

文章编号: 0253-2239(2007)07-1205-6

一种步进扫描投影光刻机承片台不平度检测新技术 *

何 乐^{1,2} 王向朝¹ 王 帆¹ 施伟杰¹ 马明英^{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: 提出一种步进扫描投影光刻机承片台不平度检测新技术。在晶圆与承片台存在不同偏移量时, 利用线性差分传感器在线测量晶圆上不同点的局部高度; 通过建立临时边界条件, 以递推法消除晶圆面形影响, 并逐行计算出承片台的相对不平度; 通过逐行计算的结果递推相邻行之间的高度差, 并将该高度差叠加到每一行, 以消除临时边界条件的限制, 得到处于同一高度上的承片台不平度; 将计算的结果作为初始值, 根据最小二乘原理, 以邻近的四个测量点作为参考, 逐步逼近得到承片台的真实不平度。计算机仿真结果验证了该检测方法的正确性, 计算结果逐步收敛并逼近真实值。实验结果表明, 该方法的计算结果较好地表示了承片台的真实不平度, 重复精度优于 0.3 nm; 同时该方法也可用于晶圆表面面形的测量。

关键词: 测量与计量; 不平度检测; 承片台; 调平调焦; 最小二乘; 光刻机

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Novel in-Situ Non-Flatness Measurement Method of Wafer Chuck in Step-and-Scan Lithographic Tool

He Le^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Wang Fan¹ Shi Weijie¹ Ma Mingying^{1,2}

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

Abstract: A novel in-situ non-flatness measurement method of wafer chuck in step-and-scan projection lithographic tool is presented. The local heights of wafer surface are measured by the linear variable differential transformer (LVDTs) when the different offsets between wafer and wafer chuck exist. A temporary boundary condition is built to calculate the relative non-flatness of wafer chuck line by line and eliminate the effect of the wafer surface shape with recursion formula. The height difference of the neighboring columns is calculated with recursion formula, which is added to each row to remove the temporary boundary condition limitation and the coarse non-flatness of wafer chuck with the same height is determined. According to the coarse result, the four neighboring points of the measured point are used as reference to approach the accurate non-flatness of wafer chuck with the least square method. Computer simulation and experimental results prove that the calculated result accords with the real non-flatness of wafer chuck well, and the reproducibility by this method is better than 0.3 nm. The method is also valid for measurement of wafer surface shape.

Key words: measurement and metrology; non-flatness measurement; wafer chuck; leveling control; least square method; lithographic tool

1 引言

当前, 主流的光学光刻技术已经进入 100 nm 节

点, 关键尺寸(CD)的降低导致了光刻机套刻精度(Overlay)和焦深(DOF)的急剧紧缩。通常, 光刻机

* 国家自然科学基金(60578051)和国家 863 计划(2002AA4Z3000)资助课题。

作者简介: 何 乐(1978—), 男, 江苏镇江人, 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, 辽宁凌源人, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-11-08

的承片台利用其表面密布的真空吸附孔或静电吸附桩来支撑晶圆,由于吸附机构的细微差别,承片台的理论支撑面存在不平度^[1]。光刻机的承片台不平度对套刻精度具有显著影响,1 μm 的承片台不平度会导致 30~35 nm 的套刻畸变,该结果严重影响了光刻机的套刻性能^[2~4]。此外,焦深的急剧降低要求光刻机具备更高精度的调平调焦系统,而动态调平调焦的性能在很大程度上取决于所需补偿的晶圆表面垂向高度变化梯度^[5~7]。除利用更平整的晶圆外,一种有效的方法就是预先测量影响晶圆有效面形的各个组成部分,其中主要的一项就是对承片台不平度的检测^[8~10]。由于承片台不平度无法通过测量系统直接检测,目前的检测方法是通过测量并比较与承片台具有不同旋转角时超平晶圆表面的有效高度,并假设该晶圆为理想平面,通过建立线性方程组解出承片台不平度^[11,12]。受到计算机处理能力的限制,该方法很难通过解方程组来处理较多测量点,因此测量精度较低,且旋转晶圆会造成较大的定位误差,已很难满足低于 100 nm 光刻工艺的要求。因此本文提出一种步进扫描投影光刻机承片台不平度检测的新技术,它能较好地表示承片台的真实不平度。

2 测量原理

在步进扫描投影光刻机中,承片台是工件台系统的一部分。曝光过程中,承片台装载着晶圆在大理石基底上高速的运动。调平传感器和伺服器实时地测量并控制晶圆表面处于焦深范围内,线性差分传感器根据晶圆垂向位置变化测量出晶圆表面的高度^[13~15],如图 1 所示。在每一个位置上,测量得到的晶圆表面高度表示为

$$Z(x, y) = C(x, y) + W(x + sx, y + sy), \quad (1)$$

其中 C 为承片台不平度, W 为晶圆面形, sx sy , 分别

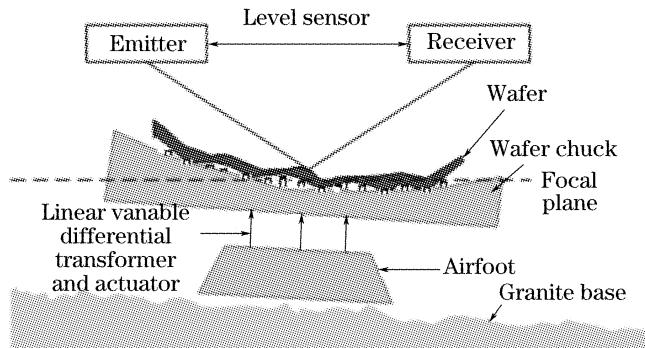


图 1 承片台运动架构示意图

Fig. 1 Architecture of wafer chuck in a lithographic tool

为晶圆与承片台在 x 和 y 方向上的位置偏移。将(1)式用序列的方式表示,得到

$$Z(i, j) = C(i, j) + W(i + si, j + sj), \quad (2)$$

其中 i, j 为每一次测量中,测量点的序号, si, sj 为晶圆与承片台的位置偏移。选择不同的 si, sj 进行测量,根据测量结果可利用矩阵运算得到承片台的不平度。由于承片台待测区域较大且精度要求较高,直接计算需要很多测量点。若选取 5000 个测量点,则需要处理的矩阵中双精度元素多达 $5000 \times (3 \times 5000)$ 个,对于一般计算机这是难以处理的。这里提出一种将测量数据分为两阶段处理的方法,先解出承片台形貌的粗略解,再以粗略解作为起始值,逼近得到精确的承片台表面不平度。

为了加强邻近点之间的耦合,采用了如图 2 所示的位置偏移关系。在位置 1 上,晶圆中心坐标与承片台中心坐标重合;在位置 2 上,晶圆沿 x 方向偏移了距离 d ;在位置 3 上,晶圆沿 x 方向偏移了距离 $d/2$,沿 y 方向偏移了 $(\sqrt{3}/2)d$ 。根据这个关系,采用了等距分布的测量点,其分布与扫描路径规划如图 3 所示,共选择了 $N \times M$ 个测量点,采用了光刻机惯用的 S 形曝光路径。

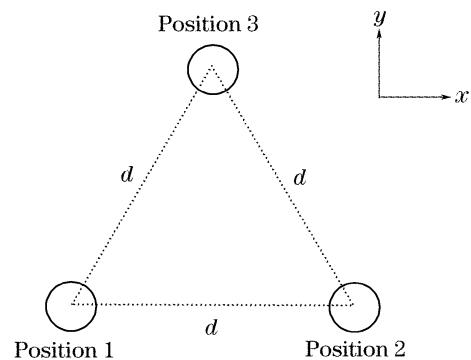


图 2 测量时偏移量的选择与关系

Fig. 2 Selection and relationship of offsets in different measurements

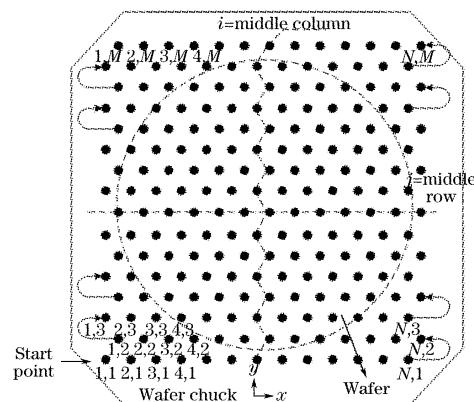


图 3 测量点的分布与扫描路径示意图

Fig. 3 Layout and scan routine of measurement points

分别在晶圆偏移为图 2 所示的位置 1,2,3 处测量得到 3 组结果

$$\begin{aligned} Z_1(i,j) &= C(i,j) + W(i,j), \\ Z_2(i,j) &= C(i,j) + W(i-1,j), \\ Z_3(i,j) &= \begin{cases} C(i,j) + W(i,j-1), & j \text{ 为奇数} \\ C(i,j) + W(i-1,j-1), & j \text{ 为偶数} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $i \in [1, N]$, $j \in [1, M]$ 。建立一个临时边界条件,选择中间列 m_c 作为基准,假设

$$C(m_c, j) = 0, \quad j \in [1, M], \quad (4)$$

由图 2 和图 3 表示的位置关系,根据测量结果 Z_1 和 Z_2 消去得到承片台每一行上邻近点之间的高度关系

$$\begin{aligned} C(i-1, j) &= Z_1(i-1, j) - Z_2(i, j) + C(i, j), \quad i \in [2, m_c] \\ C(i+1, j) &= Z_2(i+1, j) - Z_1(i, j) + C(i, j), \quad i \in [m_c, N-1] \end{aligned} \quad (5)$$

根据临时边界条件递推计算得到每一行上承片台的相对不平度。

同样以中间行 m_r 作为基准,利用测量结果 Z_1 和 Z_3 消去 W 得到邻近行之间的高度关系

$$\begin{aligned} C(i-1, j-1) &= Z_1(i-1, j-1) - Z_3(i, j) + C(i, j), \quad j \text{ 为奇数}, j \in [2, m_r] \\ C(i, j-1) &= Z_1(i, j-1) - Z_3(i, j) + C(i, j), \quad j \text{ 为偶数}, j \in [2, m_r] \\ C(i, j+1) &= Z_3(i, j+1) - Z_1(i, j) + C(i, j), \quad j \text{ 为奇数}, j \in [m_r, M] \\ C(i, j+1) &= Z_3(i, j+1) - Z_1(i-1, j) + C(i-1, j), \quad j \text{ 为偶数}, j \in [m_r, M] \end{aligned} \quad (6)$$

根据(5)式的计算结果,递推计算得到每一个测量点上承片台的相对不平度。

由(5)式和(6)式计算出了两组基于(4)式的承片台不平度,这两组结果的差值反映了邻近行之间的高度差,将此高度差累加到(5)式计算结果的每一行上,就得到了假设条件 $C(m_c, m_r) = 0$ 下承片台的粗略不平度

$$\delta = \sum_{j=m_r}^J \left\langle \sum_{i=1}^N [C'(i, j) - C(i, j)] \right\rangle, \quad (7)$$

$$C_{\text{gross}}(i, J) = C(i, J) + \delta,$$

其中 $C(i, j)$ 为由(5)式计算的结果, $C'(i, j)$ 为由(6)式计算的结果, 函数 $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均值, J 为除首行、中间行和末行外的所有行。(7)式的计算结果中去除了(4)式假设临时边界条件,理论上与承片台的真实不平度只相差一个常平面的叠加。

将粗略不平度作为结果寻优的起始值,建立精确值逼近算法。其基本原理是参考最小二乘法则,通过尽可能多的邻近点作为参考值,逼近当前点的精确值^[16]。如图 4 所示,每一个测量点有上下左右四个邻近点,根据(3)式将测量值写为

$$\begin{bmatrix} Z \\ Z_{2r} - C_r \\ Z_2 - W_l \\ Z_{3t} - C_t \\ Z_3 - W_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中,下标 t, b, l, r 分别为测量点的上下左右四个

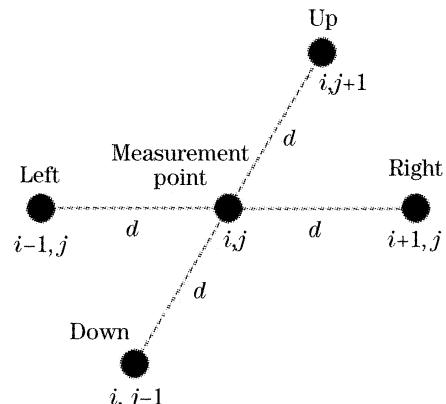


图 4 测量点的邻近点定义

Fig. 4 Neighboring points layout of measurement point
邻近点。对四个邻近点的有效性进行判断,判断依据是该点是否在调平传感器的有效测量范围内。当邻近点无效时,需要修改邻近点参考因子矩阵 \mathbf{P} ,使该邻近点的参考作用为零,如

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \times R \\ 1 \times L & 0 \\ 0 & 1 \times T \\ 1 \times B & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 T, B, L, R 分别为上下左右四个邻近点的有效因子,当该点有效时因子为 1,无效时为 0。对(8)式求解,得到承片台不平度计算结果

$$\begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix} = (\mathbf{P}^T \times \mathbf{P})^{-1} \times \mathbf{P}^T \times z. \quad (10)$$

该计算结果表示一次搜索的逼近值,仍然受到邻近点不可靠性的影响。因此参照最小二乘原理,采用迭代寻优算法进行重复搜索,以每一次的计算结果作为下一次计算的起始值,直至计算结果满足收敛条件:测量残差的标准差小于设定值。至此,计算得到了精确的承片台形貌,同时也得到了用于测量的晶圆表面形貌。

3 计算机仿真

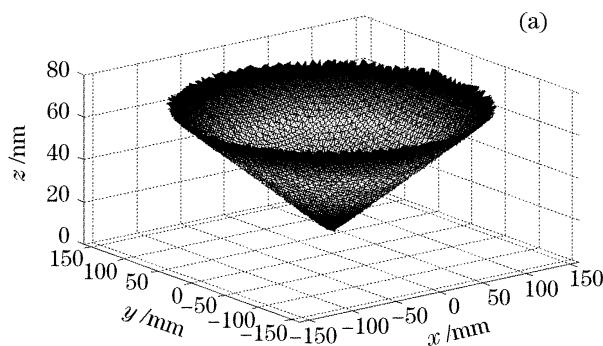
使用计算机仿真对本方法进行评估,其优点在于事先知道真实的数据。采用局部有起伏的锥形面模拟承片台不平度 C_{sim} 和晶圆面形 W_{sim} :

$$\begin{aligned} C_{\text{sim}}(x, y) &= A_1 \sqrt{x^2 + y^2} + \\ &\quad B_1 \cos(l_1 x) \cos(m_1 y), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{sim}}(x, y) &= A_2 \sqrt{x^2 + y^2} + \\ &\quad B_2 \cos(l_2 x) \cos(m_2 y), \end{aligned}$$

其中 $A_1, A_2, B_1, B_2, l_1, l_2, m_1, m_2$ 均为预设的常数。根据(3)式得到

$$Z(x, y) = E_{\text{sim}}(x, y) + W_{\text{sim}}(x + sx, y + sy) + E, \quad (12)$$



其中 E 为测量系统的随机误差。

仿真计算在 SUN Blade 150 工作站上运用 MATLAB 进行。图 5(a)为锥形曲面的模拟承片台面形,其上存在局部起伏,图 5(b)为模拟的晶圆片不平度分布。图 6(a)给出了计算结果所表示的不平度,其中图 6(a)为计算得到的承片台面形,与图 5(a)中模拟面形相似;图 6(b)为计算得到的晶圆片不平度分布。图 7(a)给出了计算结果的残差分布与计算过程中残差的标准差变化趋势,其中最大的残差为 1.0401 nm,250 次迭代后残差的标准差为 0.4434 nm。残差分布在边缘区域与真实数据相差较多,这是由于在边缘区域需要舍弃一些数据。在迭代过程中,残差趋向收敛。图 8 给出了在不同的模拟晶圆片面形下,设定逼近 500 次迭代时,计算结果标准差的柱状图。仿真结果表明,本方法的计算结果逐步收敛并逼近真实值,在较少的迭代次数下,能够消除晶圆片面形对测量结果的影响,达到测量残差的标准差优于 0.60 nm,同时也有效地避免了计算机性能造成计算能力的限制。

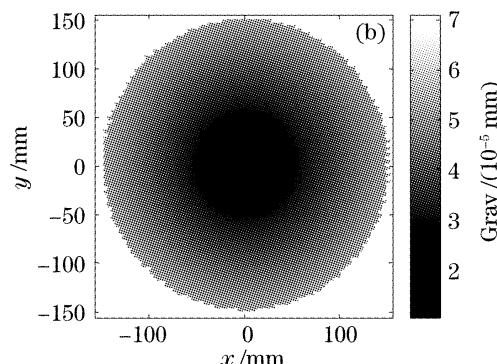


图 5 模拟的承片台(a)和晶圆片(b)不平度示意图

Fig. 5 Non-flatness of the simulated wafer chuck (a) and wafer (b)

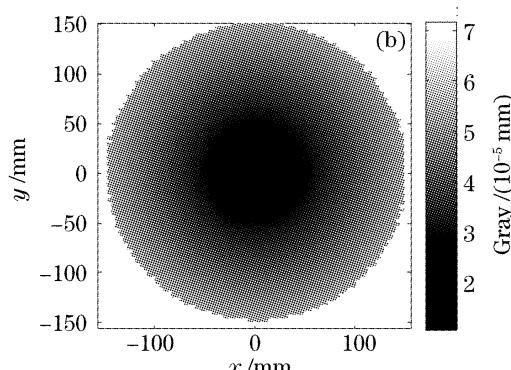
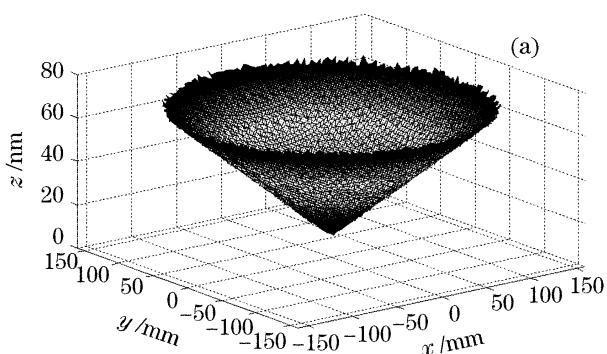


图 6 计算得到的承片台(a)和晶圆片(b)不平度示意图

Fig. 6 Calculated non-flatness of simulated wafer chuck (a) and wafer (b)

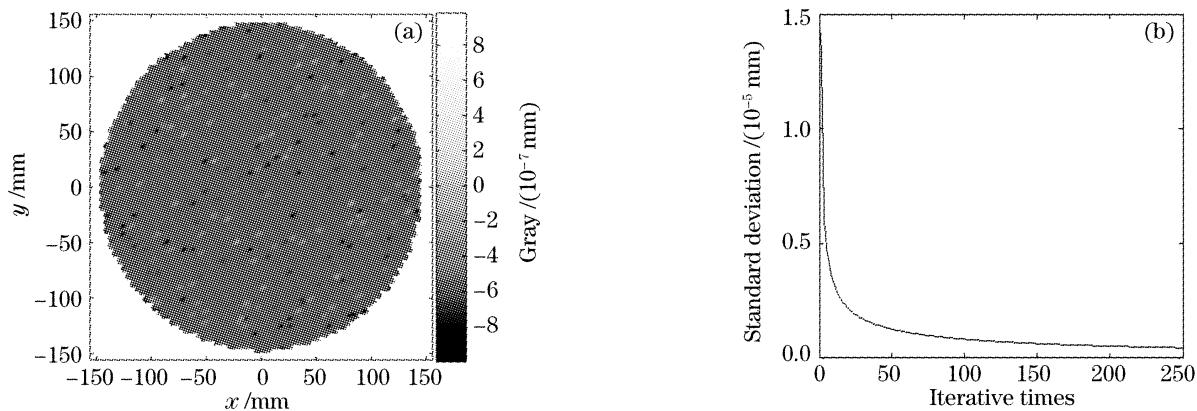


图 7 计算结果的残差分布(a)与迭代过程中的残差标准差变化趋势(b)

Fig. 7 Layout of the residual error (a) and the standard deviation value changing trend (b) in the iterative process

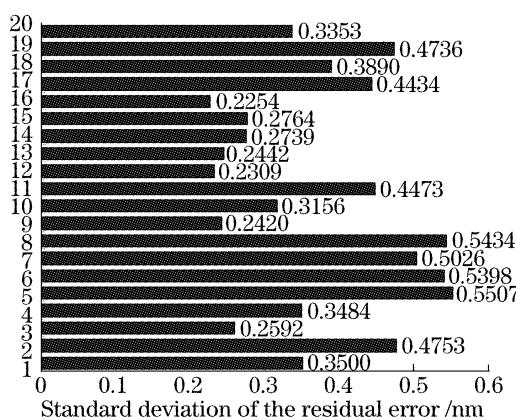
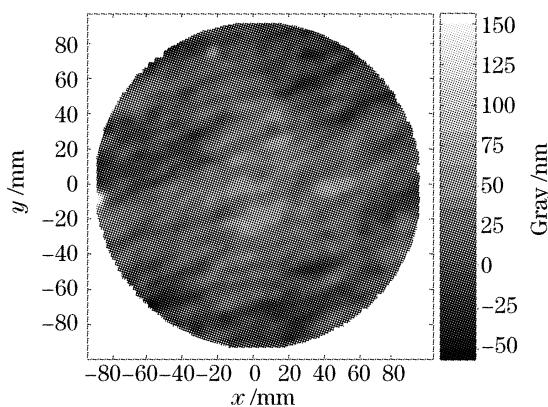


图 8 承片台不平度计算结果中残差的标准差

Fig. 8 Standard deviation values of residual error during the calculation of wafer chuck non-flatness



4 实验分析

在专用的工件台实验平台上进行实验,晶圆的直径为 200 mm。采用逐点步进调平并测量的策略进行数据采集,共选取了 \$79 \times 91\$ 个测量点。采用图 2 所示的偏移关系,其中 \$x\$ 方向的偏移量设定为 2.82 mm, \$y\$ 方向的偏移量设定为 2.44 mm。设定测量残差的标准差小于 0.30 nm 为收敛条件。图 9(a)给出了计算得到的承片台不平度和计算过程中残差的标准差变化趋势,在边缘位置,由于调平性能的降低以及不可避免的数据舍弃,残差相对较大。迭代 71 次时,达到设定残差的标准差 0.30 nm。图 10 给出了使用 10 片不同品质的晶圆在同一个实验平台上进行同样实验得到的迭代次数比对。

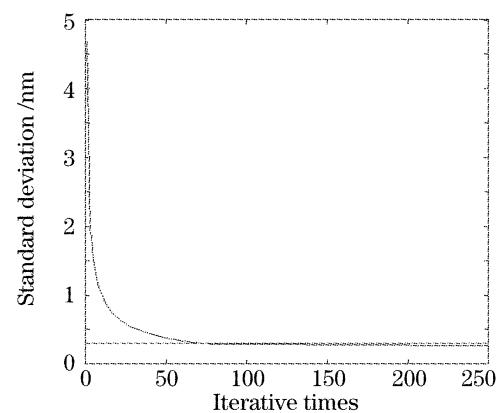


图 9 实验得到的承片台不平度(a)与计算过程中残差的标准差变化趋势(b)

Fig. 9 (a) Calculated non-flatness of the experimental wafer chuck and (b) the standard deviation value changing trend in the iterative process

实验结果与计算机仿真结果类似,检测结果有效地避免了晶圆面形的影响,较好地反映了承片台表面的不平度。计算结果逐步收敛,在较少的迭代次数下能够得到理想的测量结果,该方法的重复精度优于 0.3 nm。

由于实验条件的限制,无法实现在同步扫描模

式下对测量数据的采集。考虑到采用同一种模式对测量数据进行处理,因此只要测量数据保持正确,就能够得到较好的计算结果。使用线性差分传感器(LVDT)测量晶圆面高度,其优点在线性差分传感器测量的是相对位置变化,因此能够消除诸如工件台大理石基底不平整的影响^[17]。由于调平调焦

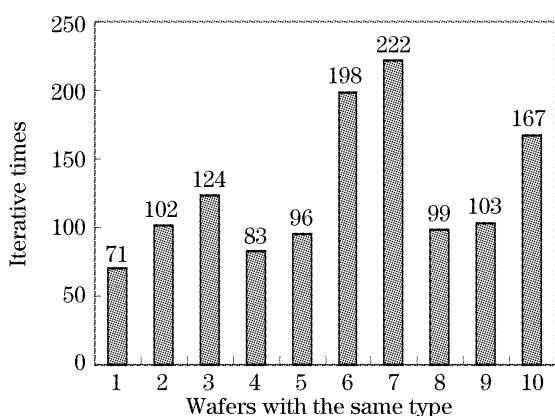


图 10 利用不同晶圆进行同一实验所用的迭代次数列表

Fig. 10 List of the iterative times in the same experiment process of calculating wafer chuck non-flatness with 10 different wafers

系统对晶圆面的调整会在焦深范围内波动,会造成线性差分传感器的测量误差,因此该方法的计算结果也取决于光刻机调平调焦系统的性能。使用该方法也计算得到了晶圆的表面面形,由于晶圆的面形是作为一种叠加量进行处理,因此得到的结果是晶圆上下表面形貌叠加的结果,具有一定的局限性。

5 结 论

本文提出的一种新的步进扫描投影光刻机承片台不平度检测技术。利用线性差分传感器配合调平调焦系统测量晶圆表面高度,建立起晶圆与承片台存在不同偏移时测量高度的表达式,先假设临时边界条件,分别在行和列上进行递推,并利用差分法消除晶圆面形影响和临时边界条件,得到处于同一平面高度上承片台的粗略不平度,再以此结果作为初值,利用最小二乘原理,以邻近的四个测量点作为参考,逐步逼近得到承片台的真实不平度。计算机仿真结果验证了该检测方法的正确性,计算结果逐步收敛并逼近真实值;实验结果表明,该方法的计算结果较好地反映出了承片台的真实不平度,重复精度优于 0.3 nm;同时该方法也计算得到了用于测量的晶圆表面粗略面形。

参 考 文 献

- 1 David J. Elliott, George D. Whitten. Vacuum chuck [P]. US6032997, 1998.04.16
- 2 K. Simson, H.-U. Scheunemann, H.-L. Huber. Impact of chuck flatness on wafer distortion and stepper overlay[C]. Proc. SPIE, 1993, **1924**: 282~292
- 3 T. Fujisawa, S. Inoue, T. Hagiwara et al.. Desirable edge flatness for CD control in photolithography[C]. Proc. SPIE, 2003, **5040**: 600~609
- 4 M.-R. Moitreyee, C. H. Tan, Y. K. Tan. Exposure tool chuck flatness study and effects on lithography[C]. Proc. SPIE, 2001, **4404**: 14~24
- 5 Intaru Fujita, Fumio M. Sakai, Shigeyuki Uzawa. Next-generation scanner to sub-100-nm lithography[C]. Proc. SPIE, 2003, **5040**: 811~821
- 6 Butler Hans, Boonman Marcus, Emile Joannes et al.. Lithographic apparatus and device manufacturing method with feed-forward focus control[P]. US7113256, 2004.02.18
- 7 Randy Goodall, Frances Alvarez. Characterization of stepper chuck performance[C]. Proc. SPIE, 1993, **1926**: 282~292
- 8 Bruno M. La Fontaine, Jan Hauschild, Mircea V. Dusa et al.. Study of the influence of substrate topography on the focusing performance of advanced lithography scanners[C]. Proc. SPIE, 2003, **5040**: 570~581
- 9 Adlai H. Smith, Jr. Hunter, O. Robert et al.. Apparatus and process for determination of dynamic scan field curvature[P]. US7126668, 2004.04.28
- 10 Michael L. Nelson, Justin L. Kreuzer, Peter L. Filosi et al.. Method and system for improving focus accuracy in a lithographic system[P]. US6859260, 2001.08
- 11 R. Goodall, J. Kawski. Effects and interactions of wafer shape and stepper chucks on wafer flatness control[C]. Proceedings, IEEE/SEMI, ASMC, 1993. 118~123
- 12 G. Schulz. Absolute flatness testing by an extended rotation method using two angles of rotation[J]. Appl. Opt., 1993, **32**(7): 1055~1065
- 13 Dong-June Choi, Chun-Taek Rim, Soohyun Kim. High sensitivity inductive sensing system for position measurement [C]. Proc. IEEE IMTC, 2000. 595~599
- 14 Gao Bilie. The mathematical analysis for the active lap deformation on proceeding condition [J]. Acta Optica Sinica, 2005, **25**(4): 525~532 (in Chinese)
- 15 Zeng Aijun, Wang Xiangzhao, Xu Deyan. Progress in focus and level sensor for projection lithography system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, **41**(7): 24~30 (in Chinese)
- 16 Xu Dong, Xia Liangzheng, Yang Shizhou. Using curved surface approximation to reconstruct 3-D shape from shading[J]. Acta Optica Sinica, 2002, **22**(5): 552~555 (in Chinese)
- 17 Le He, Xiangzhao Wang, Weijie Shi et al.. Method for measuring the granite surface topography of wafer stage with laser interferometer[C]. Proc. SPIE, 2006, **6150**: 512~518