

文章编号: 0253-2239(2010)04-1041-05

调焦调平探测光斑位置误差对测量准确度影响的研究

廖飞红¹ 李小平¹ 陈学东¹ 李志丹²

(¹ 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

² 上海微电子装备有限公司, 上海 201203

摘要 调焦调平测量系统(FLMS),实时测量硅片曝光视场区域与投影物镜焦面的相对位姿,其测量准确度影响光刻机曝光成像质量。调焦调平测量采用大入射角将 3 个以上的探测光斑投影到硅片曝光视场区域实现对硅片高度和倾斜的测量。如果光斑位置存在误差,就会引起硅片测量准确度误差,进而造成硅片曝光视场区域离焦,影响曝光成像质量。根据调焦调平单点几何测量模型,建立了光斑位置误差模型。研究结果表明,调焦调平单光斑的测量高度误差与光斑水平位置误差成正比,经调整调焦调平的零平面与焦面近似平行,并精确校准光斑水平位置误差到 0.05 mm,其造成的测量误差最大为 10 nm。

关键词 测量;光斑位置误差;调焦调平测量系统;光刻机

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1041

Probe Spot Position Error on the Accuracy of Focusing and Leveling Measurement System

Liao Feihong¹ Li Xiaoping¹ Chen Xuedong¹ Li Zhidan²

¹ State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Shanghai Micro-Electronics Equipment Co., Ltd, Shanghai 201203, China

Abstract Focusing and leveling measurement system (FLMS), as a key subsystem of the scanner, is used to detect height and tilts between wafer exposure area and the projection lens in real time. Its performance greatly affects the image quality of projection lens. Based on the grazing-incident beam method, FLMS detects height and tilts by using more than 3 probe spots on wafer exposure area. Spot position errors cause measurement errors and defocus of exposure area which affect the image quality. Based on the one-spot measurement model, position error model of probe spot is presented. It is found that the height measurement error is proportional to the spot position error, and the accuracy caused by spot position error is less than 10 nm when the zero plane of FLMS is well adjusted, and spot position error is 0.05 mm.

Key words measurement; spot position error; focusing and leveling measurement systems; lithography

1 引言

光学投影光刻是极大规模集成电路制造的主流光刻技术^[1~3]。投影光刻机两个最基本的参数是分辨率和焦深。在摩尔定律的推动下,投影光刻机的

分辨率逐年提高。根据瑞利判据,减小曝光波长和增大投影物镜数值孔径虽然是提高分辨率最有效的手段,但是却带来了焦深的明显下降^[4]。对于 90 nm 分辨率的步进扫描投影光刻机,其有效焦深

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(50605025)、国家 973 计划(2003CB716206)和中央高校基本科研业务费用专项资金(01-09-100015)资助课题。

作者简介: 廖飞红(1983—),男,博士研究生,主要从事精密机械测量与控制等方面的研究。

E-mail: lf159257@163.com

导师简介: 李小平(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事精密机械与控制、设备微环境控制等方面的研究。

E-mail: xpli@public.wh.hb.cn(通信联系人)

为300 nm左右^[5,6]。投影物镜的场曲、硅片表面平整度误差、承片台不平度误差和调焦调平测量误差等因素都会占用光刻机有限的焦深,降低实际曝光可用焦深,从而硅片表面当前曝光视场更容易发生离焦,严重地影响集成电路曝光成像的质量^[7,8]。为提高调焦调平测量性能,国内外学者进行了大量的研究。Doh Hoon Kim等^[9]采用动态探针光束扫描测量方案,综合利用不同扫描点的测量信号得出测量高度值,从而降低信号放大过程中噪声误差对测量重复性的影响。Uehara M等^[10]采用了扫描反射镜进行光强调制,降低信号处理过程中引入噪声对测量重复性的影响。J. E. van der Werf等^[7]采用光弹调制技术降低测量随机误差^[11],通过增大光斑的覆盖面积用于降低硅片形貌误差的影响。上述研究主要提高调焦调平测量重复性,未能有效解决测量的准确度问题。由于机械安装、投影物镜焦面漂移和机械温度漂移等因素不可避免,造成调焦调平探测光斑实际水平位置偏离理论测量位置,产生光斑水平位置误差,从而影响调焦调平测量准确度,为此,本文主要研究探测光斑水平位置误差对调焦调平测量准确度的影响。

2 调焦调平测量原理

图1为光刻机调焦调平测量原理图,其入射光以大入射角投影到硅片表面,在硅片曝光视场形成多个测量光斑,经过硅片反射后,探测光斑通过探测模块的透镜组放大后成像在探测器上。一旦硅片表面偏离调焦调平零面,则探测光斑偏离探测光路主光轴,探测器将光斑偏移量转换成微弱电信号,经过放大、滤波、信号提取等一系列信号处理过程后,即可获得硅片表面的测量高度。

单个探测光斑只能测量一个点的硅片高度,测量硅片的局部倾斜至少需要采用3个测量点,如

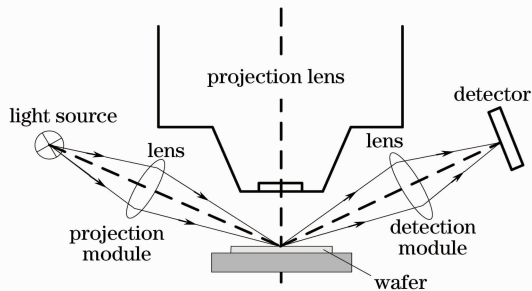


图1 硅片调焦调平光学检测原理

Fig. 1 Optical schematic of focusing and leveling sensor for wafer

图2所示(为4个测量点的情况)。一般采用最小二乘的方法将其拟合平面,从而得出硅片曝光视场区域测量的高度和倾斜值^[12,13]。

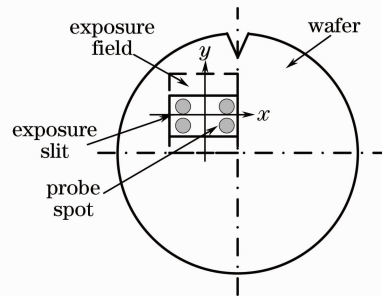


图2 测量点的分布

Fig. 2 Distribution of probe spots

设硅片曝光视场的平面方程为 $z = -R_y x + R_x y + Z$, 测量光斑数目为 n , 第 i 个光斑在投影物镜焦面的理论水平位置为 (x_i, y_i) , 其实际测量高度值为 H_i , 则可将多个光斑的测量值拟合为平面,

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}\boldsymbol{\beta}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{H} = (H_1 \cdots H_n)^T$, $\boldsymbol{\beta} = [R_y \ R_x \ Z]^T$, $\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} -x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H} \text{ 是多个光斑的实际测量高度值}$$

向量, $\boldsymbol{\beta}$ 为硅片曝光视场平面的高度倾斜值向量, \mathbf{A} 为光斑的位置矩阵。

很容易求出硅片曝光视场的高度倾斜值向量 $\boldsymbol{\beta}$ 的最小二乘解为

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{H}, \quad (2)$$

从(2)式可看出,多光斑的测量值向量 \mathbf{H} 和光斑水平位置矩阵 \mathbf{A} 直接影响调焦调平测量精度。由于调焦调平测量系统的机械安装、投影物镜焦面漂移、机械温度漂移等原因都将造成光斑实际水平位置偏离理论水平位置,最终通过(2)式将光斑水平位置误差传递到调焦调平测量结果中,造成调焦调平测量误差。

3 单光斑几何位置误差模型

如图3所示,在调焦调平坐标系 $OXYZ$ 下, O 为原点, Z 轴与投影物镜光轴重合, OXY 平面为调焦调平测量系统的零平面, Y 轴为光刻机扫描方向, X 轴垂直 Y 方向,且符合右手定则。 W_0 平面与 OXY 平面重合,是调焦调平测量系统的零平面。为降低硅片衬底图形对调焦调平测量精度的影响,测量光 KR 在 W_0 平面的投影 GR 与 X 轴成 45° 夹角^[14,15]。调焦调平的测量光以入射角为 α ($\alpha > 70^\circ$) 掠入射到调焦

调平零平面 W_0 , 与 W_0 平面相交于 R , 与投影物镜焦平面 W_f 相交于 K , 与硅片上表面 W 相交于 P 。由调焦调平的单点测量原理^[12], P 在 Z 方向上的偏差 h 为该光斑测量高度值。测量光与 W_f 平面的交点 K 在 $OXYZ$ 的坐标为 (x_f, y_f, h_f) 。这样就可以写出测量光的直线方程

$$\frac{x - x_f}{-\sin \alpha \sin 45^\circ} = \frac{y - y_f}{-\sin \alpha \cos 45^\circ} = \frac{z - h_f}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

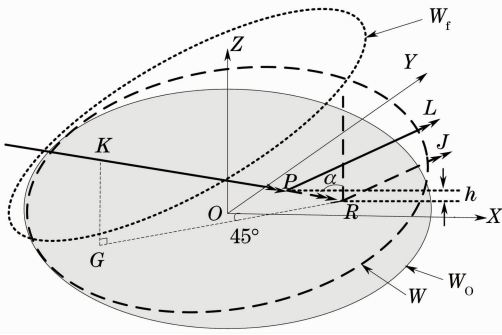


图3 单光斑测量几何模型

Fig. 3 Geometric measurement model for one probe spot

硅片上平面 W 在 Z 方向的偏移为 Z_w , 绕 X 轴, Y 轴的旋转分别为 R_{xw} 和 R_{yw} , 这样硅片表面的方程为

$$z = -R_{yw}x + R_{xw}y + Z_w. \quad (4)$$

在 $OXYZ$ 坐标系下, 投影物镜焦平面 W_f 与 Z 轴的偏移为 Z_f , 绕 X 轴, Y 轴的旋转分别为 R_{xf} 和 R_{yf} , 则 W_f 在调焦调平坐标系 $OXYZ$ 下的方程可表示为

$$z = -R_{yf}x + R_{xf}y + Z_f. \quad (5)$$

联立(3)、(4)式, 可求得探测光与硅片表面 W 的交点 P 的位置坐标 (x_w, y_w, h) 。

$$x_w = x_f + \frac{-R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w - h_f}{-\sqrt{2}\cot \alpha - R_{xw} + R_{yw}}. \quad (6)$$

$$y_w = y_f + \frac{-R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w - h_f}{-\sqrt{2}\cot \alpha - R_{xw} + R_{yw}}, \quad (7)$$

$$h = -R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w + \frac{(R_{xw} - R_{yw})(-R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w - h_f)}{-\sqrt{2}\cot \alpha - R_{xw} + R_{yw}}. \quad (8)$$

光斑水平位置坐标为 (x_f, y_f) 时, 对应硅片表面 W 的高度为 h_{xyf} , 由(4)式可知

$$h_{xyf} = -R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w. \quad (9)$$

由于在扫描曝光过程中, 硅片表面所有点都在相对焦面 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围之内, 因此有

$$|-R_{yw}x_f + R_{xw}y_f + Z_w - h_f| \leq 1 \mu\text{m},$$

由于硅片表面在调焦调平坐标系的倾斜量 $|R_{xw}| \leq 0.6 \text{ mrad}$, $|R_{yw}| \leq 0.6 \text{ mrad}$, 调焦调平的探测角 $70^\circ \leq \alpha \leq 89^\circ$, 将(7)式代入(4)~(6)式后, 忽略高阶项, 化简可得

$$x_w = x_f - \frac{\sqrt{2}\tan \alpha}{2}(h_{xyf} - h_f), \quad (10)$$

$$y_w = y_f - \frac{\sqrt{2}\tan \alpha}{2}(h_{xyf} - h_f), \quad (11)$$

$$h = h_{xyf} - \frac{\sqrt{2}\tan \alpha}{2}(R_{xw} - R_{yw})(h_{xyf} - h_f). \quad (12)$$

在调焦调平测量系统中, 该光斑在焦面上理论的水平位置为 (x_{1f}, y_{1f}) , 与实际光斑位置存在水平位置误差 $(\Delta x_f, \Delta y_f)$ 。

$$\begin{aligned} x_{1f} &= x_f + \Delta x_f \\ y_{1f} &= y_f + \Delta y_f. \end{aligned} \quad (13)$$

将(7)式和(11)式代入(10)式可得光斑在理论位置测量硅片表面 W 的理论测量高度值

$$h_1 = h - (R_{yw}\Delta x_f - R_{xw}\Delta y_f) \times \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha(R_{xw} - R_{yw}) \right]. \quad (14)$$

显然, 实际测量高度值 h 与理论测量高度值 h_1 之间存在测量误差, 误差大小为 Δh , 则将(12)式减去(14)式可得

$$\begin{aligned} \Delta h &= \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha(R_{xw} - R_{yw}) \right] \times \\ &\quad (R_{yw}\Delta x_f - R_{xw}\Delta y_f). \end{aligned} \quad (15)$$

光刻机实际扫描曝光过程中, 硅片表面 W 在焦面 W_f 附近, 更关心此时硅片表面 W 相对焦面 W_f 微小偏移时的测量误差, 假设硅片表面 W 与焦面 W_f 的高度偏移 ΔZ_w , 绕 X 轴和绕 Y 轴旋转偏移分别为 ΔR_{xw} 和 ΔR_{yw} , 即硅片表面 W 和焦面 W_f 满足如下条件:

$$\begin{aligned} R_{xw} &= R_{xf} + \Delta R_{xw}, \\ R_{yw} &= R_{yf} + \Delta R_{yw}, \\ Z_w &= Z_f + \Delta Z_w, \end{aligned} \quad (16)$$

将(16)式代入(15)式, 可得

$$\begin{aligned} \Delta h &= \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha(R_{xf} + \Delta R_{xw} - R_{yf} - \Delta R_{yw}) \right] \times \\ &\quad (R_{yf}\Delta x_f + \Delta R_{yw}\Delta x_f - R_{xf}\Delta y_f - \Delta R_{xw}\Delta y_f). \end{aligned} \quad (17)$$

由于 $\alpha \leq 89^\circ$, $R_{xf}, R_{yf} \leq 0.5 \text{ mrad}$, $\Delta R_{xw}, \Delta R_{yw} \leq 0.1 \text{ mrad}$ ^[10], 忽略(17)式中的高阶小项, 可得

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta x_f \left(R_{yf} + \Delta R_{yw} + \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha R_{yf}^2 - \right. \\ &\quad \left. \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha R_{xf}R_{yf} \right) + \Delta y_f (-R_{xf} - \Delta R_{xw} + \\ &\quad \left. \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha R_{xf}^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\tan \alpha R_{xf}R_{yf} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

从(10)式和(11)式可看出, 光斑在硅片表面的水平位置 (x_w, y_w) 相对光斑在焦面的位置 (x_f, y_f) 存在偏移, 其大小与光斑所在位置硅片表面的离焦

量($h_{xyf} - h_f$)及调焦调平的探测角 α 有关,并且离焦量($h_{xyf} - h_f$)越大和探测角越大,则光斑水平位置偏移也越大。

从(18)式可看出,单光斑高度测量误差与光斑的水平位置误差 Δx_f 和 Δy_f 成正比,调焦调平的探测角度 α 及焦面在调焦调平坐标系的倾斜角度 R_{xf} 和 R_{yf} 影响比例系数的大小。

4 光斑水平位置误差影响分析

4.1 焦面倾斜对调焦调平测量准确度影响

图4对比了焦面在不同倾斜姿态下,光斑水平位置误差与调焦调平测量误差的关系。调焦调平探测角 α 取最大值 89° ,硅片表面倾斜相对焦面倾斜($\Delta R_{xw}=0.1$ mrad, $\Delta R_{yw}=0.1$ mrad)。从图4可看出,投影物镜焦面的倾斜状态对调焦调平测量准确度影响极大,焦面相对调焦调平零面倾斜越小,则调焦调平测量准确度受光斑水平位置误差的影响越小。在极端情况下,焦面的倾斜达 0.5 mrad时,光斑水平位置误差为 0.5 mm时,对应最大测量误差为 620 nm。因此,在焦面倾斜较大时,有必要调整调焦调平的零面,使得零面与焦面近似平行,从而降低光斑水平位置误差对调焦调平测量误差的放大作用。

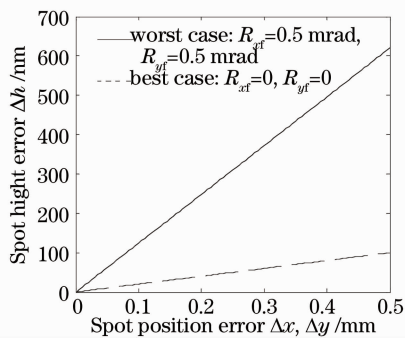


图4 投影物镜在不同焦面位置,光斑水平位置误差与测量高度误差的变化关系

Fig. 4 In different focus planes, the functional relation between measurement error and spot position error

4.2 光斑水平位置误差大小对测量准确度影响

调焦调平工作过程中,调焦调平的探测角 α 、投影物镜焦面倾斜(R_{xf} 与 R_{yf})和光斑水平位置误差($\Delta x_f, \Delta y_f$)为定值,当硅片表面在焦面附近变化时,(18)式可写成

$$\Delta h = \Delta x_f \Delta R_{yw} - \Delta y_f \Delta R_{xw} + C, \quad (19)$$

式中 C 为由探测角、焦面的倾斜及光斑水平位置误差组成的常数项。恒定的常数项测量误差可通过调

整调焦调平零面与焦面近似平行的方法,将 C 降低到近似为 0 ,而由硅片表面相对焦面倾斜引起的测量系统误差则不可消除。由于硅片相对焦面倾斜 ΔR_{xw} 和 ΔR_{yw} 在 ± 0.1 mrad范围内变化,要使因为光斑水平位置误差造成的测量系统误差限定到 10 nm,则要求

$$|\Delta h| = |\Delta x_f \Delta R_{yw} - \Delta y_f \Delta R_{xw}| < |\Delta x_f - \Delta y_f| \times 0.1 \text{ mrad} < 10 \text{ nm}, \quad (20)$$

根据(20)式可得光斑水平位置误差 Δx_f 和 Δy_f 的极限值为 0.05 mm。

5 结 论

通过光斑位置误差对调焦调平测量准确度影响的分析,可得出如下结论:

调焦调平测量准确度值的大小与光斑水平位置误差成正比,投影物镜焦面的倾斜状态、硅片相对焦面的位置和调焦调平的探测角影响比例系数的大小。

投影物镜的焦面相对调焦调平的零平面的倾斜越大,调焦调平测量准确度值的大小对光斑水平位置误差越敏感,因此,当检测到焦面倾斜较大时,有必要调整调焦调平系统的零平面,使得零面相对焦面的近似平行,从而提高调焦调平的测量准确度。

调焦调平测量系统集成到光刻机或焦面漂移后,除了调整调焦调平零面外,还需要对调焦调平的光斑实际位置进行校准,将光斑水平位置误差限制在 0.05 mm以内。

致谢 感谢上海微电子装备有限公司的陈飞彪提供的帮助。

参 考 文 献

- Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of double bottom antireflective coating for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 472~477
周 远, 李艳秋. 高数值孔径光刻成像中双层底层抗反膜的优化 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 472~477
- Zhou Yuan, Li Yanqiu. Bulk effects in hyper-numerical aperture optical lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1091~1095
周 远, 李艳秋. 高数值孔径光学光刻成像中的体效应 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1091~1095
- Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of topside antireflective coatings for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 337~343
周 远, 李艳秋. 高数值孔径光刻成像中抗反膜的优化 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 337~343
- B. J. Lin. New λ/NA scaling equations for resolution and depth-of-focus [C]. *SPIE*, 2000, **4000**: 759~764
- Gary Zhang, Stephen DeMoor, Scott Jessen *et al.*. Across wafer focus mapping and its applications in advanced technology nodes

- [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 1~10
- 6 Shoji Mimotogi, Fumikatsu Uesawa, Makoto Tominaga *et al.*. Performance of immersion lithography for 45 nm-node CMOS and ultra-high density SRAM with 0.25 μm [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 1~9
- 7 J. E. van der Werf. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, **10**: 735~740
- 8 Masahiro Watanabe, Yoshitada Oshida, Yasuhiko Nakayama *et al.*. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry for optical lithography [C]. *SPIE*, 1994, **2197**: 980~989
- 9 Doh Hoon Kim, Byung-Ho Nam, Kag Hyeon Lee. Probe beam scan type auto-focus system using position sensing detector for sub-half micron lithography tools [C]. *SPIE*, 1996, **2726**: 876~885
- 10 Uehara Makoto, Sudo Takeshi Sudo, Fujio Kanatani. Horizontal position detecting device[P]. United States, 4558949
- 11 M. A. Van den Brink, J. M. D. Stoeldraijer, H. F. D. Linders. Overlay and field by field leveling in wafer steppers using an advanced metrology system [C]. *SPIE*, 1992, **1673**: 330~344
- 12 Li Xiaoping, Chen Feibiao. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1987~1991
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
- 13 Tsuneyuki Hagiwara, Masato Hamatani, Hideyuki Tashiro *et al.*. Wafer edge-shot algorithm for wafer scanners[C]. *SPIE*, 2002, **4691**: 790~801
- 14 Shane Geary, Jim Thompson. Quantifying the effect of pattern density on focus offset[C]. *SPIE*, 2000, **3998**: 607~614
- 15 Norihiro Yamamoto, Katsuyoshi Kobayashi, Kenji Nakagawa. Wafer level measurement using auto-focus [C]. *SPIE*, 1996, **2726**: 870~875