/M$ , 依次将硅片台移至第一层曝光图案的理想成像位置  $(x_i, y_i)$ , 然后曝光第二层图案, 并使第二层图案 BOX B 与第一层曝光图案 BOX A 的理想成像位置  $(x_i, y_i)$  重合。由于第二层图案的每个标记都是由中心视场的标记曝光得到, 实际成像位置不受畸变影响, 但每次曝光具有不同的场间误差参数。显影后用套刻测量仪测量每个视场点位置处第一层曝光图案 BOX A 与第二层曝光图案 BOX B 之间的套刻误差  $[d'_{(X+x)_i}, d'_{(Y+y)_i}]$ , 可表示为

$$d'_{(X+x)_i} = d_{(X+x)bi} - d_{(X+x)ai} = [T_{(X+x)bi} - T_{(X+x)a}] - (\theta_{bi} y_i - \theta_a y_i) - M_x x_i + k_1 x_i r_i^2 + r'_{X+x}, \quad (22)$$

$$d'_{(Y+y)_i} = d_{(Y+y)bi} - d_{(Y+y)ai} = [T_{(Y+y)bi} - T_{(Y+y)a}] + (\theta_{bi} x_i - \theta_a x_i) - M_y y_i + k_1 y_i r_i^2 + r'_{Y+y}, \quad (23)$$

式中,  $r'_{X+x}$  和  $r'_{Y+y}$  为拟合残差,  $T_{(X+x)bi}$ 、 $T_{(Y+y)bi}$  为曝光第二层的每个小视场时工件台在  $x$ 、 $y$  方向的平移误差,  $\theta_{bi}$  为工件台的旋转误差,  $T_{(X+x)a}$ 、 $T_{(Y+y)a}$  为第一层整场曝光时工件台在  $x$ 、 $y$  方向的平移误差,  $\theta_a$  为工件台的旋转误差 (对所有标记都相同),  $M_x$ 、 $M_y$  分

别为投影物镜在  $x$ 、 $y$  方向的倍率误差,  $k_1$  为畸变误差 (对所有标记都相同)。对于  $i$  个套刻标记, 可以列出包含  $2i$  个方程组, 共  $3i+6$  个未知数, 包括  $i$  组第二层曝光时的工件台定位误差  $T_{(X+x)bi}$ 、 $T_{(Y+y)bi}$ 、 $\theta_{bi}$ , 1 组第一层曝光时的工件台定位误差  $T_{(X+x)a}$ 、 $T_{(Y+y)a}$ 、 $\theta_a$ , 1 组投影物镜的倍率误差  $M_x$ 、 $M_y$  和畸变  $k_1$ 。通常假定第二层曝光部分各个视场的工件台误差相同, 从而将待求参数减少到 9 个, 用 5 个测量标记即可拟合出畸变, 但拟合的畸变值会受到第二层曝光工件台误差 (平移和旋转) 的影响。

### 3.2.2 商用曝光畸变检测产品

Litel 仪器公司提出了一种自参照方法测量投影物镜的畸变<sup>[2]</sup>, 用数学方法对畸变与工件台和掩模板的对准误差进行解耦。该技术使用的掩模板包含由图 10 中掩模测试标记组成的阵列。X、Y 剪切曝光场的细节如图 11 所示。其中, 实线表示第一层曝光图案, 虚线表示第二层曝光图案。在 X 剪切曝光场中,

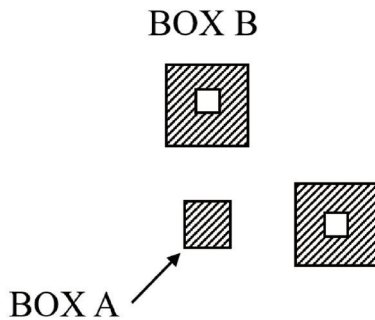


图 10 BOX 测量标记<sup>[2]</sup>

Fig. 10 Box measurement mark<sup>[2]</sup>



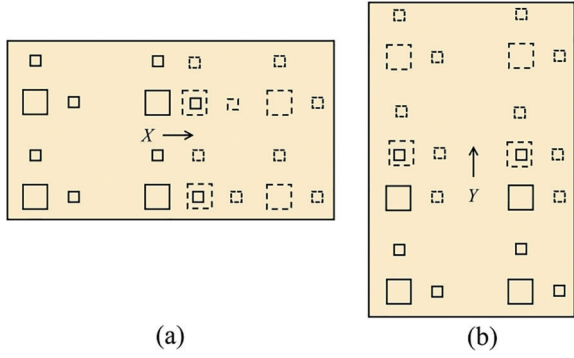


图 11 剪切曝光场。(a) X 剪切曝光场; (b) Y 剪切曝光场<sup>[2]</sup>  
Fig. 11 Shear exposure field. (a) X shear exposure field;  
(b) Y shear exposure field<sup>[2]</sup>

先将 1 组  $2 \times 2$  阵列的掩模测试标记曝光到硅片上, 然后将硅片台在  $x$  方向移动距离  $D+d$  后再曝光第二层, 形成 X 剪切。其中,  $D$  为测试标记的间距,  $d$  为测试标记内 BOX A 与 BOX B 标记的间距。X 剪切曝光场包括 1 列共 2 个套刻标记。在 Y 剪切曝光场中, 先将一组  $2 \times 2$  阵列的掩模测试标记曝光到硅片上, 然后将硅片台在  $y$  方向移动距离  $D+d$  后再曝光第二层, 形成 Y 剪切。Y 剪切曝光场包括 1 行共 2 个套刻标记。显影后用套刻测量仪测量 X、Y 剪切曝光场 4 个套刻标记的套刻误差  $[d'_{(X+x)X_i}, d'_{(Y+y)X_i}]$  和  $[d'_{(X+x)Y_i}, d'_{(Y+y)Y_i}]$ , 然后建模计算畸变。X 剪切和 Y 剪切曝光场的套刻误差模型可表示为

$$d'_{(X+x)X_i} = d_{(X+x)X_{bi}} - d_{(X+x)X_{ai}} = (T_{X2} - T_{X1}) - (\theta_2 y_{bi} - \theta_1 y_{ai}) - k_1 (x_{bi} r_{bi}^2 - x_{ai} r_{ai}^2) + r_{Xx}, \quad (24)$$

$$d'_{(Y+y)X_i} = d_{(Y+y)X_{bi}} - d_{(Y+y)X_{ai}} = (T_{Y2} - T_{Y1}) + (\theta_2 x_{bi} - \theta_1 x_{ai}) - k_1 (y_{bi} r_{bi}^2 - y_{ai} r_{ai}^2) + r_{Xy}, \quad (25)$$

$$d'_{(X+x)Y_i} = d_{(X+x)Y_{bi}} - d_{(X+x)Y_{ai}} = (T_{X4} - T_{X3}) - (\theta_4 y_{bi} - \theta_3 y_{ai}) - k_1 (x_{bi} r_{bi}^2 - x_{ai} r_{ai}^2) + r_{Yx}, \quad (26)$$

$$d'_{(Y+y)Y_i} = d_{(Y+y)Y_{bi}} - d_{(Y+y)Y_{ai}} = (T_{Y4} - T_{Y3}) + (\theta_4 x_{bi} - \theta_3 x_{ai}) - k_1 (y_{bi} r_{bi}^2 - y_{ai} r_{ai}^2) + r_{Yy}, \quad (27)$$

式中,  $[d_{(X+x)X_{ai}}, d_{(Y+y)X_{ai}}]$  和  $[d_{(X+x)X_{bi}}, d_{(Y+y)X_{bi}}]$  分别为 X 剪切场第一层与第二层曝光图案的成像位置偏移量,  $i=1, 2, (x_{ai}, y_{ai})$  和  $(x_{bi}, y_{bi})$  分别为第  $i$  个套刻标记中第一层和第二层曝光图案的理想成像位置,  $T_{X1}, T_{Y1}, \theta_1$  和  $T_{X2}, T_{Y2}, \theta_2$  分别为 X 剪切曝光场第一层和第二层曝光时工件台在  $x$  方向的平移误差、 $y$  方向的平移误差和旋转误差。 $[d_{(X+x)Y_{ai}}, d_{(Y+y)Y_{ai}}]$  和  $[d_{(X+x)Y_{bi}}, d_{(Y+y)Y_{bi}}]$  分别为 Y 剪切场第一层与第二层曝光图案的成像位置偏移量,  $T_{X3}, T_{Y3}, \theta_3$  和  $T_{X4}, T_{Y4}, \theta_4$  分别为 Y 剪切曝光场第一层和第二层曝光的工件台在  $x$  方向的平移误差、 $y$  方向的平移误差和旋转误差。式(24)~式(27)中的未知数为工件台误差  $T_{X1}, T_{Y1}, \theta_1 (I=1\sim4)$  和畸变系数  $k_1$ 。如果  $k_1$  为式(24)~式(27)的解, 则  $[k_1 x r^2 + T_x - (\theta - \theta_0) y + s_x x, k_1 y r^2 + T_y + \theta x + s_y y]$  也是式(24)~式(27)的解。其中,  $T_x, T_y$  为任意平移误差,  $\theta$  为任意旋转角,  $\theta_0$  为任意正交,  $s_x, s_y$  为任意  $x, y$  方向的倍率误差。该技术用一组约束方程有效定义了式(24)~式(27)在零空间内的唯一解, 使畸变与硅片台误差硅片的对准误差与掩模板的对准误差无关, 至少用 4 个套刻标记就能确定镜头畸变。

Litel 仪器公司虽然消除了工件台误差对畸变检测精度的影响, 但检测精度受套刻误差测量精度的影响。Fab 厂广泛部署的套刻测量工具有 KLA5300、Bio-rad Q7 等, 基于该技术, Litel 仪器公司开发了检测光刻投影物镜畸变的产品 Distortion Mapper (DMAP), 可以测量 Stepper 和 Scanner 中投影物镜的静态畸变以及 Scanner 中的动态畸变, 且仪器的重复性小于 1 nm。

### 3.2.3 其他减小场间误差影响的畸变检测流程

除 Litel 仪器外, SMEE 也通过类似技术减小了场间误差对畸变检测的影响<sup>[3]</sup>, 提高了畸变拟合精度, 其原理如图 12 所示。第一层仍然将掩模板整场曝光到硅片上, 用实线图案表示; 第二层曝光时照明区域限制在中心视场附近的  $3 \times 3$  测量标记阵列, 如小实线框中的标记。然后移动工件台, 将  $3 \times 3$  标记阵列依次与第一层曝光图案的理想成像位置对齐后曝光第二层, 每次形成 9 个套刻标记, 如虚线框中的虚线标记。依次移动工件台, 曝光 8 次, 直至第二层曝光结束。将硅片显影, 通过套刻测量工具测量 72 组套刻误差, 拟合出工件台的定位误差和畸变, 共 144 个方程, 第  $I (I=1\sim8)$  个小视场的套刻模型可表示为

$$d'_{(X+x)i} = d_{(X+x)_{bi}} - d_{(X+x)_{ai}} = T_{(X+x)_{bl}} - \theta_{bl} y_{bi} + (M_x x_{bi} - M_x x_{ai}) - (k_1 x_{bi} r_{bi}^2 - k_1 x_{ai} r_{ai}^2) + r_x, \quad (28)$$

$$d'_{(Y+y)i} = d_{(Y+y)_{bi}} - d_{(Y+y)_{ai}} = T_{(Y+y)_{bl}} + \theta_{bl} x_{bi} + (M_y y_{bi} - M_y y_{ai}) - (k_1 y_{bi} r_{bi}^2 - k_1 y_{ai} r_{ai}^2) + r_y, \quad (29)$$

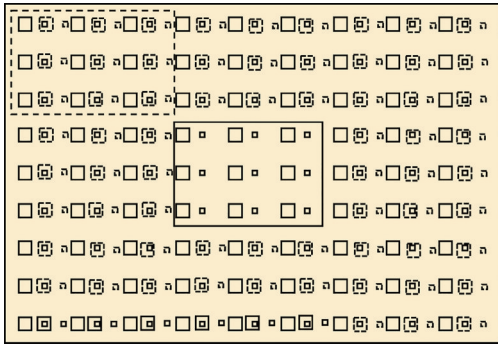


图 12 SMEE 的曝光畸变检测原理图<sup>[3]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of exposure distortion measurement of the SMEE<sup>[3]</sup>

式中,  $[d_{(X+x)ai}, d_{(Y+y)ai}]$  和  $[d_{(X+x)bi}, d_{(Y+y)bi}]$  分别为第一层和第二层曝光图案的成像位置偏移量;  $T_{xbl}$ 、 $T_{ybl}$ 、 $\theta_{bl}$  分别为第二层曝光时第  $I$  个小视场在  $x$  方向的场间平移误差、 $y$  方向的场间平移误差和场间旋转误差;  $(x_{ai}, y_{ai})$  和  $(x_{bi}, y_{bi})$  分别为第一层和第二层曝光图案的理想成像位置;  $M_x$ 、 $M_y$  分别为投影物镜在  $x$ 、 $y$  方向的倍率误差,  $k_1$  为畸变误差;  $r_x$ 、 $r_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的拟合残差。第二层曝光时, 第  $I$  个小视场的 9 个标记具有相同的工件台误差  $T_{(X+x)bl}$ 、 $T_{(Y+y)bl}$ 、 $\theta_{bl}$ , 为了简化方程, 在数学上假设第一次整场曝光时, 工件台处于理想零位。该方程组共 27 个未知数, 包括 8 组工件台定位误差  $T_{(X+x)bl}$ 、 $T_{(Y+y)bl}$ 、 $\theta_{bl}$ , 1 组透镜倍率和畸变误差  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $k_1$ 。通过 144 个方程拟合出畸变  $k_1$  以及每个小视场曝光时工件台相对于第一次整场曝光工件台的相对定位误差。通过增加每场的曝光标记数目, 将工件台误差作为拟合计算量, 从而提高畸变检测精度。

除了工件台的定位误差和套刻测量仪的测量误差外, 曝光法的检测精度还受到光刻胶工艺误差的影响。综上所述, 基于曝光的光刻投影物镜畸变检测方法流程复杂, 但原理简单, 所需的仪器也是 Fab 厂的标准工艺设备。

### 3.3 基于空间像测量的畸变检测技术

基于空间像测量的畸变检测法通过光刻机掩模对准分系统对掩模对准标记的空间像进行扫描, 扫描期间用光电转换元件将光信号转换为电信号, 对电信号进行处理可以确定测量标记空间像的位置, 电信号取最大值时的坐标即为空间像的坐标。测量多个标记的空间像位置, 然后通过拟合运算得到畸变参数。NIKON<sup>[4]</sup>、ASML<sup>[5-8]</sup>和 SMEE<sup>[9]</sup>都开发了这种畸变测量技术。畸变测量标记可以位于掩模

板对准标记(RFM)板上, RFM 固定在掩模台上, 表面与掩模板等高; 也可以在掩模板上加工配套的测试标记。RFM 和测试掩模板上的畸变测量标记为 BOX 测量标记或线宽大于等于  $4 \mu\text{m}$  的光栅标记, 以避免彗差的影响<sup>[4]</sup>。硅片面上放置空间像传感器, 使标记的空间像投影在狭缝上, 如图 13 所示。测量投影光学系统的畸变时, 移动掩模台, 使测量标记分别位于投影物镜有效视场内的多个测量点处, 每次测量时通过照明狭缝限制光源的照明区域, 使光源仅照亮一个视场点处的测量标记, 被测量标记衍射或散射的光经过投影物镜折射后在像面形成测量标记的空间像。通过空间像传感器依次检测每个测量标记的空间像位置  $(x_{ii}, y_{ii})$  并计算标记的理想成像位置  $(x_i, y_i)$ , 然后代入式(12)拟合得到畸变。

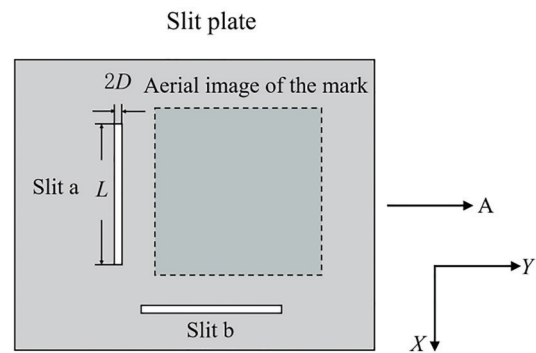


图 13 基于狭缝扫描法的空间像位置测量示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of aerial image position measurement based on slit scanning method<sup>[4]</sup>

不同技术所用的空间像传感器工作原理不同。NIKON 公司空间像传感器基于狭缝扫描的原理, 移动硅片台使测量标记的空间像位于狭缝的  $+Y$  侧, 沿图 13 中的箭头 A 方向移动狭缝板, 使狭缝 a 沿  $Y$  方向对空间像扫描, 穿过狭缝的照明光被光学传感器转换为电信号, 进而通过相位检测方法获得空间像的  $Y$  坐标。用相同的方法驱动硅片台, 使狭缝 b 沿  $X$  方向对空间像扫描, 获得空间像的  $X$  坐标。ASML 公司通过投射图像传感器掩模对准系统(TIS)基于空间像位置测量原理实现对准, TIS 传感器的物面和像面是光栅标记, 在硅片台对角位置有两个 TIS 板, 每个 TIS 板上有两个 TIS 传感器, 如图 14 所示。用 TIS 两板上的两个传感器对 TIS 标记 R1 和 R2 的空间像进行扫描, 并对扫描到的光信号进行光电转换, 得到光强最大处的位置即为对准

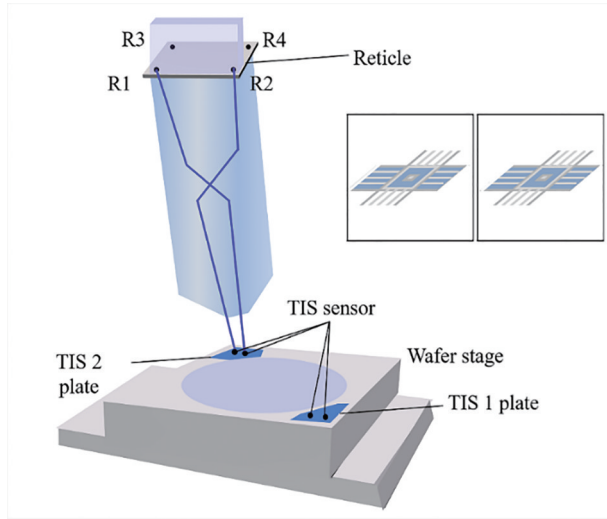


图 14 基于空间像的畸变检测<sup>[6]</sup>

Fig. 14 Distortion detection based on aerial image<sup>[6]</sup>

位置。扫描移动完成后,可同时确定 R1 和 R2 的空间像位置。将相同的过程应用于标记 R3 和 R4,得到 R3 和 R4 的空间像位置。

这类基于空间像测量的光刻投影物镜畸变检测方法不需要曝光,直接使用传感器扫描测量标记的空间像位置,具有稳定性高、成本低、可实时检测的优点<sup>[10-11]</sup>。相比基于曝光的畸变检测技术,基于空间像测量的畸变检测技术可将光刻投影物镜畸变从光刻胶工艺误差中分离出来,但检测精度受硅片台定位误差和空间像位置检测精度的影响。

为了提高畸变检测精度,SMEE 提出了差分测量的技术<sup>[14]</sup>,可减小硅片台定位误差对检测精度的影响,其原理如图 15 所示。该技术采用像传感器同时对一组(2个)对准标记的空间像位置进行检测,

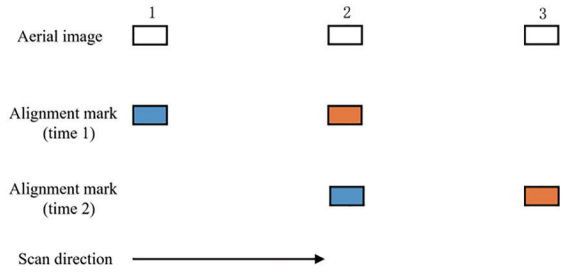


图 15 差分测量的原理<sup>[14]</sup>

Fig. 15 Principle of the differential measurement<sup>[14]</sup>

获得的两个空间像位置受相同外界干扰和工件台运动误差的影响;然后在下一个时刻对另一组对准标记的空间像位置进行检测,且其中 1 个标记与上一组测试时的标记相同,从而基于重合标记空间像位置的测试结果补偿工件台的位移误差。

### 3.4 基于波前测量的畸变检测技术

基于波前测量的畸变检测技术通过依次照明波前测试标记,移动波前传感器记录光源经过投影物镜成像后的波前信息,根据波前信息计算出每个波前测试标记的实际成像位置,最终根据理想成像位置和实际成像位置的差值拟合计算投影物镜的畸变。该技术可同时测量投影物镜的波像差,包括夏克-哈特曼波前传感器检测法<sup>[12-15]</sup>和干涉仪检测法<sup>[43-45]</sup>。

#### 3.4.1 基于夏克-哈特曼波前传感器的畸变检测

波前传感器是一种用于测量波像差的设备,也可用于畸变检测。夏克-哈特曼波前传感器由经典哈特曼方法发展而来,用微透镜阵列代替小孔阵列分割光束并将子光束聚焦,提高了光能利用率<sup>[46]</sup>,其原理如图 16 所示。测量待测波前时,通常将夏

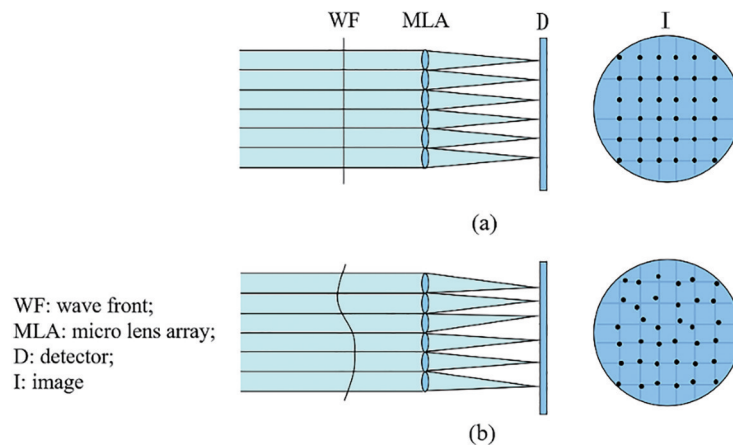


图 16 夏克-哈特曼传感器的原理。(a)理想波前;(b)变形波前<sup>[11]</sup>

Fig. 16 Principle of the Shaker-Hartmann sensor. (a) Ideal wavefront; (b) deformed wavefront<sup>[11]</sup>



克-哈特曼波前传感器放置在与系统光瞳共轭的平面上。首先,用微透镜阵列对整体波前进行采样,每个微透镜对应一个局部波前,即子孔径;然后,计算 CCD 阵列平面测量点质心位置与参考点质心位置的差,解算各个子孔径对应的局部波前平均斜率;最后,通过几何运算求得整个入射波前的变形信息,完成波前探测过程<sup>[47]</sup>。

物面使用包含针孔阵列的掩模板,将夏克-哈特曼传感器安装在工件台上,以接收由准直镜准直后的被测波前,夏克-哈特曼传感器分别与每个针孔标记的理想成像位置对准,以测试其波前误差。根据夏克-哈特曼传感器测得的波前  $Z_2 \sim Z_4$  项 Zernike 系数,计算得到波前倾斜角和曲率半径,结合夏克-哈特曼准直镜的焦距  $f$ ,计算对准位置偏差  $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ,可表示为

$$\Delta x_i = f \times \frac{Z_2}{R_{\text{sensor}}}, \quad (30)$$

$$\Delta y_i = f \times \frac{Z_3}{R_{\text{sensor}}}, \quad (31)$$

$$\Delta z_i = -16f \times \frac{Z_4^2}{R_{\text{sensor}}^4}, \quad (32)$$

式中,  $R_{\text{sensor}}$  为 CCD 探测到的单位圆半径,  $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$  为第  $i$  个标记的实际像点  $H'$  与参考点  $H$  (夏克-哈特曼传感器准直透镜的焦点) 的位置偏差,如图 17 所示。计算  $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$  后,加上参考点  $H$  的位置(针孔标记的理想成像位置  $(x_i, y_i, z_i)$  与工件台位置  $(X_i, Y_i, Z_i)$  之和),即标记的实际成像点位置  $(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$ 。该方法的精度受硅片台定位误差、夏克-哈特曼传感器对  $Z_2 \sim Z_4$  项 Zernike 系数测量误差的影响<sup>[47]</sup>。为了提高测量分辨率,需要提高微透镜阵列的焦距长度,但同时也会增大传感器的整体尺寸。

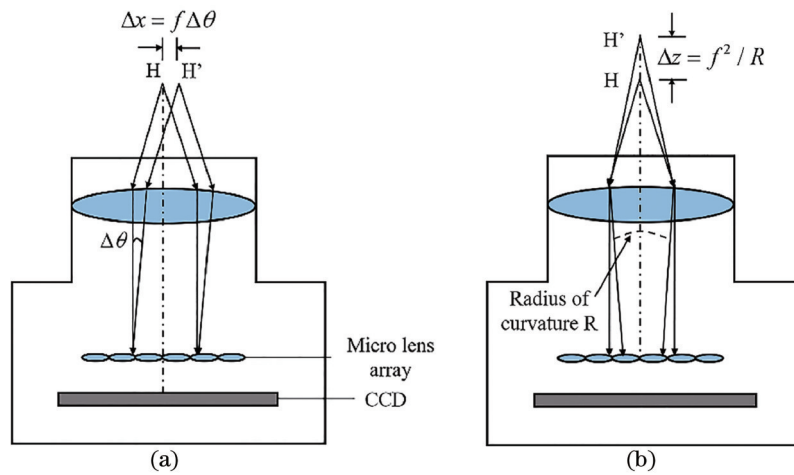


图 17 夏克-哈特曼传感器测量标记像点位置偏差的原理。(a) 横向; (b) 纵向<sup>[15]</sup>

Fig. 17 Principle of measuring the position deviation of the marked image point with the Shake-Hartmann sensor.

(a) Horizontal; (b) vertical<sup>[15]</sup>

SMEE 在 2007 年提出采用同步移相干涉仪检测畸变<sup>[45]</sup>,原理如图 18 所示,其数据处理流程及特点与夏克-哈特曼波前传感器基本相同。

### 3.4.2 基于干涉仪的畸变检测

利用干涉仪测量畸变的方法与基于夏克-哈特曼传感器的畸变检测方法原理相同,干涉仪可分为点衍射干涉仪、剪切干涉仪等,点衍射干涉仪通过小孔衍射形成的理想球面波作为参考波前,剪切干涉仪中被测波前与自身的错位波前发生干涉<sup>[48]</sup>。

#### 1) 基于点衍射干涉仪的畸变检测方法

美国 SNL 等机构于 2001 年用点衍射干涉仪对 EUV 光刻投影光学系统的畸变进行测量<sup>[16]</sup>,其原理

如图 19 所示。投影物镜是一个四镜系统,数值孔径 NA 为 0.1,缩小倍率为 4 倍。物面和硅片面各有一块针孔阵列掩模板,每个针孔阵列掩模板上有 45 个针孔。使用 Leica IPRO 掩模检测工具测量所有针孔的相对横向坐标,测量精度为 12 nm。测试光束由硅片面的针孔衍射形成,由投影光学系统成像到物面,然后被针孔掩模板的基底反射,在 CCD 上与参考光束(通过掩模面的小孔衍射)干涉。对干涉条纹进行分析,获得波前  $Z_2 \sim Z_3$  项 Zernike 系数。该系统的畸变测量精度主要受限于针孔掩模标记位置的标定误差及干涉仪测量的重复性,整体精度优于 20 nm。



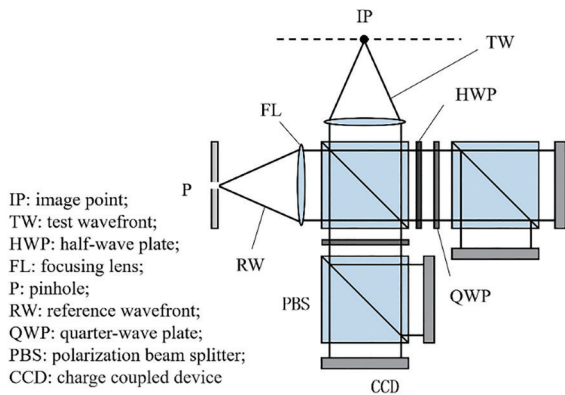


图 18 SMEE 干涉仪的原理<sup>[45]</sup>

Fig. 18 Principle of the SMEE interferometer<sup>[45]</sup>

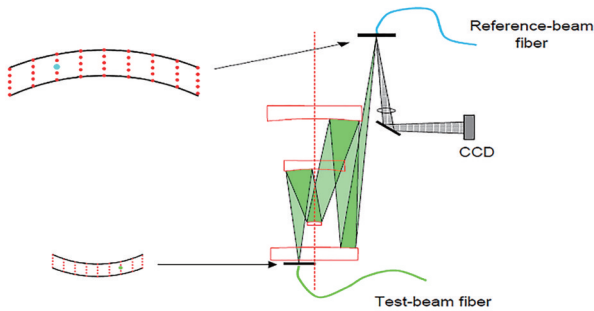


图 19 点衍射干涉仪测量畸变的光路图<sup>[16]</sup>

Fig. 19 Optical path diagram of the point diffraction interferometer for measuring distortion<sup>[16]</sup>

2) 基于剪切干涉仪的畸变检测方法

ASML 在 2003 年发布的 ILIAS<sup>TM</sup><sup>[17]</sup> 系统能在线高精度、快速测量和分析整个像场的波前像差<sup>[49]</sup>，系统基于横向剪切干涉原理<sup>[50]</sup>，如图 20 所示。在被测投影物镜的物面和像面分别放置一维 Ronchi 光栅和棋盘光栅，用非相干光源均匀照明物面光栅，

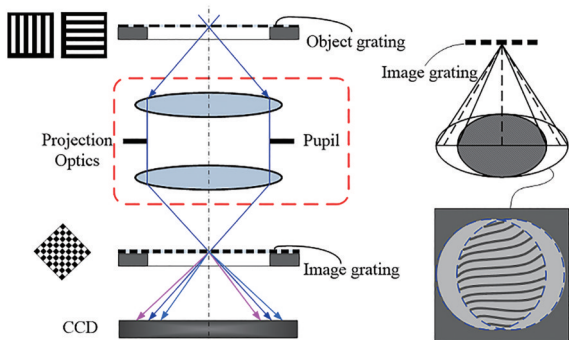


图 20 基于 Ronchi 剪切干涉的投影物镜波像差检测系统<sup>[51]</sup>

Fig. 20 Wave aberration detection system of projection objective based on Ronchi shearing interference<sup>[51]</sup>

用物面光栅调制光场空间相干性，使投影物镜的光瞳被均匀照明；像面光栅作为分光元件使各衍射级次互相平移错位，0 级与其他奇数级次衍射光干涉后在 CCD 上形成干涉图像，其他衍射级次之间不发生干涉。像面光栅安装在位移台上，通过移动像面光栅引入相移，采用相移算法求解剪切方向正交的两组干涉图获得差分波前，通过波前重建求得被测投影物镜的波像差<sup>[51]</sup>，根据  $Z_2 \sim Z_3$  项的 Zernike 系数求出畸变。

基于  $Z_2 \sim Z_3$  项 Zernike 系数计算成像位置偏离量 ( $\Delta x_i, \Delta y_i$ ) 的原理和夏克-哈特曼传感器不同，可将基于剪切干涉的对准位置偏差表示为

$$\Delta x = \frac{a_2 s}{\lambda} \times P, \tag{33}$$

$$\Delta y = \frac{a_3 s}{\lambda} \times P, \tag{34}$$

式中， $P$  为棋盘光栅的周期， $a_2, a_3$  分别为  $Z_2, Z_3$  项 Zernike 系数， $\lambda$  为光源波长， $s$  为归一化剪切量。

基于 ILIAS 干涉仪的原理，ASML 在 2013 年开发了多通道并行 PARIS 传感器，用于掩模对准和捕捉热效应，如透镜加热和掩模板加热<sup>[18-19]</sup>。PARIS 配备了高速干涉信号处理板卡，能并行测量 7 个视场点，测量网格的示意图如图 21 所示。为了支持 PARIS 测量，掩模台基准版和芯片制造掩模板上均有 PARIS 测试标记，芯片制造掩模板上的 PARIS 测试标记如图 22 所示。由于 PARIS 传感器能够同步获得 7 个视场点的对准偏移量，从而获得成像位置偏移量，光刻物镜视场为  $26 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ ，7 个通道在长边 (26 mm) 排列，可通过与曝光检测类似的算法从原理上消除工件台定位误

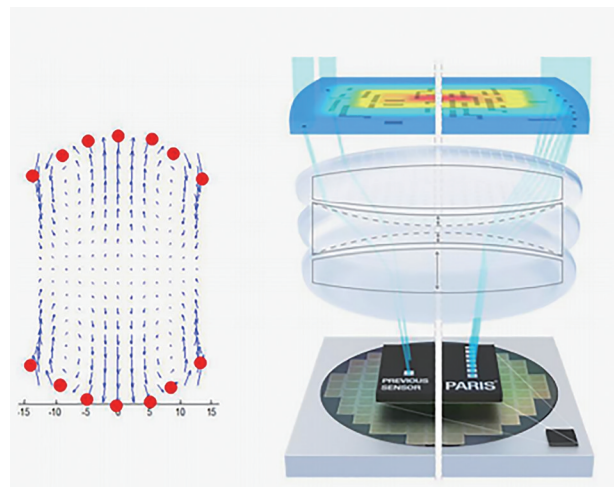


图 21 测量网格的示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 21 Schematic diagram of the measurement grid<sup>[19]</sup>

差的影响。相比点衍射干涉仪或夏克-哈特曼传感

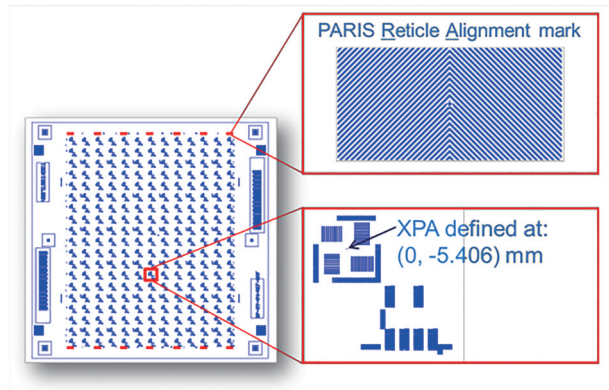


图 22 掩模板两端的 PARIS 掩模对准标记阵列(2×7)<sup>[52]</sup>  
Fig. 22 Reticle alignment marks (2×7) on both ends of the mask are used to align the reticle<sup>[52]</sup>

器,剪切干涉仪不需要采用小孔产生参考波前,在物像面均采用光栅作为检测标记,能更好地利用光刻机照明系统的光能,更适合进行光刻机原位检测。

### 3) 基于莫尔条纹的畸变检测方法

基于莫尔条纹原理也可实现对准偏移量的检测<sup>[44]</sup>,NIKON公司在1999年提出了一种通过像传感器测量光栅莫尔条纹测量光刻投影物镜畸变的

方法<sup>[53]</sup>,其原理如图 23 所示。在光刻投影物镜的物面和像面各有一块刻有光栅的石英掩模板,物面和像面掩模板上的光栅结构类似。像面光栅标记下方有图像传感器接收莫尔条纹信号,图像传感器光敏面与像面光栅面为共轭关系。

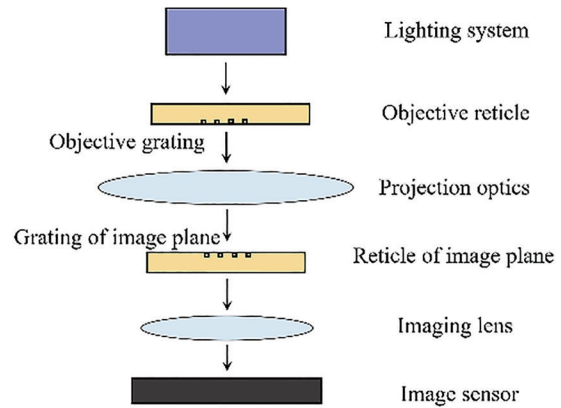


图 23 基于莫尔条纹测量光刻机投影物镜畸变的原理<sup>[53]</sup>  
Fig. 23 Principle of measuring distortion of the projection objective of the lithography machine based on Moiré fringe<sup>[53]</sup>

物面光栅标记被照明并成像至像面光栅标记,透过像面光栅的莫尔条纹信号可表示为

$$I = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos 2\pi \frac{x + \Delta x}{p_1} + \frac{1}{4} \cos 2\pi \frac{x}{p_2} + \frac{1}{8} \cos 2\pi \left[ \left( \frac{p_2 + p_1}{p_2 p_1} \right) x + \frac{\Delta x}{p_1} \right] + \frac{1}{8} \cos 2\pi \left[ \left( \frac{p_2 - p_1}{p_2 p_1} \right) x + \frac{\Delta x}{p_1} \right], \quad (35)$$

式中, $p_1$ 为物面光栅的周期, $p_2$ 为像面光栅的周期,且 $p_1$ 与 $p_2$ 接近或相等; $x$ 为沿像面光栅间的距离, $\Delta x$ 为由畸变引起的像位置偏移量。图像传感器仅能接收低频信号,相当于低通滤波器,则图像传感器接收到的信号可表示为

$$I \approx \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \cos 2\pi \left[ \left( \frac{p_2 - p_1}{p_2 p_1} \right) x + \frac{\Delta x}{p_1} \right]. \quad (36)$$

对特定 $x$ 位置的探测像元,接收到的光强信号与对准偏移量满足正弦函数关系,因此可通过相移技术实现对准偏移量的检测。数据处理方法与 ILIAS 剪切干涉仪类似,但对于高数值孔径的投影物镜,ILIAS 剪切干涉仪的结构更简单。

### 3.5 三种畸变检测技术的对比

三种畸变检测技术的测量精度、检测速度如表 2 所示。可以发现,在光刻投影物镜畸变检测技术发展过程中,畸变检测的流程越来越简单,检测精度和速度逐渐提高。基于曝光的光刻投影物镜畸变检测

方法依赖于曝光工艺和设备,检测流程复杂,检测速度较慢,且该方法的检测精度受工件台定位误差、套刻测量精度和光刻胶工艺误差的影响,但适合 Fab 厂。基于空间像测量的光刻投影物镜畸变检测方法不需要曝光,用传感器扫描的方法测量标记的空间像位置,具有稳定性高、成本低的优点<sup>[10-11]</sup>。相比基于曝光的畸变检测技术,基于空间像测量的技术不受光刻胶工艺误差的影响,但检测精度主要受工件台定位误差的影响,可通过差分测量等方法提高检测精度。基于波前测量的畸变检测技术使用针孔或光栅作为掩模测试标记,在像方探测每个掩模标记经投影物镜成像后的波前误差,基于 $Z_2 \sim Z_3$ 项 Zernike 系数,求解实际像点位置 $(x_n, y_n)$ 并拟合畸变。ASML 采用多通道同时检测多个视场点标记的成像位置偏移量大大加快了畸变检测速度,同时减小了工件台定位误差对检测精度的影响,且该技术可在检测畸变的同时检测波像差。

表 2 三种畸变检测技术的对比结果

Table 2 Comparison results of three distortion detection technologies

Distortion measurement technology	Measurement accuracy	Measurement speed	Main source of error	Ways to improve
Exposure method	medium	low	1) stage positioning error; 2) overlay measurement error	1) eliminate the influence of stage positioning error through algorithm; 2) improve the accuracy of the overlay measuring instrument improve measurement accuracy through methods such as differential measurement
Aerial image measurement method	high	high	stage positioning error	multi-channel measurement technology
Wavefront measurement method	high	medium	stage positioning error	

## 4 结 论

分析了曝光检测、空间像检测、波前检测三种典型的光刻投影物镜畸变检测方法,其核心都是在投影物镜的整个视场范围内设置阵列测量标记,对测量标记经过投影物镜成像后的实际成像位置与理想成像位置的偏移量进行检测,然后通过最小二乘拟合求出投影物镜的畸变,且三种方法的畸变检测精度均受工件台定位误差的影响。曝光法的原理简单,所需的仪器也是 Fab 厂的标准工艺设备,但检测流程复杂;其他两种方法都具有较高的检测精度,但空间像检测法的检测速度更快,且波前检测法可同时检测波像差。

受光刻特征尺寸减小、套刻精度和产率的提高、投影物镜热像差硅片间反馈控制需求等因素的推动,光刻投影物镜的畸变检测技术需要更高的检测精度、更快的检测速度。多通道检测技术是同时提高畸变检测速度和精度的重要技术途径,一方面,可通过同时检测多个视场点的成像位置偏移量,成倍缩短了测量时间;另一方面,可以从原理上消除工件台定位误差的影响,提高畸变检测精度。因此,多通道检测技术将是畸变检测的重要发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] 王向朝,戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 83.  
Wang X Z, Dai F Z. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020: 83.
- [2] Smith A, McArthur B, Hunter R, et al. Method and apparatus for self-referenced projection lens distortion mapping: US6573986[P]. 2003-06-03.
- [3] 李术新,王帆. 光刻机成像质量及工作台定位精度的

现场测量方法: CN101261451B[P]. 2011-06-29.

Li S X, Wang F. On-site measurement method of image quality of lithography and positioning accuracy of worktable: CN101261451B[P]. 2011-06-29.

- [4] Hagiwara T, Kondo N, Takane E, et al. Aerial image measurement method and unit, optical properties measurement method and unit, adjustment method of projection optical system, exposure method and apparatus, making method of exposure apparatus, and device manufacturing method: US20020041377 [P]. 2002-04-11.
- [5] van Haren R, Steinert S, Mouraille O, et al. The impact of the reticle and wafer alignment mark placement accuracy on the intra-field mask-to-mask overlay[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11178: 111780R.
- [6] Lazar B M. ASML alignment sequence generator[D]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2012.
- [7] Sluijk B G, Castenmiller T, du Croo de Jongh R, et al. Performance results of a new generation of 300-mm lithography systems[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 544-557.
- [8] van den Brink M A, Franken H, Wittekoek S, et al. Automatic on-line wafer stepper calibration system [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1261: 298-314.
- [9] 丁功明,韩春燕,李术新. 一种物镜畸变和场曲的测试装置及方法、设备: CN110941144A[P]. 2020-03-31.  
Ding G M, Han C Y, Li S X. Device, method and apparatus for testing distortion and field curvature of objective lens: CN110941144A[P]. 2020-03-31.
- [10] 诸波尔,王向朝,李思坤,等. 超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(4):



0412003.  
Zhu B E, Wang X Z, Li S K, et al. High-order aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0412003.
- [11] 董冠极. 基于点衍射干涉仪的成像系统综合像质检测技术[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2018.  
Dong G J. Measurement of the comprehensive imaging quality of imaging system based on point diffraction interferometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [12] Mizuno Y. Wavefront aberration measuring instrument, wavefront aberration measuring method, exposure apparatus, and method for manufacturing micro device: US6975387[P]. 2005-12-13.
- [13] Ishikawa J. Exposure apparatus, exposure method, and device manufacturing method: US6914665[P]. 2005-07-05.
- [14] 舒建伟, 刘国淦. 一种检测投影物镜畸变和场曲的方法: CN102540751A[P]. 2012-07-04.  
Shu J W, Liu G G. A method for detecting distortion and field curvature of projection objective lens: CN102540751A[P]. 2012-07-04.
- [15] 李天鹏, 何经雷. 一种基于掩模板的投影物镜性能测试装置以及方法: CN105890875B[P]. 2018-12-14.  
Li T P, He J L. A reticle-based projection objective lens performance test device and method: CN105890875B [P]. 2018-12-14.
- [16] Tichenor D A, Ray-Chaudhuri A K, Replogle W C, et al. System integration and performance of the EUV engineering test stand[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4343: 19-37.
- [17] Flagello D G, Socha R J, Shi X L, et al. Optimizing and enhancing optical systems to meet the low  $k_1$  challenge[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 139-150.
- [18] Mack C A. The new, new limits of optical lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5374: 1-8.
- [19] de Boeij W P, Pieternella R, Bouchoms I, et al. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8683: 86831L.
- [20] 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 415-416.  
Shi S X, Wang X E, Liu J S. Physical optics and applied optics[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 415-416.
- [21] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 120-121.  
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 120-121.
- [22] 李湘宁, 贾宏志, 张荣福, 等. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 93-107.  
Li X N, Jia H Z, Zhang R F, et al. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 93-107.
- [23] 安连生, 李林, 李全臣. 应用光学[M]. 3 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 146.  
An L S, Li L, Li Q C. Applied optics[M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002: 146.
- [24] 姚启钧. 光学教程[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 196-197.  
Yao Q J. Optical tutorial[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 196-197.
- [25] Mallon J, Whelan P F. Which pattern? Biasing aspects of planar calibration patterns and detection methods[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28 (8): 921-930.
- [26] Brown D C. Close-range camera calibration[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1971, 37(8): 855-866.
- [27] Conrady A E. Decentred lens-systems[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1919, 79 (5): 384-390.
- [28] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [29] Born M, Wolf E. 光学原理[M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Yang X S, Transl. 7th ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2005.
- [30] Kannala J, Brandt S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(8): 1335-1340.
- [31] 胡玉禧, 安连生. 应用光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.  
Hu Y X, An L S. Applied optics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.



- [32] Sudoh Y, Kanda T. New lens barrel structure utilized on the FPA-6000AS4 and its contribution to the lens performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 1657-1664.
- [33] Miyashiro R, Fukagawa Y. Optimization of alignment in semiconductor lithography equipment[J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 327-332.
- [34] Turner K T, Veeraghavan S, Sinha J K. Predicting distortions and overlay errors due to wafer deformation during chucking on lithography scanners [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2009, 8(4): 043015.
- [35] MacMillen D, Ryden W D. Analysis of image field placement deviations of a 5x microlithographic reduction lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 1982, 0334: 78-89.
- [36] Horng S C. Compensating modeling overlay errors using the weighted least-squares estimation[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2014, 27(1): 60-70.
- [37] Lin Z C, Wu W J. Multiple linear regression analysis of the overlay accuracy model[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1999, 12(2): 229-237.
- [38] Chien C F, Chang K H, Chen C P. Modeling overlay errors and sampling strategies to improve yield[J]. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2001, 18(3): 95-103.
- [39] Slonaker S, Riffel B, Nishinaga H. Challenges and solutions in the calibration of projection lens pupil-image metrology tools[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7274: 72740V.
- [40] 杨志勇. 投影物镜倍率误差及畸变的检测装置及方法: CN101387833A[P]. 2009-03-18.  
Yang Z Y. The detection device and method for the magnification error and distortion of the projection objective: CN101387833A[P]. 2009-03-18.
- [41] Smith A. Method and apparatus for self-referenced dynamic step and scan intra-field lens distortion: US6906780[P]. 2005-06-14.
- [42] Perloff D S. A four-point electrical measurement technique for characterizing mask superposition errors on semiconductor wafers[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1978, 13(4): 436-444.
- [43] Foca E, Schadt F, Hempelmann U, et al. Projection exposure apparatus and method for measuring a projection lens: US10585356[P]. 2020-03-10.
- [44] Mengel M, Wegmann U, Ehrmann A, et al. System for measuring the image quality of an optical imaging system: US7796274[P]. 2010-09-14.
- [45] 刘国淦, 段立峰. 干涉仪: CN100492179C[P]. 2009-05-27.  
Liu G G, Duan L F. Interferometer: CN100492179C [P]. 2009-05-27.
- [46] Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573-S577.
- [47] 陈璐. 自适应光学棱锥波前传感方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.  
Chen L. Study on the adaptive optics pyramid wavefront sensing method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [48] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 光学系统像质测试方法 GB/T 11168—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: image quality of optical systems: method of determination. GB/T 11168—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [49] van de Kerckhof M A, de Boeij W, Kok H, et al. Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 1960-1970.
- [50] Malacara D. *Optical shop testing*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [51] 吴飞斌. 光刻投影物镜波像差原位干涉检测技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2015: 36-37.  
Wu F B. Study on in-situ interferometric wavefront aberration measurement techniques for lithography projection lens[D]. Shanghai: Shanghai institute of optics and fine mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 36-37.
- [52] van Haren R, Steinert S, Mouraille O, et al. Wafer alignment mark placement accuracy impact on the layer-to-layer overlay performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11148: 1114811.
- [53] Kobayashi N. Lens distortion measurement using moire fringes: US5973773[P]. 1999-10-26.