

## 数字光栅调焦调平传感器的工艺适应性

曾海峰 李世光 李显杰

### Process adaptability for digital grating based focusing and leveling sensor

ZENG Hai-feng, LI Shi-guang, LI Xian-jie

#### 引用本文:

曾海峰, 李世光, 李显杰. 数字光栅调焦调平传感器的工艺适应性[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0021

ZENG Hai-feng, LI Shi-guang, LI Xian-jie. Process adaptability for digital grating based focusing and leveling sensor[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0021

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0021>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 油气井下光纤光栅温度压力传感器

Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1224 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0008>

#### 微细正交切削过程原位观测中位移补偿方法

Displacement compensation method for in-situ observation of micro orthogonal cutting process

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 476 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0032>

#### 利用反射式圆光栅的振镜转角测量

Rotational angle measurement of galvanometer using reflective circular grating

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 643 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0179>

#### 高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正

Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 327 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0144>

#### 光纤法珀传感器光楔式解调系统设计

Design of optical wedge demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1259 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0204>

#### 多靶点全景数字病理: 从原理到应用

Multi-target panoramic digital pathology: from principle to application

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1258 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0091>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

## 数字光栅调焦调平传感器的工艺适应性

曾海峰<sup>1,2,3\*</sup>, 李世光<sup>1,2,3</sup>, 李显杰<sup>3</sup>

- 中国科学院微电子研究所, 北京, 100029, 中国;
- 中国科学院大学, 北京, 100049, 中国;
- 江苏影速集成电路装备股份有限公司, 江苏, 中国)

**摘要:** 数字光栅位移测量技术将 CMOS 相机像素阵列当作一个“数字化”的光栅, 通过构造光学光栅像和数字光栅的周期差, 利用微米级的光学光栅像, 实现纳米级的位移测量。可以应用于光刻机的调焦调平传感器中, 结合倾斜入射的检测光路, 对晶圆表面高度进行精确测量。在实际测量中, 晶圆表面意外出现的图形会干扰光学光栅的反射成像, 进而影响图像处理的结果。本文提出一种数字光栅位移测量的工艺适应性方法, 以数字光栅周期为单位, 对存在干扰图案时的 CMOS 图像进行光强的重建和光强曲线的恢复, 能在晶圆基底出现较大面积图案时表现出很好的稳定性, 且该方法可以适应多种表面缺陷, 如划痕、颗粒、污渍和沟槽等。实验结果表明, 图像光强的重建后, 光强曲线的均方误差大幅减小, 修正后的 Z 向测量误差在 $\pm 33$  nm ( $\pm 3\sigma = \pm 41.2$  nm) 以内。该方法能增强数字光栅调焦调平传感器的工艺适应性, 为调焦调平方法提供技术参考。

**关键词:** 调焦调平; 数字光栅; 位移测量; 工艺适应性

中图分类号: TN307 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0021

## Process adaptability for digital grating based focusing and leveling sensor

ZENG Hai-feng<sup>1,2,3\*</sup>, LI Shi-guang<sup>1,2,3</sup>, LI Xian-jie<sup>3</sup>

- Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Jiangsu Yingsu integrated circuit equipment Co., Ltd, Jiangsu, China)

\* Corresponding author, E-mail: 1686735430@qq.com

**Abstract:** In the digital grating displacement measurement technique, the CMOS pixel array of the camera is regarded as a ‘digitized’ grating. The micron-scale grating images can realize nanoscale displacement measurement by constructing the period difference between optical grating and digital grating. Combined with the detection light path of oblique incidence, it can be applied to the focusing and leveling sensor of lithography machine to measure the wafer surface height accurately. In the actual measurement, the unexpected patterns on the wafer surface will interfere with the reflection imaging of the optical grating, then affect the results of

收稿日期: 2024-01-25; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中文基金

Supported by

image processing. In this paper, a process adaptability method for digital grating displacement measurement is proposed, which reconstructs the light intensity and recovers the light intensity curve from the CMOS image when interference patterns exist. It shows good stability when the large area pattern appears on the wafer substrate, which can adapt to multiple surface defects such as scratches, particles, stains and grooves. The experimental results show that the mean square error of the light intensity curve is greatly reduced and the Z-direction error correction by the method is within  $\pm 33$  nm ( $\pm 3\sigma = \pm 41.2$  nm) after reconstructing the light intensity. This method can enhance the process adaptability of the digital grating focusing and leveling sensor, and provide technical reference for the focusing and leveling method.

**Key words:** focusing and leveling; digital grating; displacement measurement; process adaptability

## 1 引言

数字光栅位移测量是一种用于行程测量的新技术<sup>[1]</sup>。其装置结构简单,包括光源,光栅,发射端和接收端光路和 CMOS 感光芯片(相机)。在该技术中,利用相机图像的像素处理,选择保留或去除图案,等效于一个数字化的光栅和光电探测器。但与传统光栅尺利用两光栅极小夹角产生莫尔条纹的测量方式不同<sup>[2]</sup>,数字光栅位移测量是通过人为构造一个周期差,使得光栅经过光路在 CMOS 阵列上所成的光学光栅像的周期与实验者选定的数字光栅周期二者也保持一个极小的周期差,再利用光学游标卡尺的原理对微小的位移进行放大,当光路中出现了位移,光学光栅像在 CMOS 阵列上移动时,由于周期差的存在,微米级的光栅和 CMOS 像素尺寸即可实现纳米级的高精度和高分辨率测量,且周期差越小,细分能力越强,分辨率越高;光栅的制造工艺越好,光路物理结构越稳定,测量精度越高。该技术不仅实现了对传统物理光栅尺的替代,还可以根据相机和光栅线条的尺寸搭配,灵活调整数字光栅的周期,进而改变量程和分辨率等<sup>[3]</sup>。

光刻机的调焦调平传感器是用于测量晶圆表面高度,保证聚焦控制精度的<sup>[4]</sup>。相比于 ASML、CANON 等光刻机<sup>[5][6]</sup>厂商的调焦调平传感器为了实现高精度测量,往往采用激光干涉、空间分光<sup>[7][8]</sup>、多路测量等方法,或光路/机械复杂,或控制/运算方法复杂,对于设备制造和使用环境均有较高的要求。鉴于数字光栅位移测量技术具有结构简单、分辨率和精度高、灵活性好的特点,与光刻机中调焦调平传感器的功能具有很高的应用契

合度,可以集成于光刻机中用作调焦调平传感器,实时测量曝光过程中晶圆表面的起伏,如图 5 中,当晶圆表面处在最佳焦平面时,记录此时的光学光栅像位置,当晶圆表面高度发生变化时,CMOS 阵列上的光学光栅像的位置也会随着晶圆表面反射而变化,并与之呈线性关系。因此,在确定最佳焦平面所对应光学光栅像的位置之后,就可以通过计算光学光栅像的位置变化,计算并控制晶圆表面高度值,使其在曝光过程中,始终保持在最佳焦平面附近。然而在实际曝光过程中,晶圆表面并非理想的镜面反射,待检测的表面可能会出现划痕、颗粒、污渍、沟槽等,影响光学光栅像的反射图案<sup>[9]</sup>,最终影响调焦调平的计算和控制。因此需要设计一种应用于数字光栅位移测量技术的工艺适应性方法,在调焦调平的测量和控制过程中,需要使其具备较强的抗干扰能力,能适应复杂的晶圆表面情况,能持续输出相对稳定和准确的高度值,这对于光刻工艺来说是至关重要的。

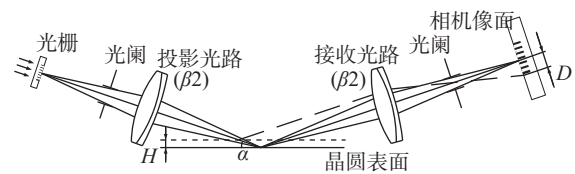


图 5 基于数字光栅的调焦调平传感器

Fig. 5 Focusing and leveling sensor based on digital grating

## 2 数字光栅位移测量原理

在机械游标卡尺上,机械主尺和游标尺的刻度线存在微小的周期差,利用两尺刻度线错位的设计将主尺的分度值进一步细分,将微小的位移

放大, 实现高分辨率测量。

类比的, 在数字光栅测量系统中, 有一个占空比为 1:1 的振幅型光栅, 光栅图案为周期性的一维线条, 经过光学系统成像在相机感光芯片表面, 在相机 CMOS 阵列上, 设定一个数字光栅周期, 如图 1, 数字光栅周期为 4 个像素, 当光栅像的周期与设定的数字光栅周期存在周期差时, 光栅像在相机 CMOS 芯片上的沿着像素周期方向的位移, 就可以用类比于游标卡尺的测量原理进行测量并算出。而事实上, 我们也总可以通过预先选择合适的相机, 灵活改变数字光栅周期、设计光栅条纹的周期或光学系统的倍率, 人为构造一个周期差<sup>[10]</sup>。

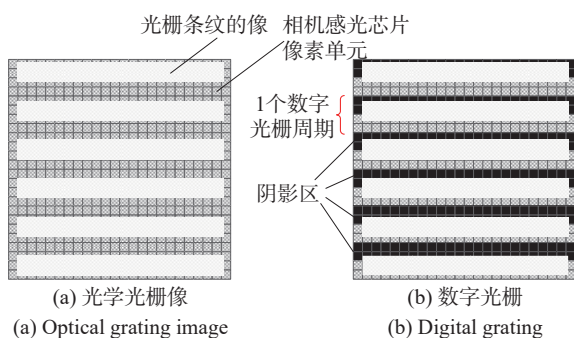


图 1 CMOS 像素阵列上的光学光栅像

Fig. 1 Optical grating image on CMOS pixel array

下表是数字光栅与游标卡尺的测量方法的类比:

表 1 类比数字光栅和游标卡尺

Tab. 1 Analogical to digital gratings and vernier calipers

	数字光栅	游标卡尺
主尺	相机的像素阵列	机械主尺
游标尺	周期性光栅像	机械游标尺
原理	利用周期差对微小位移进行“放大”	
方法	求解光强曲线零点	找刻度对准点读数
分辨率	高于周期差	两尺的周期差

数字光栅测量的具体方法为: 上位机接收到 CMOS 相机上光栅条纹像的光强信号之后, 在一个数字光栅周期内, 对像素上所成的光栅像进行保留或删除。如图 1(a) 和图 1(b) 所示: 如果对阴影区域像素上的光栅像去除, 而保留另一半数字光栅周期的光栅像, 就能得到图 2(a) 的白色部分

的结果, 反之保留阴影区域像素上的光栅像, 对另一半数字光栅周期的光栅像进行去除, 就能得到图 2(b) 的白色部分的结果。

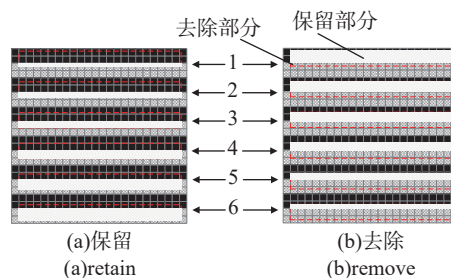


图 2 数字光栅对光学光栅像的保留和去除

Fig. 2 Digital grating retain and remove optical grating image

设光栅像在相机 CMOS 芯片表面像素阵列的光强分部为矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1c} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r2} & \cdots & a_{rc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$r$  和  $c$  分别表示相机像素阵列的行数和列数,  $a_{ij}(i \leq r, j \leq c)$  表示相机第  $i$  行第  $j$  列像素点的光强。

将上述周期性地对各像素上的光强进行保留或删除的操作用一个矩阵 B 表示, 其中, B 中像素值为“1”的表示信号保留, 为“0”的表示信号去除, 设矩阵 A 与矩阵 B 进行数乘, 结果为矩阵  $C_1$ , 对应图 2(a) 的白色部分的光强分布。同样地, 将矩阵 B 按位取反得到矩阵  $\bar{B}$ , 矩阵  $\bar{B}$  与矩阵 A 数乘结果为矩阵  $C_2$ , 对应图 2(b) 的白色部分的光强分布。这两个像素操作矩阵 B 和  $\bar{B}$  称为数字光栅。

$$B = \begin{bmatrix} 1_{11} & 1_{12} & \cdots & 1_{1c} \\ 1_{21} & 1_{22} & \cdots & 1_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{r1} & 0_{r2} & \cdots & 0_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0_{11} & 0_{12} & \cdots & 0_{1c} \\ 0_{21} & 0_{22} & \cdots & 0_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1_{r1} & 1_{r2} & \cdots & 1_{rc} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_1 = A * B \quad C_2 = A * \bar{B}, \quad (3)$$

由于光学光栅图像的周期与数字光栅周期存在周期差, 光学光栅图像一个光栅周期占据数字

相机  $P=2 \times (n+\Delta n)$  个像素, 其中  $n$  为整数, 数字光栅  $B$  和  $\bar{B}$  的周期为  $2n$ 。光学光栅像周期与数字光栅周期的周期差  $\Delta T=2 \cdot \Delta n$ 。

由式 3 可知,  $C_1+C_2=A$ , 当光学光栅图像每移动  $\Delta T=2 \cdot \Delta n$  个像素距离(数字光栅与光学光栅图像的周期差)时, 对准点便会跨越一个数字光栅周期。这类似于机械游标卡尺测量位移。当光学光栅图像在数字相机像面移动时, 相机 CMOS 像素阵列的光强分布也会变化, 通过计数对准点移动了多少个数字光栅周期, 则光学光栅图像在数字相机像面的位移量  $D$  便可通过式 (4) 计算出来。

$$D=\Delta P \cdot \Delta T \cdot px \quad (4)$$

其中,  $\Delta P$  表示光栅像位移前后的对准点移动量(单位为数字光栅周期),  $\Delta T$  为光学光栅像周期与数字光栅周期的周期差(单位为像素值),  $px$  表示每个数字像素的尺寸(单位为  $\mu m$ )。

与机械游标卡尺相同, 数字光栅位移测量的分度值为“两尺”的周期差对应的尺寸  $\Delta T \cdot px$ , 即  $2 \cdot \Delta n \cdot px$ , 所以  $\Delta n$  越小, 数字光栅的细分能力就越强, 分辨率就越高。

计算方法:

以数字光栅周期为单位, 对  $C_1$  和  $C_2$  两个矩阵的每个周期内的光强进行积分累加, 得到两组以数字光栅周期数  $t$  为自变量的光强变化数据  $I_1$  和  $I_2$

$$I_1(t)=\sum_{i=1+2n(t-1)}^{n+2n(j-1)} \sum_{j=1}^c a_{ij} \quad (5)$$

$$I_2(t)=\sum_{i=n+1+2n(t-1)}^{2n+2n(j-1)} \sum_{j=1}^c a_{ij} \quad (6)$$

以图 2 的光栅图像为例, 作出图 3 光强曲线  $I_1$  和  $I_2$ :

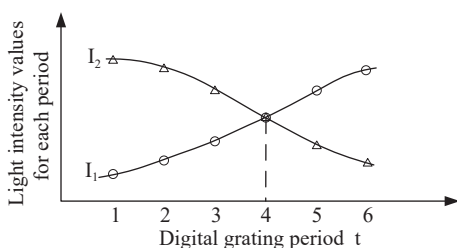


图 3 光强曲线  $I_1$  和  $I_2$

Fig. 3 Light intensity curve  $I_1$  and  $I_2$

当  $I_1$  和  $I_2$  两个曲线在第 4 个数字光栅周期相等时, 说明在第 4 个数字光栅周期, 光学光栅像被数字光栅边界等分了, 此处即为对准点, 类似于机械游标卡尺中两尺刻度线对齐的点。需要说明的是, 对准点的位置可以不是一个整数, 而可以是任意小数。其值可以由两组光强数据分别拟合出两组曲线表达式, 通过解方程 (7) 求出。

$$I = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = 0 \quad (7)$$

调焦调平传感器发射端的光栅经过发射端光路在晶圆表面成像, 晶圆表面的像经过接收端光路在 CMOS 表面第二次成像, 在单色光非相干照明情况下, 两次成像均满足夫琅禾费衍射的远场条件。当光栅线条周期数足够多时, 光学光栅像的光强沿光栅线条周期方向为类正弦周期函数<sup>[11]</sup>。而由于构造一个较小的周期差  $\Delta T$  的目的, 数字光栅的周期会约等于光学光栅像的周期, 因此, 数字光栅上的像素对光学光栅像的采样不满足香农采样定理的采样条件, 经过数字光栅采样后的图像信号会在沿光栅线条周期方向出现频谱混叠, 因此采样后的  $I_1$  和  $I_2$  曲线以及归一化后  $I$  曲线光强值仍呈类正弦分布, 但周期会有所变化<sup>[12]</sup>, 方程 (7) 中  $I=0$  的零点对应的像素位置, 就是数字光栅的对准点位置。图 4 中, 当  $I$  曲线由  $L_1$  移动到  $L_2$  时, 对准点位置也从  $P_1$ 、 $Q_1$  移动到  $P_2$ 、 $Q_2$ 。可以借助对准位置的变化量, 推算 CMOS 相机阵面的图像的位移量。

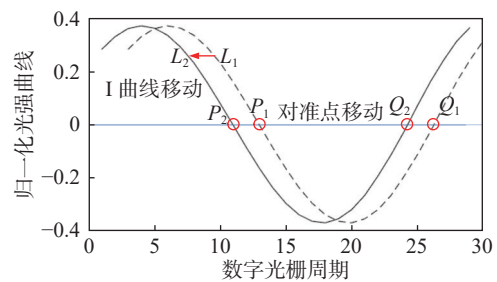


图 4 归一化的  $I$  曲线

Fig. 4 Normalized  $I$  curves

由于实际的光栅成像过程中, 光栅线条周期有限, 长宽比  $\neq \infty$ , 光机件的加工和装调也存在误差, 加上光路中像差的存在, 光学光栅像的光强并非理想的类正弦曲线, 会存在少量的谐波, 为确保数理结果的严谨, 拟合光强  $I$  曲线时用多项式拟合即可。

### 3 数字光栅在光刻机调焦调平传感器中的应用

光刻机在扫描曝光过程中, 由于晶圆表面存在高度起伏, 工件台位移时还会有  $Z$  向的 pitch 值, 要保证光刻的成像质量, 待曝光的晶圆表面必须时刻处在系统的焦深范围内<sup>[13]</sup>。而焦深随着光刻机的制程缩小而减小, 因此需要调焦调平传感器和控制系统对晶圆表面的高度进行实时且精确的测量和控制<sup>[14]</sup>。由于数字光栅位移测量技术可以对位移量进行微米像素下的进一步细分, 用简单的光路和线性的计算方法就能测得纳米级的微小位移, 分辨率能达到 50 nm, 与光刻机的调焦调平测量有很好的应用契合度。图 5 是基于数字光栅的调焦调平传感器, 光栅像从发射端端经过投影光路倾斜入射到晶圆表面, 经晶圆表面反射后通过接收端光路成像于相机的 CMOS 芯片表面。

当晶圆表面的高度发生变化时, CMOS 像素阵列上的光学光栅像也会发生位移。数学关系为:

$$D = \beta_2 \cdot 2 \cdot \left( \frac{H}{\tan \alpha} \right) \cdot \sin \alpha = 2H\beta_2 \cos \alpha \quad (8)$$

即:

$$H = \frac{D}{2\beta_2 \cos \alpha} \quad (9)$$

其中,  $\beta_2$  是接收光路的放大倍率。  $\alpha$  是光栅成像光路与晶圆表面的夹角。由第一节推导可知,  $D$  与对准点的移动值成正比, 当光学光栅像在相机的像面上移动, 同一对准点从  $P_1$  移动到  $P_2$  时, 可以计算出晶圆表面的高度变化:

$$H = \frac{px(P_2 - P_1)\Delta T}{2\beta_2 \cos \alpha} \quad (10)$$

至此, 即可利用数字光栅位移测量的方法去测量晶圆表面的高度变化。

在实际调焦调平的测量过程中, 由于待曝光晶圆的光刻胶表面可能存在颗粒、凹陷, 划痕、污渍等图形, 其图像信息会被光学光栅像的反射光携带, 最终在相机上成像; 对数字光栅位移测量的结果造成较大的影响。因此需要对数字光栅测量方法进行改进和完善, 使之具有一定的工艺适应性。

如图 6 所示, 当晶圆表面高度为  $Z_1$  时, 假设晶圆表面  $Y_1$  有一处污渍,  $A_1$  处发出的入射光投射到污渍上, 携带着污渍的图像信息反射到  $B_1$  点。当晶圆表面高度竖直上升至  $Z_2$  位置时,  $A_1$  处发出的光投射至晶圆表面的反射点变为  $Y_1'$ , 反射到  $B_3$ , 而污渍的位置上升至  $Y_2$  处, 经  $A_2$  处发出的入射光反射成像与  $B_2$  点。因此, 可以得出, 当晶圆表面高度变化  $H$  时, 光学光栅所成的像与晶圆表面图案反射的像均会产生位移  $D_1$  和  $D_2$ , 但位移量不一致。

$$D_1 = 2H\beta_2 \cos \alpha \quad (11)$$

$$D_2 = \beta_2 \cdot \frac{H}{\tan \alpha} \cdot \sin \alpha = H\beta_2 \cos \alpha = \frac{D_1}{2} \quad (12)$$

由此可见, 当晶圆表面存在  $Z$  方向的竖直位移时, 在相机 CMOS 上, 晶圆表面图案反射所成的像的位移是发射端光学光栅所成的像的位移的一半, 二者并非同步变化。

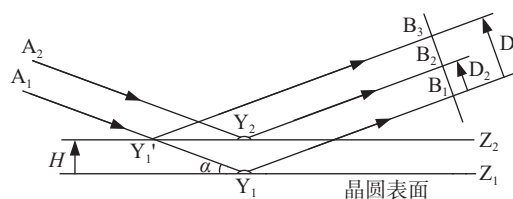


图 6 晶圆表面图案成像与光学光栅像位移不同步

Fig. 6 Displacement out of sync between the wafer surface pattern imaging with optical grating imaging

## 4 数字光栅的工艺适应性方法

### 4.1 图像光强的重建和光强曲线的还原

当待曝光的晶圆表面出现干扰图案时, 相机接收到的图像如图 7 所示(图 7 为示意图):



图 7 CMOS 像素阵列上接收到的光学光栅像

Fig. 7 The optical grating image on the CMOS pixel array

(图中的两个十字框起到标定和确定零位的作用)本文采取水平方向条带切割, 竖直方向以数字光栅周期为单位还原的方法。当晶圆表面出现

干扰图案时,相机接收到的图像就包含了这些图像的信息。该图像是晶圆表面图案沿光轴的投影的透过率函数与光学光栅像沿光轴的投影二者相乘的夫琅禾费衍射像。当这些携带晶圆表面图案的光栅像利用数字光栅的方法计算位移时,被晶圆表面图案调制后的光强分布会影响光强  $I$  曲线的值以及零点位置。

由于光学光栅条纹的方向是水平的,因此可以在水平方向进行光强的测量和修正。设线条区域的左侧和右侧水平方向像素坐标分别为  $k\_left$ 、 $k\_right$ , 上侧和下侧垂直方向像素坐标分别为  $k\_top$ 、 $k\_bottom$ , 先将光栅像线条区域沿着水平方向等份分割为  $M$  个条带,再设定数字光栅周期,将光栅像的线条区域沿垂直方向切割为  $N$  个周期。 $M$  和  $N$  代表具体的像素个数,都是整数,余数行列不参与计算。分割后的线条光栅像如图 8(图 8 为示意图):

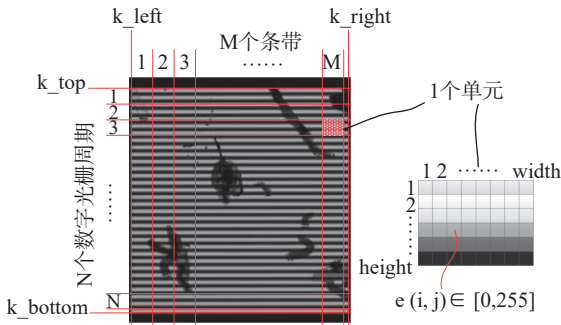


图 8 光栅像的分割

Fig. 8 Segmentation of grating image

为便于表述,将数字光栅周期划分线和条带划分线正交分割出的最小矩形单位称为一个“单元”(cell)。一个单元的宽和高分别为:

$$width = [k\_right - k\_left] / M, \quad (13)$$

$$height = [k\_bottom - k\_top] / N, \quad (14)$$

“ $[ ]$ ”表示向下取整。

一个单元内共有  $width \times height$  个像素,  $e(i, j)$  为该单元内第  $i$  行第  $j$  列像素的强度,范围是  $0 \sim 255$ , 则第  $n$  个数字光栅周期第  $m$  个条带的那个单元的累计光强可记作  $E(n, m)$ :

$$E(n, m) = \sum_{i=1}^{height} \sum_{j=1}^{width} e(i, j), \quad (15)$$

理想情况下,当照明均匀且光栅线条严格水平时,即可认为水平方向上一个数字光栅周期内,各个单元的像应该是相同的。所以一个数字光栅周期内每个单元的所有像素的累计光强总和是相等的。但由于标定前的光栅线条与 CMOS 存在极小的水平夹角,累计光强值将非水平而呈线性分布。当光栅像区域某一个单元出现额外的图案时,该单元的累计光强值就会减弱。系统可以根据一个数字光栅周期内的各单元累计光强的线性度进行干扰排除和光强的复原。进而提高工艺适应性。具体方法如下:

对于第  $i$  个数字光栅周期,上面的  $M$  个单元,在标定前,理想情况下的光强分布为线性。如图 9: 标定时,将光栅图像旋转  $\theta$ , 图像由倾斜变为水平。

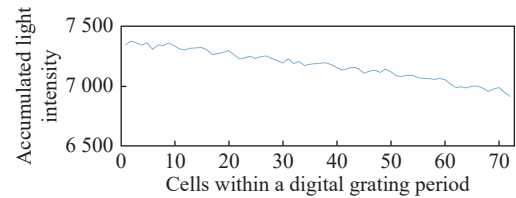


图 9 标定前的一个数字光栅周期内的累计光强

Fig. 9 The accumulated light intensity in one digital grating period before calibration

当该数字光栅周期的像素出现污渍图案时,由于反射的作用,这些图案的信息将影响成像,反应到像素上就是亮度的变化,如图 10 所示:

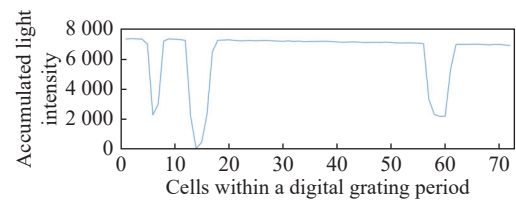


图 10 晶圆表面有图案时一个数字光栅周期内的累计光强

Fig. 10 The accumulated light intensity in one digital grating period when wafer surface pattern

在作光强复原时,利用预先标定得到的图像倾斜角  $\theta$ , 将图像反向旋转为水平,得到图 11:

设该周期的最大累计光强为  $E(i, \cdot)_{max}$ , 由于缺陷图案的反射率较低,且通常不具备干涉的条件。晶圆表面存在这些图案的区域,反射的光强必然低于洁净表面反射的光强。对每个数字光栅周期的  $M$  个累计光强值进行分布区间统计,取

25 为区间等分数(按需求而定)。在基底存在缺陷图案的情况下, 原本应集中的光强值会出现多个分布, 如图 12 所示, 把这 25 个区间按照频次值的高低依次排序: 从频次最高的区间判断, 如果这个区间的中心值 Bin Center 与  $E(i,;)_{\max}$  接近, 则认为该区间的累计光强是由洁净表面反射的正常光强, 且是正常光强中占比最大的光强区间, 如果与  $E(i,;)_{\max}$  相差较大, 则该区间不是异常区间, 进而判断下一个区间值。实验数据表明, 在一个数字光栅周期中, 洁净表面反射的累计光强值占比不低于 1/3 时, 结合频次和区间中心值判断, 都能准确筛选出正常的光强区间。

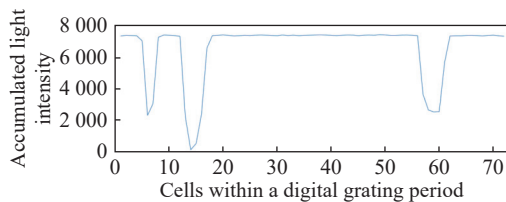


图 11 标定后的累计光强

Fig. 11 The accumulated light intensity after calibration

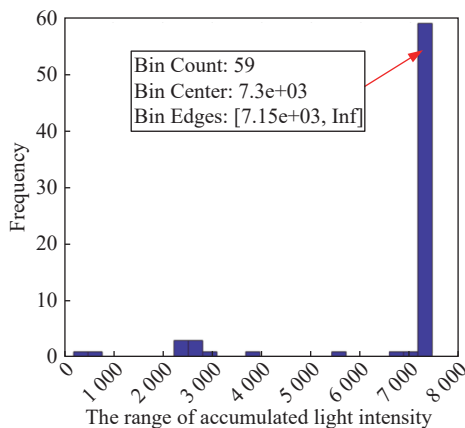


图 12 M 个累计光强值的分布区间统计

Fig. 12 Statistics of the distribution interval of M accumulated light intensity values

设定一个阈值, 在该周期内的单元的累计光强与选出的正常光强区间的 Bin Center 相差大于该阈值时, 则判定该单元的累计光强异常, 可以认为被基底的图案污染了。否则为正常的累计光强。此处设定的阈值为该数字光栅周期中最大累计光强值的 5%。将该单元的累计光强值用 Bin Center 值代替, 得到修正后的累计光强曲线(图 13):

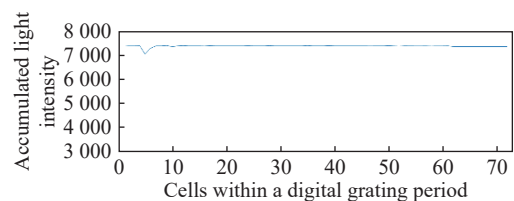


图 13 修正后的累计光强(一个数字光栅周期)

Fig. 13 Corrected accumulated light intensity curve (in one digital grating period)

可以根据工程需要, 设定不同的阈值, 也可以设定动态的阈值, 进行多次迭代。但当阈值过小时, 可能会出现过拟合。

下图为单次采样的修正方法的流程图。θ角可由洁净表面反射的光栅线条中的斜率计算得到。

将每个数字光栅周期进行如上操作后, 得到整个光栅像的修正后的光强分布。并根据数字光栅周期与像素值的对应关系, 将修正后的累计光强分布数据带入, 以像素值为横坐标绘制光强曲线(图 15), 并对比修正前的光强曲线和基底为光洁表面时的光强曲线, 三者对比, 不难看出, 修正后的光强曲线与理想情况下的光强曲线更为接近, 表现良好的还原度和抗干扰能力。



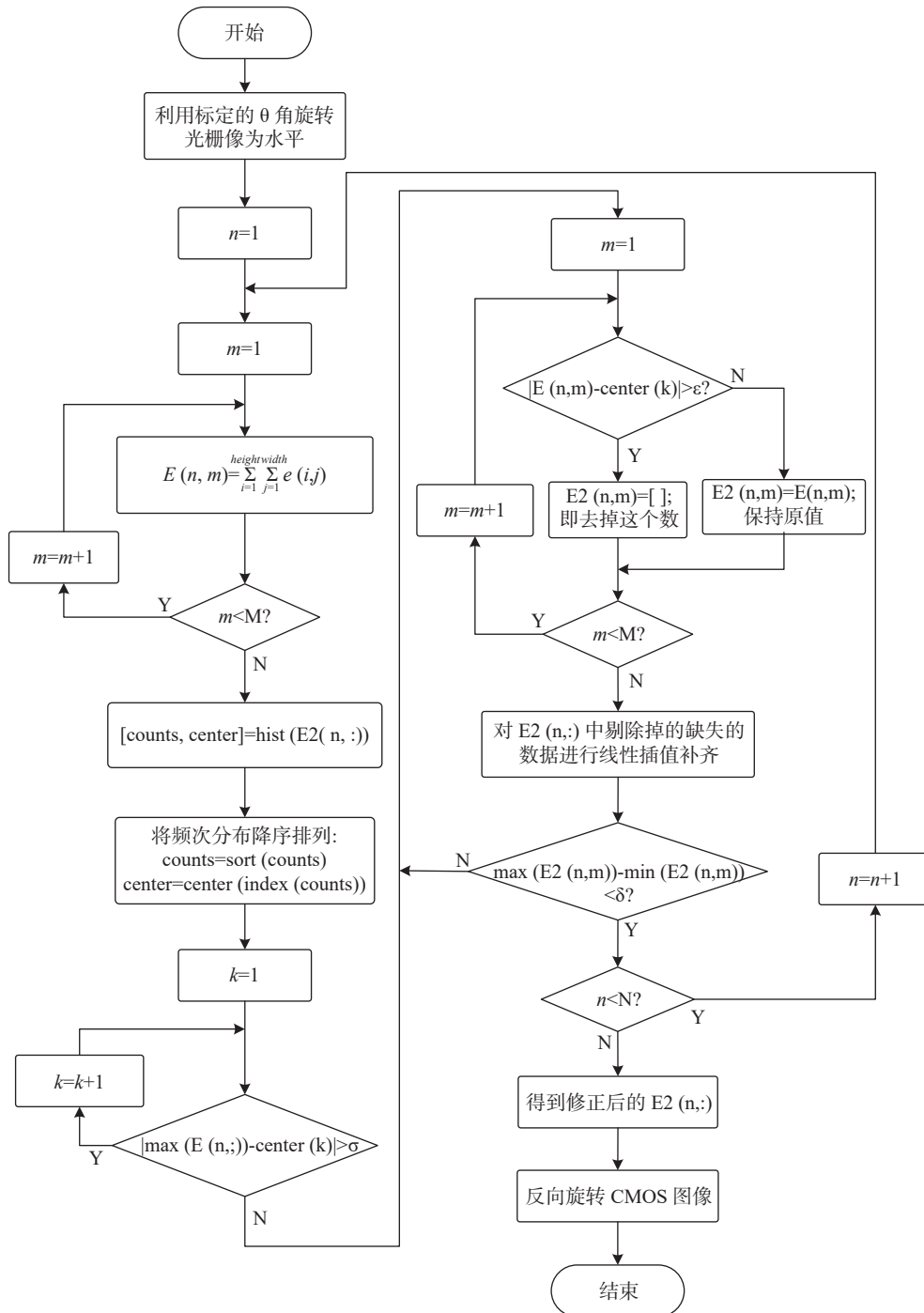


图 14 图像修正方法流程图

Fig. 14 Flowchart of the image correction method

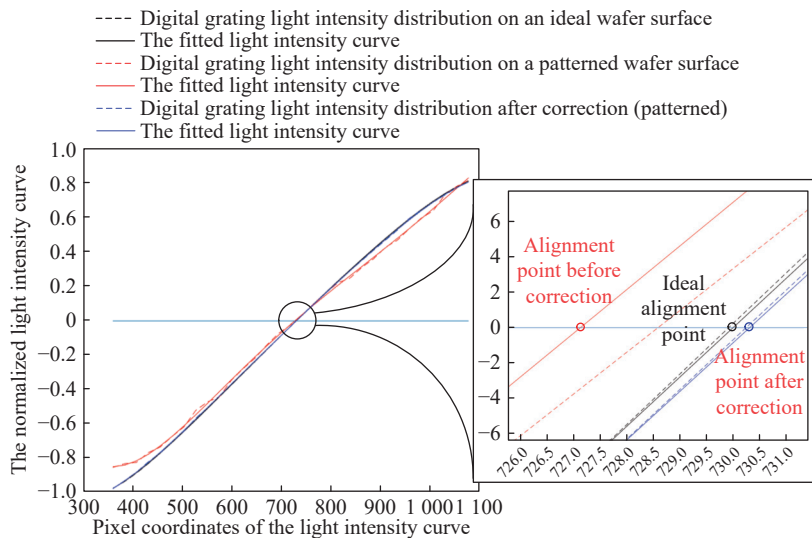


图 15 修正前后的光强曲线和对准点及其放大图

Fig. 15 Light intensity curves and alignment points before and after correction

### 4.2 不同基底图案的光强曲线还原

分别对晶圆表面有圆孔缺陷、工艺线条、划痕、颗粒时该方法的修正结果进行分析(图 16):

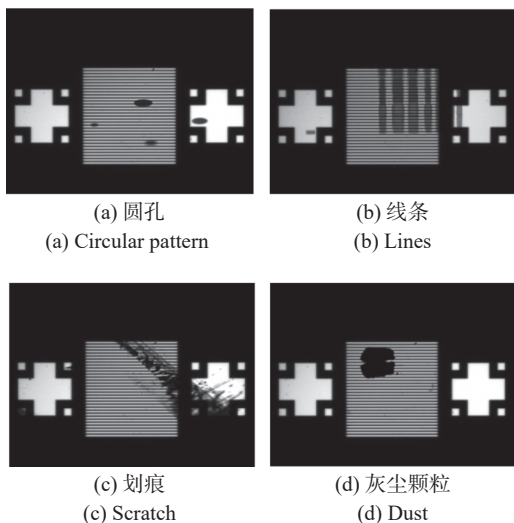


图 16 晶圆表面出现 4 种图案时对应的光学光栅像

Fig. 16 The corresponding optical grating image when 4 patterns appear on the wafer surface

当晶圆台在 Z 方向不同位置时, 以上 4 图中的光学光栅像和晶圆表面图案将出现不同步的变化。以图 17(a) 为例, a(1) 到 a(11) 分别表示当 Z 轴在 0 $\mu\text{m}$ 、4 $\mu\text{m}$ 、8 $\mu\text{m}$ 、.....、40 $\mu\text{m}$  等 11 个不同位置时, 待检测晶圆表面有圆形图案时, 其理想光强曲线和修正前后的光强曲线, 横坐标为 CMOS 的像素位置, 纵坐标为光强曲线的归一化光强值:

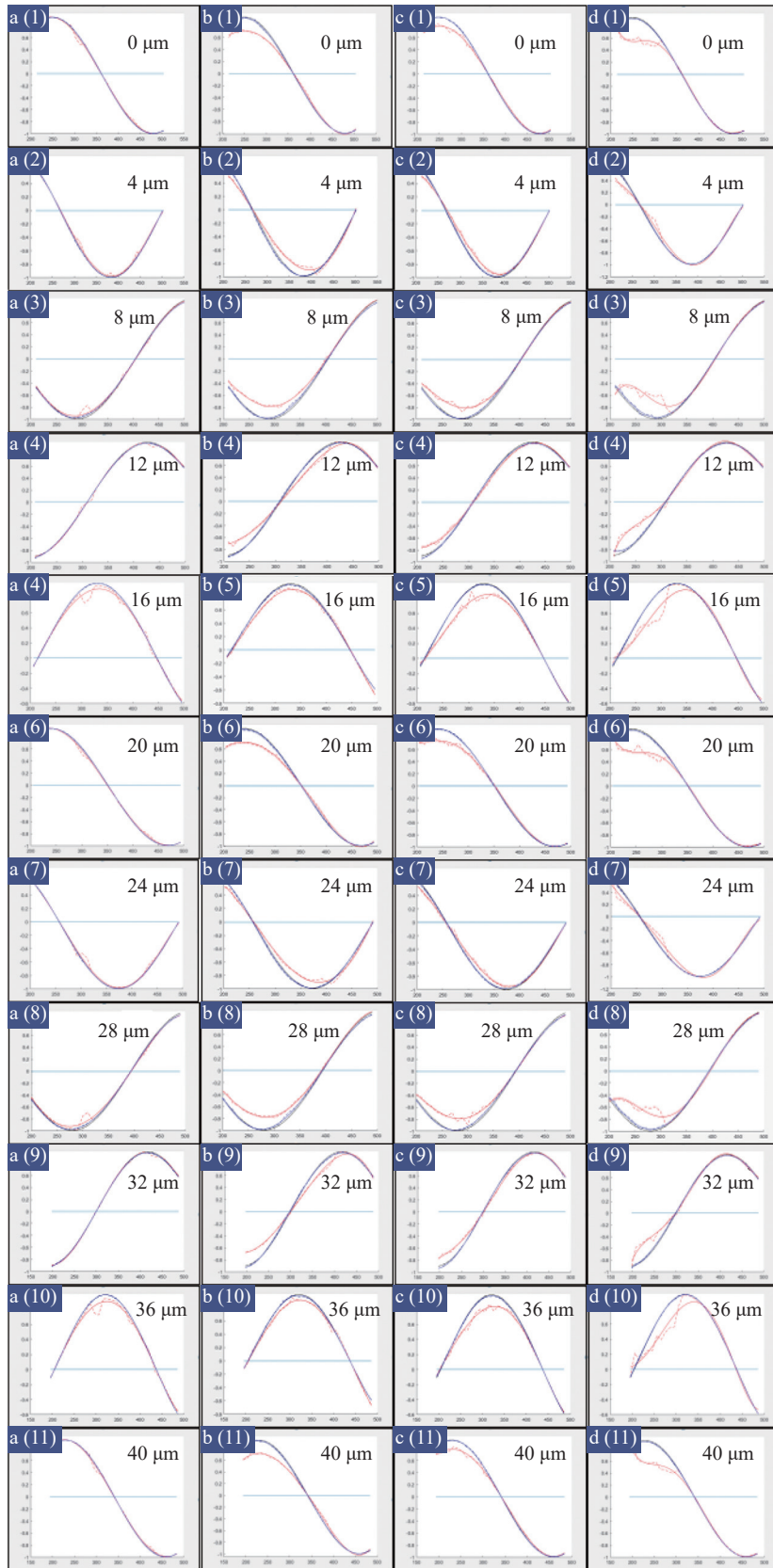


图 17 不同晶圆表面在 Z 轴在  $0\mu\text{m}$  到  $40\mu\text{m}$  不同位置对应的光强  $I$  曲线, 黑色为洁净表面时对应的光强曲线, 红色为表面存在图案时的光强曲线, 蓝色为修正后的光强曲线(a、b、c、d 分别代表圆孔、竖线、划痕和灰尘颗粒)

Fig. 17 The light intensity  $I$  curves for different wafer surfaces during the z-axis from  $0\mu\text{m}$  to  $40\mu\text{m}$ , while the black curves is the light intensity curve when the surface is clean, the red is the light intensity curve when the pattern exists on the

surface, and the blue is the corrected light intensity curve (a,b,c,d represent circular pattern, lines, scratches, and dust respectively)

以均方误差 MSE 来衡量曲线的整体偏差值。图 18 为晶圆表面携带 4 个图案在 Z 轴不同

位置的修正前的光强曲线拟合的均方误差(红线)以及修正后的光强曲线拟合的均方误差(蓝线):

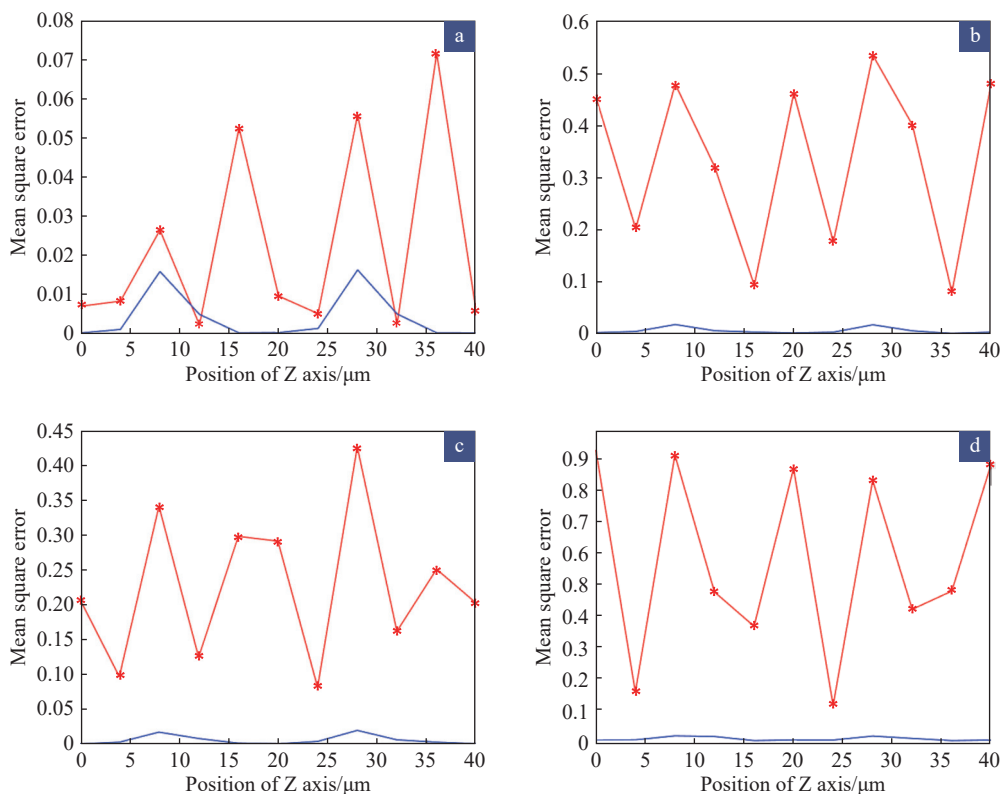


图 18 不同晶圆表面在 Z 轴不同位置对应的光强 I 曲线拟合的均方误差 ((a) 圆孔,(b) 线条,(c) 划痕,(d) 颗粒)

Fig. 18 Mean square error of fitting corresponding intensity  $I$  curves for different wafer surfaces during Z direction stepping ((a)circular pattern, (b) lines, (c)scratch, (d)dust)

4 种图案对应的光强 I 曲线,修正后的均方误差分别为修正前的 17.8%、2.2%、1.9%、2.5%。该算法的修正,能显著降低光强曲线的均方误差值,使得其累计光强曲线能更加接近理想镜面反射的累计光强曲线,进而提高位移测量的线性度和准确度。

## 5 实验验证

搭建基于数字光栅的调焦调平传感器测试平台:

在图 19 所示测试平台上,利用纳米位移台搭载一块 25\*25mm 方形硅片,选择一处有污渍的表面作为待测表面,做 Z 轴步进,从 0 $\mu$ m 步进到 40 $\mu$ m,采样间隔为 500nm,每次步进采样 50 次,

取这 50 次的对准点的均值。以此计算修正前与修正后的位移值。图 20 为步进前后 CMOS 接收到的光学光栅像。

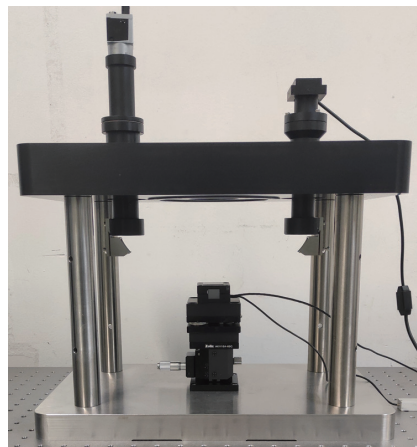


图 19 基于数字光栅的调焦调平传感器测试平台

Fig. 19 Testing platform of focusing and leveling sensor based on digital grating

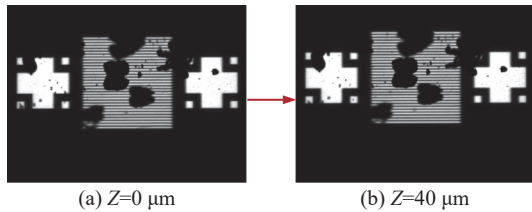


图 20 Z 轴步进前后的光学光栅像

Fig. 20 Optical grating images before and after Z-axis stepping

步进过程中的位移值如图 21 所示。对准点移动曲线和测量误差曲线如图 22 和图 23 所示: 图 22 是  $40\mu\text{m}$  步进过程中对准点的移动值, 图 23 是对准点对应的 Z 方向位移值误差, 单位  $\text{nm}$ 。可以看到, 在步进过程中, 当图片出现污渍时, 修正后的步进曲线比修正前更接近真实值, 修正前误差范围  $[-158.8\text{nm}, +214.5\text{nm}]$ , 平均误差绝对值为  $88.0\text{nm}$ ,  $\pm 3\sigma$  置信区间范围是  $\pm 298.3\text{nm}$ , 修正后的误差在  $\pm 33\text{nm}$  以内, 平均误差绝对值为  $11.2\text{nm}$ ,  $\pm 3\sigma$  置信区间范围是  $\pm 41.2\text{nm}$ , 且基底图形带来的误差的绝对量越大时, 该修正方法的效果越明显。利用该方法, 可以明显降低数字光栅位移测量出现的误差。

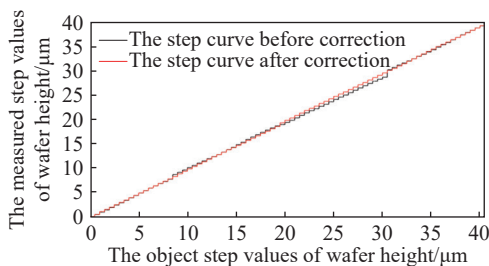


图 21 步进过程中数字光栅测量的位移值

Fig. 21 Displacement values measured by the digital grating during the step

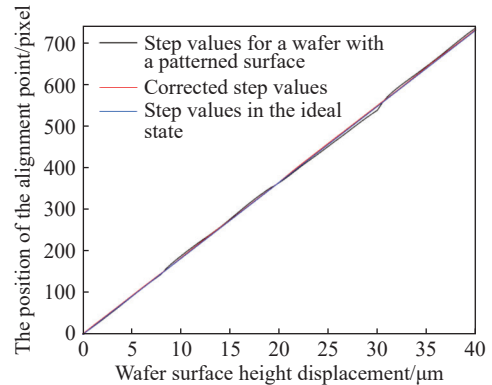


图 22 对准点的移动值

Fig. 22 The movement value of the alignment point

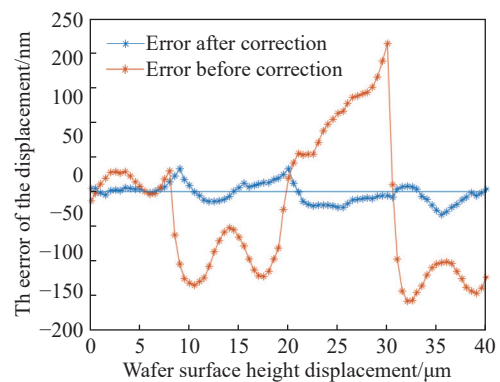


图 23 算法修正前后的误差值

Fig. 23 The error before and after correction of the algorithm

## 6 结 论

晶圆表面的缺陷图案, 会改变数字光栅调焦调平传感器接收端的光栅图像。使得光强曲线发生变化, 对准点出现偏差。当基底在 Z 方向存在起伏时, 基底图形所成的像与物方的光栅所成的像无法同步变化, 在运动过程中进一步造成拟合误差。本文的修正算法可以极好得重建光学光栅像的光强曲线, 在  $40\mu\text{m}$  步进的位移过程中, 将 Z 向位移的测量误差由  $[-158.8\text{nm}, +214.5\text{nm}]$  降低到  $\pm 33\text{nm}$ , 且在上述推导中, 并没有限制基底异物图案的形状和数量, 当每个数字光栅周期中, 洁净表面部分的成像的累计光强频次占比不低于  $1/3$ , 即可保持良好的修正效果。因此, 对于晶圆表面出现的污渍、颗粒, 划痕、沟槽等缺陷或图案, 都能有很好的适应能力。

参考文献:

- [1] 郭杰, 李世光, 赵焱, 等. 电子束硅片图形检测系统中的纳米级对焦控制技术[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 242-255.  
GUO J, LI SH G, ZHAO Y, *et al.*. Nano-scale focus control technology in electron beam wafer pattern inspection system[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 242-255. (in Chinese).
- [2] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.  
GAO X, LI SH H, MA Q L, *et al.*. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752. (in Chinese).
- [3] 李琛毅. 基于数字光栅的新型光栅尺的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 22-30.  
LI CH Y. *A novel optical encoder based on digital grating*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 22-30. (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认并核对出版信息](#)).
- [4] 钟志坚, 李琛毅, 李世光, 等. 先进光刻中的聚焦控制预算 (I)-光路部分[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1104-1119.  
ZHONG ZH J, LI CH Y, LI SH G, *et al.*. Budget analysis of focus control in advanced lithography (I) -optical path[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1104-1119. (in Chinese).
- [5] ASML Netherlands B. V. te Veldhoven. Level sensor and lithographic apparatus: NL, 2022732A [P]. 2019-10-16.
- [6] Canon Kabushiki Kaisha. Lithography apparatus, lithography method, and method of manufacturing article: US, 10488764B2 [P]. 2019-11-26.
- [7] 孙裕文, 李世光, 宗明成. 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0512002.  
SUN Y W, LI SH G, ZONG M CH. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0512002. (in Chinese).
- [8] 冯金花, 胡松, 李艳丽, 等. 基于叠栅条纹相位解析的纳米检焦方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212005.  
FENG J H, HU S, LI Y L, *et al.*. Nano focusing method based on moire fringe phase analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212005. (in Chinese).
- [9] 蓝科, 陈雪影, 刘道. 沟槽晶圆调焦调平测量工艺适应性分析[J]. *中国设备工程*, 2021(13): 125-127.  
LAN K, CHEN X Y, LIU X. Adaptability analysis of measurement technology of Groove Wafer focusing and leveling[J]. *China Plant Engineering*, 2021(13): 125-127. (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认](#)).
- [10] 郭磊. 数字光刻机中的三维位移测量系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022: 25-31.  
GUO L. *Three-dimensional displacement measurement system in digital lithographic system*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022: 25-31. (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认并核对出版信息](#)).
- [11] 苏绍璟. 大量程纳米级光栅位移测量理论及关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001: 37-43.  
SU SH J. *Research on theory and key technologies of long-range displacement measuring with nanometer resolution by grating*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001: 37-43. (in Chinese).
- [12] 邢丽冬, 潘双来. 信号与线性系统[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2020: 59-127.  
XING L D, PAN SH L. *Signal & Linear Systems*[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 59-127. (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认](#)).
- [13] LEVINSON H J. *Principles of Lithography*[M]. 3rd ed. Bellingham, USA: SPIE, 2010: 32-46.
- [14] 李小平, 陈飞彪. 投影光刻机硅片调焦调平测量模型[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1987-1991.  
LI X P, CHEN F B. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1987-1991. (in Chinese)