

光刻机硅片表面不平度原位检测技术*

张冬青^{1,2} 王向朝¹ 施伟杰¹

(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 随着光刻特征尺寸的不断减小, 硅片表面不平度对光刻性能的影响越来越显著. 该文提出了一种新的硅片表面不平度的原位检测技术. 本文在分析特殊测试标记成像规律的基础上, 讨论了测试标记的对准位置偏移量与硅片表面起伏高度的变化规律, 提出了一种新的硅片表面不平度原位检测技术. 实验表明, 该技术可实现硅片表面不平度及硅片表面形貌的高准确度原位测量. 该技术考虑了光刻机承片台吸附力的非均匀性对硅片表面不平度的影响, 更真实反映曝光工作状态下的硅片表面不平度大小. 与现有的原位检测方法相比, 硅片表面不平度的测量空间分辨率提高了 1.67% 倍, 可实现硅片表面形貌的原位检测.

关键词 硅片表面不平度; FOCAL 技术; 光刻机; 原位检测

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

0 引言

在半导体芯片制造的光刻过程中, 为了保证在硅片上曝出最佳图形, 光刻机通过一系列像面检测与校正技术将涂胶硅片置于最佳焦面处^[1]. 由于硅片表面的不平整性, 硅片上的某些区域会偏离最佳焦面, 造成该区域曝光图形的失真. 因此, 硅片表面不平度 (Wafer Flatness, WF) 是光刻工艺的关键参量之一^[2], 需要对其进行高准确度检测.

常用的硅片表面不平度检测技术是采用离线的方式^[3], 通过专用的面形检测仪器来实现, 如 Nikon 的 NIWF-300 检测仪. 由于曝光过程中硅片被牢牢吸附在承片台上, 高强度的吸附力致使硅片产生形变, 从而改变硅片表面不平度的大小. 这种改变在硅片表面不平度离线检测仪器上是无法预见的, 需要通过硅片表面不平度原位检测技术来确定.

国际上通常利用光刻机调焦调平传感器 (Level sensor)^[4] 对硅片表面不平度进行原位检测. 这种方法的测量光斑尺寸较大, 仅能获得硅片的平均高度, 无法检测硅片曝光场内微细区域的高度差别. 随着光刻特征尺寸的逐渐减小, 光刻机投影物镜的焦深逐渐变小, 光刻工艺受硅片微细区域高度差别的影响增大, 需要一种能够检测硅片微细区域不平度的原位检测技术.

为了解决上述问题, 本文在 FOCAL 技术^[5,6] 的基础上提出了一种新的高准确度硅片表面不平度原位检测技术, 以下简称为 WFMFT (Wafer Flatness

Measurement using FOCAL Technique) 技术. 与现有的利用调焦调平传感器的原位检测方法相比, 硅片表面不平度的测量空间分辨率可提高 67% 倍, 可检测硅片微细区域的高度差异, 实现硅片表面形貌的原位检测.

1 基本原理

在对硅片表面不平度进行原位检测时, 硅片表面不平度 WF 可用硅片表面上的点到最佳焦面之间的沿平行于投影物镜光轴的最大距离来表示, 如图 1.

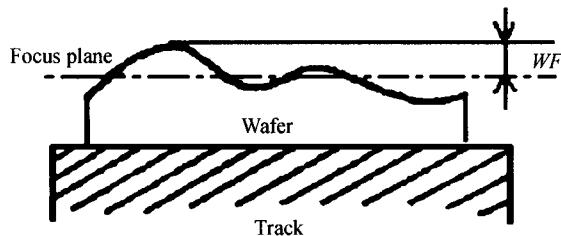


图 1 置于光刻机真空吸盘上的硅片
Fig. 1 A wafer on vacuum chuck of a scanner

本文提出的 WFMFT 技术是一种通过检测被曝光硅片上的图形位置偏差来确定硅片表面不平度的原位检测技术. WFMFT 技术所采用的测试掩模是包含一系列 FOCAL 标记的 FOCAL 掩模^[7]. 与线空比 1:1 的光栅结构不同, FOCAL 标记的一个光栅周期内包含线宽更窄的密集线条, 这部分密集线条称为 FOCAL 标记的精细结构, 如图 2.

WFMFT 技术包括测试准备、被测硅片曝光、硅片显影、对准读数与硅片表面不平度计算等五个过程. 在光刻机最佳工作状态下, 采用 FOCAL 最佳曝光剂量^[8] 将 FOCAL 标记图形转移到涂有光刻

* 国家 863 计划 (2002AA4Z3000) 资助

Tel: 021-69918689 Email: wxz26267@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-08-23

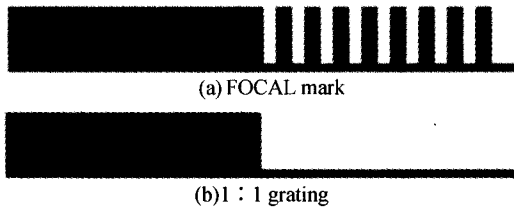


图2 FOCAL 标记与线空 1:1 光栅结构
Fig. 2 FOCAL mark and 1:1 grating

胶的硅片上. 由于硅片表面不同位置处光刻胶的厚度偏差仅为几个纳米, 而硅片表面不平度在 $0.1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 之间, 因此在硅片表面不平度测试中, 光刻胶厚度的非均匀性可忽略不计. 若硅片表面是一理想平面, 则硅片上每一点都处于最佳焦面上, 各点的曝光图形线宽相同. 若硅片表面具有高度起伏, 硅片的不同区域会处于不同的离焦面上, 显影后 FOCAL 标记图形的密集线条具有不同的线宽. 对于近似理想成像系统, 密集线条的线宽与硅片表面起伏高度的关系^[9]可写为

$$Lw_{\Delta f} \approx P - \left[2 \cdot \Delta h \cdot \tan \frac{\theta}{2} + \frac{Lw_0}{R} \right] \quad (1)$$

式中 $Lw_{\Delta f}$ 表示在某硅片表面起伏高度 Δh 下的 FOCAL 标记的密集线条线宽; P 为 FOCAL 精细结构的栅距; 为 θ 光刻机投影物镜的像方孔径角; LW_0 为掩模上 FOCAL 标记的密集线条线宽; R 为光刻机投影物镜的放大倍率. 利用 PROLITH^[10] 光刻仿真软件模拟 248 nm 曝光波长下的 FOCAL 密集线条线宽与硅片表面起伏高度的变化关系曲线, 如图 3. 由式(1)与图 3 均可看出, FOCAL 密集线条线宽随着硅片表面起伏高度的增大而减小.

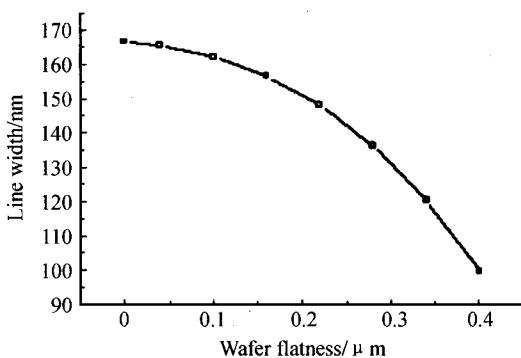


图3 PROLITH 仿真得到的线宽与硅片表面起伏高度的关系曲线
Fig. 3 Linewidth versus wafer flatness

硅片显影后, 由光刻机的光学对准系统^[11]对曝光在硅片上的 FOCAL 标记图形进行对准, 记录下曝光视场不同位置处 FOCAL 标记的对准位置坐标. 由于光栅精细结构的存在, 硅片上标记反射光强的空间分布随着密集线条线宽的大小而改变, 因此反射光强达到极值所对应的标记位置产生偏移. 该标

记位置通过对准系统记录下来, 它相对于 FOCAL 标记中心基准点的位置偏移量称为 FOCAL 对准偏移量 (Alignment Offset, AO). FOCAL 对准偏移量与密集线条线宽的关系^[12]为

$$AO = F(Lw_{\Delta f}) = \frac{1}{2\pi f} \tan^{-1} \left\{ \frac{\exp(j2kd)}{\exp(j2kd)} \cdot \rightarrow \frac{(1 - \cos(\omega a) + 2 \sum_{m=1}^M \sin Br \cdot \sin C) + (\sin(\omega a) + 2 \sum_{m=1}^M \sin Br \cdot \cos C) + \frac{2 \sum_{m=1}^M \sin B \cdot \sin C + \cos(\omega c) - 1}{2 \sum_{m=1}^M \sin B \cdot \cos C + \sin(\omega c)}}{2 \sum_{m=1}^M \sin B \cdot \cos C + \sin(\omega c)} \right\} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= a + \frac{Lw_{\Delta f}}{M} \left[m - \frac{r}{2(1+r)} \right] \\ B &= \frac{\pi f Lw_{\Delta f}}{M(1+r)} \\ C &= 2\pi f a + 2\pi f \frac{Lw_{\Delta f}}{2M} \left[2m - 1 - \frac{r}{(1+r)} \right] \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda}, \omega = \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, a 为主光栅的线宽, c 为主光栅的缝宽, d 为光栅刻槽深度, r 为精细结构的占空比, M 为精细结构的周期数, λ 为光刻机对准系统的工作波长, T 为主光栅周期.

由式(1)~(3)可以得出硅片表面起伏高度与 FOCAL 标记对准偏移量的理论关系表达式

$$\Delta h = g(AO) = \frac{P \cdot R - Lw_0 - R \cdot F^{-1}(AO)}{2R \cdot \tan \left[\frac{\theta}{2} \right]} \quad (4)$$

式中, $F^{-1}()$ 表示 $F()$ 的逆函数. 可以看出硅片表面起伏高度与对准偏移量满足一一对应关系. 将对准系统得到的硅片不同位置的 FOCAL 标记对准位置偏移量代入式(4)可计算出硅片各点的起伏高度.

在利用 WFMFT 技术进行硅片表面不平度测试时, 照明方式、投影物镜成像性能、后烘、显影等因素都会对硅片表面起伏高度与对准偏移量的变化关系产生影响. 为了解决这个问题, WFMFT 技术通过 WF~AO (Wafer Flatness versus AO) 测试来确定硅片表面起伏高度与对准偏移量的变化关系. WF~AO 测试仅在 WFMFT 测试条件改变时进行, 得到新的硅片表面起伏高度与对准偏移量的变化关系, 在 WFMFT 测试的准备步骤中完成, 如图 4.

WF~AO 测试包括标记曝光、硅片显影、对准读数与曲线拟合等四个过程. 采用表面不平度可忽略不计的超平硅片, 在已知的不同离焦量下将 FOCAL 标记曝光在涂胶超平硅片上. 显影后, 利

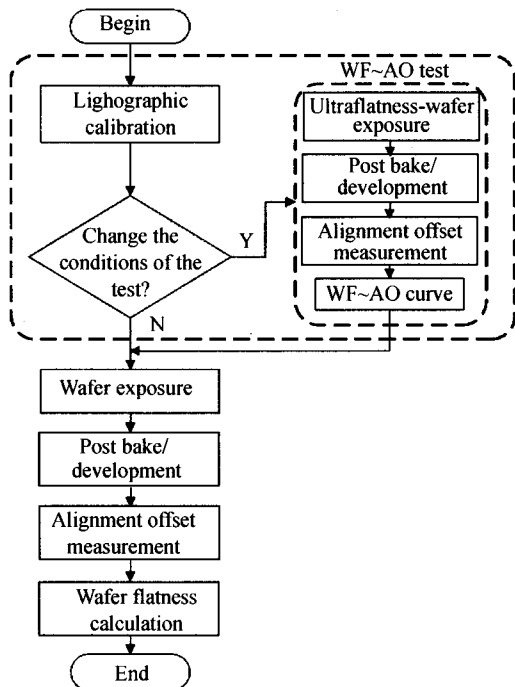


图 4 WFMFT 测试过程
Fig. 4 Flow chart of WFMFT test

用光刻机对准系统检测 FOCAL 标记的对准偏移量,得到一系列表征不同离焦量所对应的对准偏移量的数据点. 通过曲线拟合,得到对准偏移量与离焦量的关系曲线 g ,如图 5. 在对被测硅片进行测试时,离焦量是由被测硅片的高度起伏引起的,因此曲

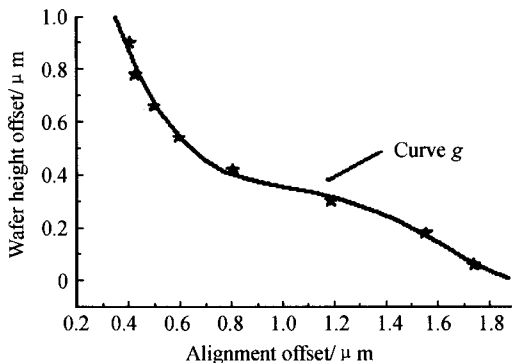


图 5 硅片表面起伏高度与对准偏移量关系的基准曲线
Fig. 5 Wafer height offset versus alignment offset

线 g 可看作为硅片表面起伏高度与对准偏移量关系的基准曲线,即 WF~AO 基准曲线. 基准曲线 g 的表达式可写为

$$\Delta h = g'(AO) \quad (5)$$

将被测硅片的 FOCAL 标记对准位置偏移量代入式(5)可计算出硅片各点的起伏高度. 取各点高度起伏的最大值就是所求的硅片表面不平度. 根据得到的硅片所有被测点的起伏高度,可确定硅片被测区域的表面形貌.

一般情况下,光刻机对准系统检测对准位置偏移量的测量准确度为几个至几十个纳米,根据图 5

曲线可得对应的硅片表面高度起伏的测量灵敏度为纳米量级,因此 WFMFT 技术可实现硅片表面不平度的高准确度检测. WFMFT 技术的测量光斑尺寸与硅片上单个 FOCAL 标记^[13]的大小相同,约 0.6 mm^2 . 而基于调焦调平传感器检测方法的测量光斑尺寸^[14]大于 1 mm^2 . 与现有的基于调焦调平传感器的检测方法相比,WFMFT 技术硅片表面不平度的测量空间分辨率提高了 1.67%倍,可检测硅片微细区域内的高度差异,实现硅片表面形貌的原位检测.

2 实验及结果分析

在 ASML 公司的 PAS5500/550D 型步进扫描投影光刻机上进行 WFMFT 测试实验. 曝光波长为 248 nm,套刻准确度小于 35 nm. 首先通过 WF~AO 测试确定 WF~AO 基准曲线,.. 测试中选取一片平整度最优的超平片作为实验中的基准硅片,在 $0 \text{ μm} \sim 0.9 \text{ μm}$ 范围内的 8 个不同离焦量下将 FOCAL 标记曝光在涂胶基准硅片上. 经显影、检测后,通过曲线拟合得到对准偏移量与离焦量的关系曲线 g ,结果如图 5.

取被测硅片,均匀涂胶后,在光刻机最佳工作状态下将 FOCAL 标记曝光在被测硅片上. 对一曝光视场的 13×7 个点进行曝光,得到 91 个对准偏移量. 代入基准曲线 g 表达式(5),确定每个对准偏移量所对应的该点的表面起伏高度. 图 6(a)为检测到的曝光场内沿水平分布的 13 个点的对准偏移量,根据基准曲线表达式得到这 13 个点所对应的硅片起伏高度,如图 6(b). 同理,可得到曝光场内所有被

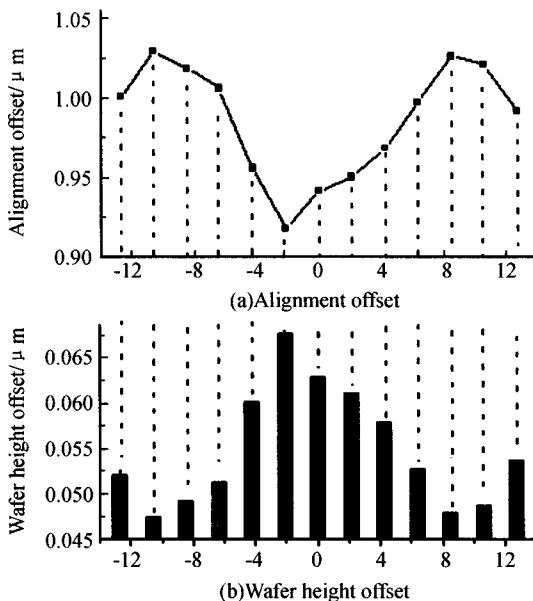


图 6 实验测得的被测点对准位置偏移量与硅片表面起伏高度
Fig. 6 Measured alignment offset and wafer height offset at measuring points

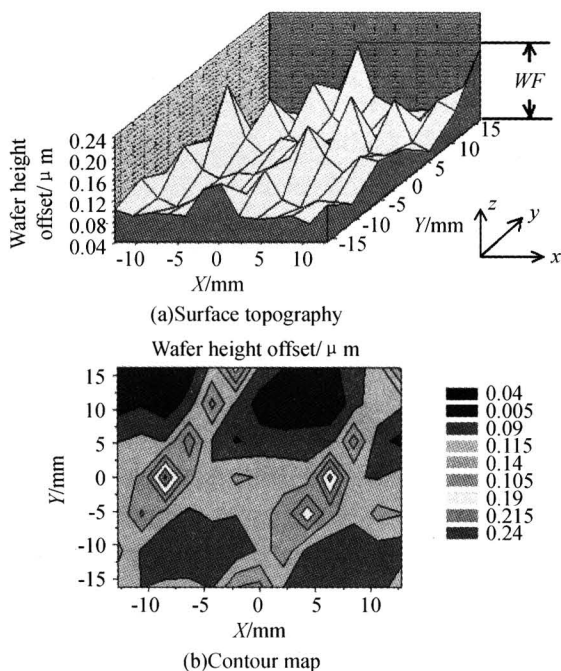


图7 硅片上被测区域的表面形貌与等高线图
Fig. 7 Surface topography and contour map of the measured wafer

测点对应的硅片表面起伏高度,做出硅片被测区域的表面形貌图与等高线图,见图7(a),(b).硅片表面不平度为各点起伏高度的最大值 $0.36757\ \mu\text{m}$.

利用基于调焦调平传感器的硅片不平度测量方法对同一被测硅片进行检测,两种方法的测量结果如图8.可以看出二者的测量结果接近,相对误差仅为3.6%.调焦调平传感器法的测量光斑较大,仅获得硅片表面的平均起伏高度,而WFMFT技术采用更小的测量光斑,可检测其微细区域的起伏高度,更真实的反映了硅片的表面形貌.实验表明,WFMFT技术提高了硅片表面不平度的测量空间分辨率,可实现硅片表面形貌的高准确度原位检测.

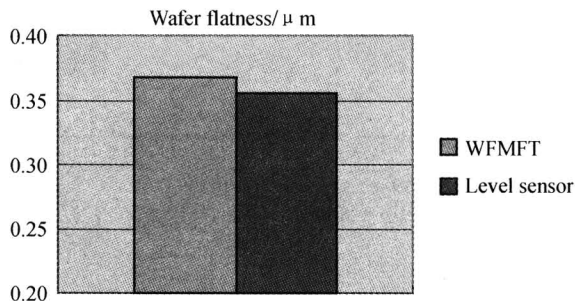


图8 WFMFT技术与调焦调平传感器法的WF测量结果
Fig. 8 Results obtained by WFMFT technique and Level sensor based method

3 结论

本文提出了一种新的硅片表面不平度原位检测技术.实验结果表明该技术可将被测硅片表面起伏高度偏差转化为FOCAL标记对准偏移量的改变,

利用WF~AO基准曲线计算硅片表面不平度.该技术克服了离线检测的不足,考虑了承片台吸附力对硅片变形的影响.与现有的基于调焦调平传感器的检测方法相比,硅片表面不平度的测量空间分辨率提高了1.67倍%,可检测硅片微细区域高度的差异,实现了对曝光工作状态下的硅片表面形貌的检测.

参考文献

- 马韬,沈亦兵.大视场投影光刻物镜的畸变特性检测.光子学报,2005,**34**(1):46~49
Ma T, Shen Y B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):46~49
- Kirk M, David F, Dean D. Die_scale wafer flatness 3D imaging across 20 mm with nanometer_scale resolution. *Proc SPIE*, 2002, **4689**:812~816
- Maarten J J, Han H, Peter H J S. A scanning wafer thickness and flatness interferometer. *SPIE*, 2004, **5252**:334~345
- van den Brink M A, Stoeldraijer J M D, Linders H F D. Overlay and field by field leveling in wafer steppers using an advanced metrology system. *SPIE*, 1992, **1673**:330~344
- Shi W J, Wang X Z, Zhang D Q. Application of BP-Neural networks in the FOCAL technique. *SPIE*, 2005, **5645**:233~239
- Bert V, Barbra H, Hans B. ArF step and scan system with 0.75 NA for the 0.10 μm node. *SPIE*, 2001, **4346**:634~650
- Thomas E A. Application of latent image metrology in microlithography. *SPIE*, 1991, **1464**:294~312
- Zhang D Q, Wang X Z, Shi W J. A new method to determine the energy range for the FOCAL technique. *SPIE*, 2005, **5645**:180~187
- Born M, Wolf E. *Principle of Optics*. Oxford: Pergamon Press, 1980
- Chris A Mack. PROLITH: a comprehensive optical lithography model. *SPIE*, 1985, **538**:207~220
- Bouwuis G, Wittekoek S. Automatic alignment system for optical projection printing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, **ED-26**(4):723~733
- Dirksen P, de Laat W, Megens H. Latent image metrology for production wafer steppers. *SPIE*, 1995, **2440**:701~711
- Peter D, Ruud P, Casper J. Focus and exposure dose determination using stepper alignment. *SPIE*, 1996, **2726**:799~808
- Amir W, David C, Ayelet M. Characterization of leveling modes on i-line stepper. *SPIE*, 2000, **4000**:827~834

An In-situ Method for Measuring the Wafer Flatness

Zhang Dongqing^{1,2}, Wang Xiangzhao¹, Shi Weijie¹

*1 Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-08-23

Abstract As the critical dimensions in the semiconductor industry were shrinking, the influences of wafer flatness on lithographic performance became increasingly greater. Based on the imaging performance of the special marks, the relationships between alignment offsets and wafer height offsets were discussed. Then, a novel method for measuring the wafer flatness was presented. Experiments show that wafer flatness and the surface topography can be measured in situ by the technique with high accuracy. Taking into account of the nonuniformity of the adsorption power of vacuum chuck, wafer flatness can be measured with high accuracy. Compared to the level sensor based method, the spatial resolution is increased by 67%. The surface topography of the wafer can be obtained by the new method.

Keywords Wafer flatness; FOCAL technique; Optical microlithography; In-situ measurement



Zhang Dongqing was born in Shandong Province, China, and in 1978. She received her M. S. in optical engineering from Laser Research Institute of Qufu Normal University in 2002. Currently she is studying for her Ph. D. degree from the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics. Her research focuses on the measurement techniques of image quality of lithographic tools.