

文章编号: 0253-2239(2007)11-1987-5

投影光刻机硅片调焦调平测量模型^{*}

李小平 陈飞彪

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 成像质量是光学光刻机的最主要指标, 硅片调焦调平测量是光刻机控制成像质量的基础。为此建立了硅片调焦调平测量系统单个测量点的测量模型, 并根据硅片形貌标准和集成电路尺寸标准, 推导了近似运算规则, 简化了曝光场高度与测量光斑在光电探测器上的位置之间的数学关系。运用最小二乘法和平面拟合曝光场曲面的方法, 推导了基于多个测量点的曝光场高度和倾斜测量的数学模型。该模型能满足调焦调平实时测量和控制的需要, 可用于测量精度优于 10 nm 的高精度调焦调平测量系统, 能满足线宽小于 100 nm 投影步进扫描光刻机的需要。

关键词: 光学器件; 光刻; 测量模型; 调焦调平; 步进光刻机

中图分类号: TP212.6 文献标识码: A

Measurement Model of Focusing and Leveling Measurement System for Projection Lithography Tool

Li Xiaoping Chen Feibiao

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Image quality is the key performance of the optical lithography tool and it relies on the performance of wafer focusing and leveling measurement system. A measurement model of single probe spot for focusing and leveling measurement system is established. The relationship formula of the height of exposure field and the position on sensitive detector is simplified according to the approximation calculation rules derived from wafer mapping standard and integrated circuit size standard. Height and tilts of the exposure field can be calculated on basis of multiple probe spots by using least square method and surface fitting with a plane. Comparing with traditional model, this model can analyze focusing and leveling measurement system with higher accuracy of 10 nm, and can be used in developing lithographic tool with less than 100 nm critical dimension.

Key words: optical devices; photolithography; measurement model; focusing and leveling; stepper

1 引 言

光学投影光刻是集成电路制造的主流工艺技术^[1,2]。投影光刻机通过投影物镜将掩模上集成电路图形投影复制到硅片表面涂敷的感光材料上, 分辨力和焦深为其最主要的性能指标之一。由瑞利判据可知, 投影光刻机通过减小曝光波长和增大投影物镜的数值孔径可提高光刻分辨力, 但同时导致可用焦深明显下降, 造成硅片表面当前曝光场相对于投影物镜焦平面更容易发生离焦。硅片当前曝光场

处于可用焦深之外会严重影响成像质量^[3~5]。为了解决因焦深减小带来的离焦问题, 高端投影光刻机均采用调焦调平技术实时控制硅片表面当前曝光场的高度和倾斜。调焦调平技术包括硅片表面的调焦调平测量技术和硅片表面位置的实时控制技术。硅片调焦调平测量技术对硅片表面的高度和倾斜进行测量, 其测量数据用于动态反馈控制硅片表面相对于投影物镜最佳焦平面之间的位置。为了避免污染和损伤硅片表面上的图形, 硅片调焦调平测量必须

^{*} 国家 863 计划重大专项(2002AA4Z3000)资助课题。

作者简介: 李小平(1966—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 主要从事集成电路装备技术、精密温度控制等方面的研究。

E-mail: xpli@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2006-12-06; 收到修改稿日期: 2007-04-24

采用非接触式的测量技术。常用的硅片调焦调平测量技术主要是光学测量技术、电容测量技术、气压位置测量技术^[6]。高端光学投影光刻机的硅片调焦调平测量均采用光学测量技术^[7~10]。尽管硅片调焦调平光学测量技术所采用的光电探测技术的原理有所不同,但均是通过大入射角照射到硅片表面,检测反射光的位置获得硅片表面的位置信息,其基本测量原理相同。因此,研究硅片调焦调平测量系统的测量模型是深入研究调焦调平测量系统的基础。

2 测量原理

硅片调焦调平测量系统由投影模块和探测模块组成,单个测量点的光学测量原理如图 1 所示。

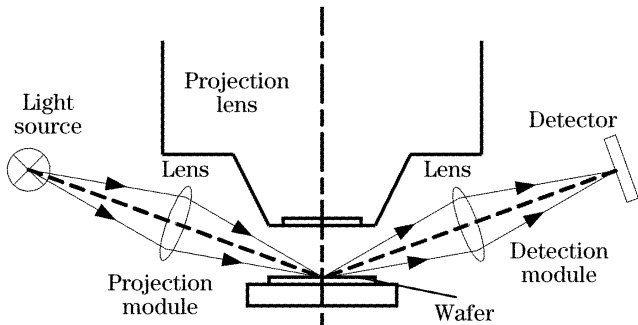


图 1 硅片调焦调平光学检测原理

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

入射光以大入射角投影到硅片表面,经过硅片表面反射后入射到光电探测器上。反射光携带硅片表面的高度信息,对光电探测器输出的电信号进行信号处理,即可获得硅片表面的高度信息。单个测量点只能测量硅片的高度,测量硅片的局部倾斜需要采用至少 3 个测量点,如图 2 所示(为 4 个测量点的情况)。倾斜测量时先获得这些测量点的高度数据,再由该组数据确定一个平面。由于当前曝光场(若采用扫描曝光方式,对应为曝光狭缝)的硅片实

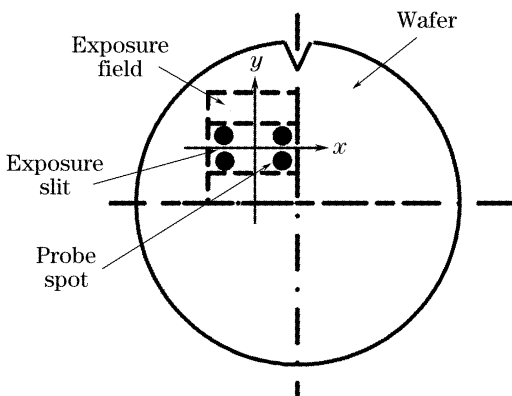


图 2 测量点的分布

Fig. 2 The distribution of probe spots

际表面是空间曲面,该平面被视为当前曝光场的近似平面,其在坐标系中的高度和倾斜即为曝光场的高度和倾斜值。

3 测量系统的几何模型

3.1 近似运算

在硅片实时调焦调平前,需要进行全场调焦调平,经全场调焦调平后的硅片表面只有局部倾斜,其倾斜角 $\theta \leq 100 \mu\text{rad}$ ^[11],可得到 $|\cos \theta - 1| \leq 5 \times 10^{-9}$, $|\sin \theta - \theta| \leq 1.67 \times 10^{-13}$ 。硅片调焦调平的精度达到 10 nm 能满足高分辨力光刻离焦控制要求^[5],由当前最大芯片尺寸为 26 mm × 33 mm 可知曝光场的最大宽度 $L = 26 \text{ mm}$ (33 mm 为长度方向,由扫描曝光获得),可得到 $L |\cos \theta - 1| \ll 10 \text{ nm}$, $L |\sin \theta - \theta| \ll 10 \text{ nm}$ 。因此,当倾斜角 $\theta \leq 100 \mu\text{rad}$ 时,可简化

$$\cos \theta \approx 1, \tag{1}$$

$$\sin \theta \approx \theta. \tag{2}$$

3.2 单点测量几何模型

如图 3 所示,坐标系 OXYZ 的原点为投影物镜光轴与最佳焦平面 W_0 的焦点,平面 OXY 与最佳焦平面重合,Y 轴为光刻机扫描方向,X 轴垂直 Y 向,且符合右手定则^[12]。平面 W 为硅片当前曝光场表面的拟合平面,其单位法向矢量为 n_w ,其与硅片调焦调平测量系统坐标系 Z 轴之间的平移为 h ,夹角为 θ 。夹角 θ 可由平面 W 绕 X 轴旋转 θ_x 和绕 Y 轴旋转 θ_y 获得,根据坐标转换和近似公式(1)、(2)易得关系式

$$\theta^2 \approx \theta_x^2 + \theta_y^2. \tag{3}$$

根据图 3 的坐标系定义,拟合平面的单位法向矢量 n_w 可由单位矢量 $[0, 0, 1]$ 通过分别绕 X、Y 轴旋转 $-\theta_x$ 、 $-\theta_y$ 得到,则根据投影关系和坐标转换容易得

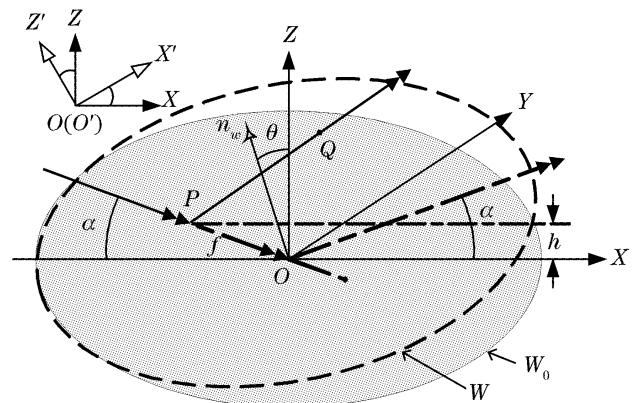


图 3 单点测量几何模型

Fig. 3 Geometric measurement model for one probe spot

到

$$\mathbf{n}_w = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \Psi \\ -\sin \theta \sin \Psi \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x \\ \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \theta_y \\ -\theta_x \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 Ψ 为法矢量 \mathbf{n}_w 在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角。

测量光以入射角 $180^\circ - \alpha$ 入射到平面 W_0 。不失一般性,假设其入射点为硅片调焦调平测量系统坐标系的原点,硅片调焦调平测量系统投影模块的焦点为 P ,焦点 P 与入射点 O 之间存在离焦量 f ,入射光在平面 W 的入射点的 Z 向的坐标为 h 。测量光经平面 W 反射之后,投影模块的焦点处于图中的 Q 点。经几何计算,可得到 Q 点在硅片调焦调平测量系统的坐标

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} f \cos \alpha + \delta \sin \theta \cos \phi \\ -\delta \sin \theta \sin \phi \\ -f \sin \alpha + \delta \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中

$$\delta = 2h \cos \theta - 2f(\cos \theta \sin \theta \cos \phi - \sin \alpha \cos \theta).$$

如图 3 左上角所示,坐标系 $OXYZ$ 绕 Y 轴旋转角度 α 后得到新坐标系 $O'X'Y'Z'$,即测量光经平面 W 的反射光正好沿 X' 轴方向进入探测模块,硅片调焦调平测量系统测量光轴正好与 X' 轴重合。坐标系 $OXYZ$ 和坐标系 $O'X'Y'Z'$ 之间的转换矩阵为

$$\mathbf{R}_{OXYZ \rightarrow O'X'Y'Z'} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由式(6)中的转换矩阵对式(5)的坐标进行坐标转换,得到 Q 点在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 中的坐标

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} f - 2f \sin^2 \theta (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos^2 \phi) + 2h \cos \alpha \sin \theta \cos \theta \cos \phi + 2h \sin \alpha \cos^2 \theta \\ 2f \sin \theta \sin \phi (\cos \alpha \sin \theta \cos \phi - \sin \alpha \cos \theta) - 2h \sin \theta \cos \theta \sin \phi \\ -2f \sin \theta \cos \theta \cos \phi - 2f \sin \alpha \cos \alpha \sin^2 \theta \sin^2 \phi - \\ 2h \sin \alpha \sin \theta \cos \theta \cos \phi + 2h \cos \alpha \cos^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

经硅片表面反射之后,测量光进入硅片调焦调平测量系统的探测模块,最终成像在光电探测器上,图 4 为硅片调焦调平测量系统探测模块的测量模型。该探测模型为一成像系统,测量光在硅片上的反射面和光电探测器的感光面构成了该成像系统的物平面和像平面。为了简化模型,视该成像系统为等大小倒立的实像。事实上,为了提高测量精度,探测模块可以设计成一个倒立放大的成像系统,即测量点在探测器上的位置最终应该乘上探测模块的成像倍率。

如前所述,探测模块光轴正好与坐标轴 X' 重合, Q 点为图 3 所示的 Q 点在 $X'O'Z'$ 平面的投影。由于离焦测量、加工装配等误差,探测模块的物平面必然存在一定的离焦量 g ,从理论物方焦平面 (OFP_0) 偏离到物方焦平面 (OFP),从而使得该探测模块光电探测器的实际感光面也从理论像方焦平面 (IFP_0) 偏离到像方焦平面 (IFP)。所以,投影模块

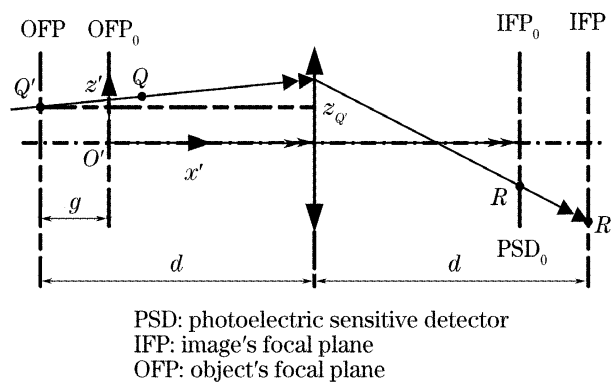


图 4 探测模块测量模型

Fig. 4 Measurement model for detection module
 的焦点 Q 最终在光电探测器的实际感光面的感光点为 R' 。要得到 R' 的坐标,需先求出其对应物点 Q' 的坐标。图 4 中的 Q' 位于物方焦平面上,同时为测量光反射光路上的一点,根据(7)式几何运算容易获得 Q' 点在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 中的坐标

$$X_{Q'} = -g, \quad (8)$$

$$Y_{Q'} = -2h \sin \theta \cos \theta \sin \phi - \frac{g + h(2 \cos^2 \theta \sin \alpha + 2 \cos \theta \sin \theta \cos \phi)}{1 - 2 \sin^2 \theta (2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos^2 \phi)}, \quad (9)$$

$$Z_{Q'} = [g + 2h\cos\theta(\cos\alpha\sin\theta\cos\psi + \sin\alpha\cos\theta)] \times \frac{2\sin\alpha\cos\alpha\sin^2\theta\sin^2\psi + 2\sin\theta\cos\theta\cos\psi}{1 - 2\sin^2\theta(\cos^2\alpha\cos^2\psi + \sin^2\alpha)} - 2h\sin\alpha\sin\theta\cos\theta\cos\psi + 2h\cos\alpha\cos^2\theta. \quad (10)$$

由于成倒立等大小的像,则感光点 R' 在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 中的坐标与其物点 Q' 的坐标存在关系式

$$Y_{R'} = -Y_{Q'} = 2h\sin\theta\cos\theta\sin\psi + \frac{g + h(2\cos^2\theta\sin\alpha + 2\cos\theta\sin\theta\cos\psi)}{1 - 2\sin^2\theta(2\sin^2\alpha + \cos^2\alpha\cos^2\psi)}, \quad (11)$$

$$Z_{R'} = -Z_{Q'} = -[g + 2h\cos\theta(\cos\alpha\sin\theta\cos\psi + \sin\alpha\cos\theta)] \times \frac{2\sin\alpha\cos\alpha\sin^2\theta\sin^2\psi + 2\sin\theta\cos\theta\cos\psi}{1 - 2\sin^2\theta(\cos^2\alpha\cos^2\psi + \sin^2\alpha)} + 2h\sin\alpha\sin\theta\cos\theta\cos\psi + 2h\cos\alpha\cos^2\theta. \quad (12)$$

根据(4)式,对(11)式和(12)式进行简化, R' 在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 中的坐标则为

$$Y_{R'} = -2g\sin\alpha \times \theta_x - 2h\sin^2\alpha \times \theta_x + 2h \times \theta_y, \quad (13a)$$

$$Z_{R'} = -2h\cos\alpha - 2g \times \theta_y - 2h\sin\theta \times \theta_y - g\sin(2\alpha) \times \theta_x^2. \quad (13b)$$

由于调焦调平测量系统采用大入射角,即 α 一般小于 10° ,且 θ_x, θ_y 均小于 $100 \mu\text{rad}$,由(13a)式和(13b)式可以得出,测量光斑在光电探测器上因硅片高度 h 变化的 Y 向位置变化范围较 Z 向的小得多,因此仅采用(13b)式就可获得需要的测量精度。并且由于 100 nm 分辨力光刻机的焦深为 $\pm 200 \text{ nm}^{[5]}$,因此 h 和 g 最大值可取为 200 nm 。根据数据计算可知 $|2g \times \theta_y + 2h\sin\alpha \times \theta_y + g\sin(2\alpha) \times \theta_x^2| < 0.05 \text{ nm}$,因此(13b)式可简化为

$$Z_{R'} = -2h\cos\alpha. \quad (14)$$

3.3 高度和倾斜的测量模型

调焦调平测量系统通过测量多个点高度计算得到曝光场高度和倾斜。如图2所示,坐标系的 Z 轴与投影物镜光轴重合,方向向上,零点为投影物镜最

佳焦平面与 Z 轴的交点, Y 轴为光刻机硅片台的扫描方向, X 轴垂直于 Y 轴,三轴间符合右手定则。由单点测量原理和测量点在水平面上的布置可以获得多个测量点的坐标值 (X_i, Y_i, Z_i) ,由这些点拟合出的平面方程为

$$Z = aX + bY + c, \quad (15)$$

式中 a, b, c 均为常量。记

$$E_i = Z_i - (aX_i + bY_i + c),$$

为平面 $Z = aX + bY + c$ 上点 (X_i, Y_i) 处 Z 值与实际值 Z_i 的偏差,根据最小二乘法用 $\sum E_i^2$ 来度量总偏差,即常量 a, b 和 c 满足

$$F(a, b, c) = \sum E_i^2 = \sum (Z_i - aX_i - bY_i - c)^2 \text{ 为最小值。由极值定理可得}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F(a, b, c)}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^n X_i (Z_i - aX_i - bY_i - c) = 0, \\ \frac{\partial F(a, b, c)}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^n Y_i (Z_i - aX_i - bY_i - c) = 0, \\ \frac{\partial F(a, b, c)}{\partial c} &= -2 \sum_{i=1}^n (Z_i - aX_i - bY_i - c) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

即

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n X_i^2 & \sum_{i=1}^n (X_i Y_i) & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n (X_i Y_i) & \sum_{i=1}^n Y_i^2 & \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n Y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (X_i Z_i) \\ \sum_{i=1}^n (Y_i Z_i) \\ \sum_{i=1}^n Z_i \end{bmatrix}, \quad (17)$$

由(17)式可解得 a, b, c ,再由(15)式和(4)式可得测量的高度值和倾斜值

$$Z = c,$$

$$\theta_x \approx \sin \theta \sin \psi = \frac{b}{\sqrt{1+a^2+b^2}},$$

$$-100 \mu\text{rad} < \theta_x < 100 \mu\text{rad}$$

$$\theta_y \approx \sin \theta \cos \psi = \frac{a}{\sqrt{1+a^2+b^2}},$$

$$-100 \mu\text{rad} < \theta_y < 100 \mu\text{rad}$$

4 结 论

通过对硅片调焦调平测量系统测量模型的分析,可以得到结论:

1) 测量光斑在光电探测器上的位置与曝光场高度呈近似线性关系,曝光场的倾斜会影响测量精度,因此在高精度测量过程中,先进行硅片整场调焦调平对提高局部调焦调平测量精度非常必要。

2) 除了曝光场倾斜会影响调焦调平测量系统的测量精度外,离焦测量和曝光场倾斜共同作用也会产生附加误差,且调焦调平测量系统通过测量曝光场多个点的高度值计算得到其倾斜量,因此调焦调平测量系统的测量范围和测量精度相互制约,即测量范围增大,其测量精度就会降低。

3) 要得到曝光场的高度和倾斜值,必须对曝光场表面进行至少三点的测量,测量点在 XOY 平面内的位置和对应的 Z 坐标均影响拟合得到的平面方程,即影响调焦调平的测量精度。

4) 曝光场的高度是投影物镜光轴与曝光场拟合面的交点的 Z 坐标,不仅与各测量点的 Z 坐标值有关,还与各测量点在 XOY 平面内的位置有关。

参 考 文 献

- 1 P. P. Bruggroaf. Optical lithography to 2000 and beyond[J]. *Solid State Technology*, 1999, **42**(2): 31~41
- 2 J. H. Burning. Optical lithography below 100 nm[J]. *Solid State Technology*, 1998, **41**(11): 59~67
- 3 G. Vandenberghe, Kim Young-Chang, C. Delvaux *et al.*. ArF lithography options for 100 nm technologies[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 179~190
- 4 B. J. Lin. New λ /NA scaling equations for resolution and depth-of-focus[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4000**: 759~764
- 5 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)
曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(7): 24~30
- 6 Li Xiaoping, Chen Feibiao, Li Zhidan *et al.*. A kind of focusing and leveling measurement device [P]. Chinese Patent, CN200510025462. X, 2005-10-5 (in Chinese)
李小平, 陈飞彪, 李志丹等. 一种调焦调平检测装置[P]. 中国专利, CN200510025462. X, 2005-10-5
- 7 Jan E. van der Werf, Marinus A. van den Brink, Henk F. D. Linders *et al.*. Imaging apparatus having a focus-error and/or tilt detection device[P]. United States Patent, US5191200, 1993-03-02
- 8 Masahiro Watanabe, Yoshitada Oshida, Yasuhiko Nakayama *et al.*. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry for optical lithography[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2197**: 980~989
- 9 Tsuneyuki Hagiwara, Masato Hamatani, Hideyuki Tashiro *et al.*. Wafer edge-shot algorithm for wafer scanners[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4691**: 790~801
- 10 SEMI M1-0200. Specifications for polished monocrystalline silicon wafers [S]. Book of SEMI Standards 0200 (Materials Volume)
- 11 Bruno La Fontaine, Jan Hauschild, Mircea 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
- 12 Chen Feibiao, Li Xiaoping. Model of silicon wafer topography for focusing and leveling measurement system[J]. *Microfabrication Technology*, 2006, (3): 49~53 (in Chinese)
陈飞彪, 李小平. 用于调焦调平测量系统中的硅片表面形貌模型[J]. *微细加工技术*, 2006, (3): 49~53