

# 纳米光刻中调焦调平测量系统的工艺相关性

孙裕文<sup>1,2</sup> 李世光<sup>1</sup> 叶甜春<sup>1</sup> 宗明成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微电子研究所, 北京 100029

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 随着半导体制造步入 1x nm 技术节点时代, 光刻机中的对焦控制精度需要达到几十纳米。在纳米精度范围内, 硅片上的集成电路(IC)工艺显著影响调焦调平系统的测量精度。基于实际的调焦调平光学系统模型和三角法、叠栅条纹法测量原理, 建立工艺相关性误差模型。研究表明, 工艺相关性误差主要来源于测量光在光刻胶涂层内部的多次反射。选取 3 种光刻胶仿真分析发现, 不同光刻胶的工艺相关性误差随光刻胶厚度的变化趋势相同, 随测量光入射角(45°~85°)的增大而减小。在实验验证平台上分别测量 7 种工艺硅片, 实验测量值与理论模型计算值差异统计平均值小于 6 nm。结果表明, 光刻机中调焦调平系统的测量光有必要采用大入射角度, 同时提高光刻胶的涂胶均匀性, 以减少工艺相关性误差。

**关键词** 测量; 调焦调平; 工艺相关性; 纳米光刻

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0812001

## Process Dependency of Focusing and Leveling Measurement System in Nanoscale Lithography

Sun Yuwen<sup>1,2</sup> Li Shiguang<sup>1</sup> Ye Tianchun<sup>1</sup> Zong Mingcheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** With the development of semiconductor manufacturing to 1x nm technological node, focus control accuracy of lithography needs to meet dozens of nanometers. In the range of nanoscale, integrated circuit (IC) process on silicon wafer has an important impact on the measurement accuracy of the focusing and leveling system. A process dependent error model is established based on actual focusing and leveling optical system model, trigonometry and Moire measurement principle. Research shows that process dependent error mainly results from the multiple reflections inside the photoresist. Simulation is conducted with three different photoresists. The simulation results indicate that process dependent error of different photoresists has the same trend as the photoresist thickness and process dependent error decreases with the increase of incident angle (45°~85°). Seven processed silicon wafers are measured on the experimental setup. The statistical mean of the difference between the experimental measurement and the theoretical model calculation is less than 6 nm. The results show that, in order to reduce the process dependent error, it is necessary to increase the angle of incidence of focusing and leveling system in lithography and improve the uniformity of the photoresist coating.

**Key words** measurement; focusing and leveling; process dependency; nanoscale lithography

**OCIS codes** 120.4120; 220.3740; 120.3940

## 1 引 言

随着微电子技术的迅猛发展, 极大规模集成电路进入 1x nm 技术节点时代, 光刻机的对焦控制范围下降至几十纳米<sup>[1-2]</sup>。在光刻机中, 调焦调平测量系统用于测量硅片表面高度分布, 其测量结果用于控制工件

**收稿日期:** 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-04-11

**基金项目:** 国家科技重大专项(2012ZX02701004)

**作者简介:** 孙裕文(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事精密计量方面的研究。E-mail: sunyuwen@ime.ac.cn

**导师简介:** 宗明成(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光刻技术、精密测控技术、精密计量等方面的研究。

E-mail: zongmingcheng@ime.ac.cn(通信联系人)

台,使硅片表面的曝光区域位于最佳焦平面<sup>[3]</sup>。因此,研制具有纳米级测量精度的调焦调平系统对保证光刻机的曝光质量具有重要意义。

调焦调平测量系统通常基于光学三角法测量原理<sup>[4-9]</sup>。投影标记以一定角度成像到硅片表面,经硅片反射后,再次成像到探测标记位置。当硅片表面高度发生变化时,投影标记像相对于探测标记发生偏移,该偏移量与硅片高度变化成正比。在纳米级测量精度要求下,光传播路径中任何介质对光传播性质的改变都可能引起难以忽略的测量误差。在硅片送入光刻机进行曝光前,通常进行一系列集成电路(IC)工艺处理,例如硅片表面涂覆光刻胶、光刻胶下方形成电路复杂结构等。当调焦调平系统测量光入射到这种结构上时,会引起光的传播方向、振幅(光强)、位相和偏振态等的改变,从而影响测量精度。

为了减弱 IC 工艺对调焦调平测量精度的影响,Philips 公司的 van der Werf J E<sup>[10]</sup> 提出采用宽光谱卤素灯光源的方法来减弱工艺硅片表面对入射光相位调制造成的影响,采用光调制技术和归一化光学差分的方法,克服工艺结构引起的光强波动;Nikon 公司的 Smith D G 等<sup>[11-12]</sup> 提出采用多种 LED 光源拼接形成的宽光谱光源降低 IC 工艺对于调焦调平测量精度的影响;ASML 公司的 Teunissen P A A 等<sup>[13-14]</sup> 提出在沿光路方向的硅片前后分别合理设置平面反射镜,利用平面反射镜表面的镀膜结构补偿 IC 工艺造成的工艺相关性误差。

采用上述文献提出的方法可以很大程度上降低工艺结构对调焦调平测量精度的影响,但随着对焦控制精度下降至几十纳米,工艺结构误差依然是影响调焦调平测量精度的主要因素。本文基于实际光学系统和硅片高度测量原理<sup>[15]</sup>,提出一种工艺相关性测量误差与 IC 工艺之间的数学模型,解释工艺相关性误差来源,并在实验平台上对该数学模型进行验证。仿真分析了工艺相关性误差与光刻胶厚度和测量光入射角度的关系,提出减少工艺相关性误差的方法。

## 2 调焦调平测量原理

调焦调平测量技术的基本原理如图 1 所示。其中, A 为投影光栅, B 为探测光栅,  $C_1$ 、 $C_2$  分别表示不同高度处的硅片表面。假设硅片表面为镜面反射面,硅片表面法线方向为  $n$ 。从投影光栅出射的平行光束以入射角  $\alpha$  投射到硅片表面,被硅片反射后到达探测光栅。当硅片高度变化为  $h$  时,从投影光栅出射的平行光束的(中心)位置将在探测光栅处产生  $\Delta x_1$  偏移。由几何关系可知,硅片高度变化量  $h$  与偏移量  $\Delta x_1$  的关系为:

$$\Delta x_1 = 2h \sin \alpha. \quad (1)$$

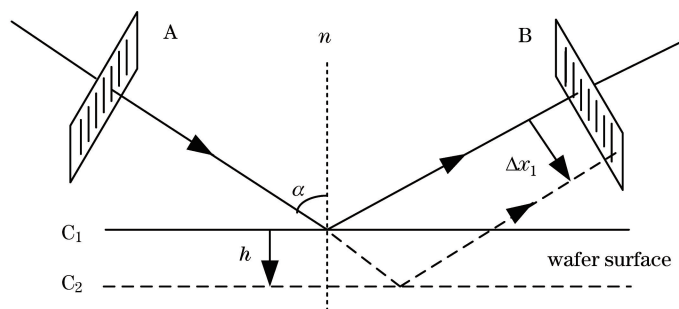


图 1 调焦调平测量技术基本原理

Fig. 1 Basic principle of focusing and leveling measurement technology

当入射角  $\alpha$  恒定且已知时,通过测量探测光栅处光束的偏移量  $\Delta x_1$ ,便可获得硅片表面的高度变化量  $h$ 。由于光栅存在衍射效应,通过光栅的光束并非平行光,导致投影光栅在硅片和探测光栅处的图像产生模糊,影响测量精度,因此在投影光栅和硅片之间、硅片和探测光栅之间加入双远心成像光学系统,使投影光栅分别成像在硅片和探测光栅上。这种变化不改变测量原理,但测量精度得到极大地提高,其光路示意图如图 2 所示。一照明光源以平行光均匀照射到投影光栅上,投影光栅经  $L_1$  和  $L_2$  组成的双远心光学系统成像到硅片表面。光栅像经硅片表面反射后,携带硅片的高度信息,经过由  $L_3$  和  $L_4$  组成的双远心光学系统再次成像到探测光栅上,投影光栅像与探测光栅叠加形成叠栅条纹。当被测硅片表面高度发生变化时,叠栅条纹光

强随之变化。为了消除硅片表面反射率变化对测量精度的影响,在探测光栅前加入偏振片和分光晶体。分光晶体将偏振光分解为 o 光和 e 光,分别与探测光栅叠加,形成两套叠栅条纹。这两套叠栅条纹振幅相等,位相差  $\pi$ ,随硅片高度大致呈正弦变化。取线性度比较好的一小段区域作为调焦调平系统的线性范围,在该范围内,硅片高度为:

$$h = G \frac{(I_e - v_{\text{offset}_e}) - (I_o - v_{\text{offset}_o})}{(I_e - v_{\text{offset}_e}) + (I_o - v_{\text{offset}_o})}, \quad (2)$$

式中,  $I_e$  和  $I_o$  分别为 e 光和 o 光光强,  $v_{\text{offset}_e}$  与  $v_{\text{offset}_o}$  为 e 光和 o 光探测器处的背景噪声,  $G$  为比例系数。

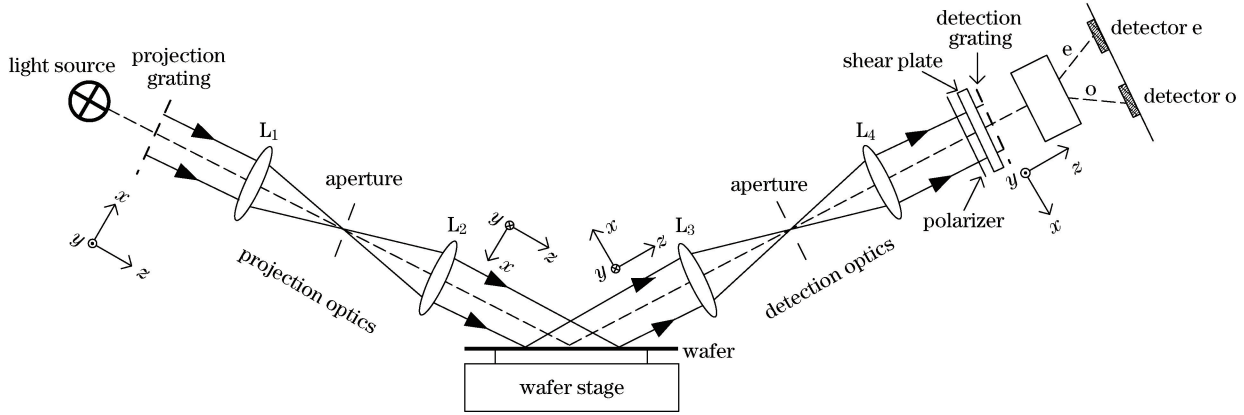


图 2 调焦调平测量系统光路图

Fig. 2 Schematic of focusing and leveling measurement system

### 3 工艺相关性理论模型

假设图 2 中两双远心系统结构相同,放大倍率为 1:1,透射率为 1,该假设不影响分析的一般性。投影光栅、硅片上光栅像、光栅像的镜面反射像和探测光栅处的坐标系如图 2 所示,光栅刻线方向为  $y$  轴,光栅面上垂直于光栅刻线的方向为  $x$  轴,光轴  $z$  垂直通过投影光栅中心。简要起见,仅讨论  $x$  方向一维光栅的传播。本节分析当投影光栅经过两双远心系统的成像和硅片表面的反射后,在探测光栅处形成的电场分布,进一步根据三角法和叠栅条纹测量原理,得到(2)式中  $I_o$ 、 $I_e$  的表达式。为了评估 IC 工艺对测量结果的影响,分别将硅片表面假设为理想镜面和有光刻胶涂层的工艺硅片模型。

#### 3.1 镜面反射模型

该调焦调平测量系统中,投影光栅为振幅型光栅,其复振幅透射率  $t_p(x)$  为:

$$t_p(x_p) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left(\frac{x_p - nP}{P/2}\right), \quad (3)$$

式中,  $x_p$  为投影光栅处  $x$  轴位置,  $P$  为光栅周期,  $N$  为光栅条数,  $\text{rect}()$  表示矩形函数。投影光栅位于双远心光学系统第 1 透镜(组)  $L_1$  的前焦面上。假设投影光栅表面入射光强为单位强度,在  $L_1$  的后焦面上形成频谱分布。光阑位于频谱面上,只允许 0 级和  $\pm 1$  级衍射光通过,在远心系统第 2 透镜(组)  $L_2$  的后焦面(投影光栅像面、硅片表面)得到的复振幅分布为:

$$E_p(x_p) = \text{rect}\left(\frac{x_p}{NP/2}\right) \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos\left(2\pi \frac{x_p}{P}\right) \right]. \quad (4)$$

$E_p$  经过硅片的镜面反射、探测光学系统的成像及偏振片、分光晶体的偏振分光后,在不考虑等比透射率损失的情况下,在探测光栅表面  $x_d$  位置处得到 o 光和 e 光的复振幅分布为:

$$E_{(\text{os}, \text{op})}(x_d) = \text{rect}\left(\frac{x_d + \Delta x_1}{NP/2}\right) \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos\left(2\pi \frac{x_d + \Delta x_1}{P}\right) \right] r_{0(\text{os}, \text{op})}, \quad (5)$$

$$E_{(\text{es}, \text{ep})}(x_d) = \text{rect}\left(\frac{x_d + \Delta x_1}{NP/2}\right) \left[ \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos\left(2\pi \frac{x_d + \Delta x_1}{P}\right) \right] r_{0(\text{es}, \text{ep})}, \quad (6)$$

式中,  $x_d$  为检测光栅处  $x$  轴位置,  $r_0$  为镜面反射系数。对于 s 光和 p 光,具有不同的复振幅分布。下标 os

代表 s 光经过偏振分光后,在 o 输出光中的分量,下标 op 代表 p 光经过偏振分光后,在 o 输出光中的分量,类似地,es,ep 分别代表 s、p 光在 e 输出光中的分量。

探测光栅与投影光栅相同,探测光栅的中心位置相对于远心系统的光轴在  $x$  方向上移动  $1/4$  周期,即探测光栅的复振幅透射率为:

$$t_d(x_d) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left(\frac{x_d + P/4 - nP}{P/2}\right) \quad (7)$$

$E_o$ 、 $E_e$  透射过探测光栅后(o、e 两个投影光栅像与探测光栅叠加)形成叠栅条纹,由于测量光具有一定的光谱范围,双远心系统存在一定的数值孔径(NA),因此叠栅条纹信号光强为:

$$I_o = \int_{-NP/2}^{NP/2} \left\{ \left| \int_{\theta_0-NA/2}^{\theta_0+NA/2} \int_{\lambda} [E_{op}(x_d, \lambda, \theta_i) t_d(x)] d\lambda d\theta_i \right|^2 + \left| \int_{\theta_0-NA/2}^{\theta_0+NA/2} \int_{\lambda} [E_{os}(x_d, \lambda, \theta_i) t_d(x)] d\lambda d\theta_i \right|^2 \right\} dx, \quad (8)$$

$$I_e = \int_{-NP/2}^{NP/2} \left\{ \left| \int_{\theta_0-NA/2}^{\theta_0+NA/2} \int_{\lambda} [E_{ep}(x_d, \lambda, \theta_i) t_d(x)] d\lambda d\theta_i \right|^2 + \left| \int_{\theta_0-NA/2}^{\theta_0+NA/2} \int_{\lambda} [E_{es}(x_d, \lambda, \theta_i) t_d(x)] d\lambda d\theta_i \right|^2 \right\} dx. \quad (9)$$

将(8)~(9)式代入(2)式,即可得到硅片的测量高度。

### 3.2 工艺硅片模型

实际待测硅片并非理想镜面,曝光前的硅片表面涂有光刻胶层,光刻胶之下有金属层、抗反射层、氧化层等叠层结构。为了便于分析,将硅片的工艺结构简化为如图 3 所示的 3 层结构,包括空气层、光刻胶层和基底层,其折射率分别为  $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 。由于光刻胶是一种半透明介质,调焦调平测量系统的测量光在光刻胶表面仅有部分光被反射,另一部分光则透射入光刻胶内,光束在光刻胶内部多次反射、折射,形成一系列出射光束。图 3 中所有光线代表主光线。可见,投影光栅上一点在硅片表面经过多次反射后,经过双远心光学系统,并不汇聚于一点,而是等距离分布在探测光栅的不同位置。设相邻反射光束之间距离为  $\Delta x_2$ ,在探测光栅某点处的复振幅由投影光栅上不同位置的复振幅叠加构成,因此,在探测光栅处形成新的投影光栅分布。

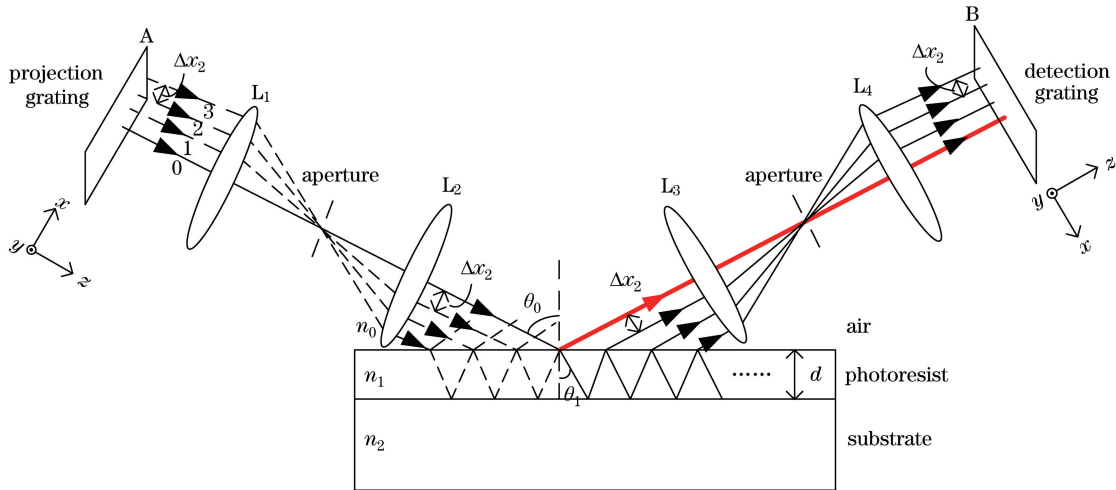


图 3 IC 工艺结构影响调焦调平测量精度原理图

Fig. 3 Basic principle of leveling and focusing measurement accuracy affected by IC technological structure

假设均匀照明投影光栅,光从空气到光刻胶的反射系数为  $r_0$ ,透射系数为  $t_0$ ,从光刻胶到空气的反射系数为  $r_1$ ,透射系数为  $t_1$ ,从光刻胶到基底的反射系数为  $r_2$ ,透射系数为  $t_2$ 。假设硅片位于参考零点位置,根据光路可逆原理,探测光栅上某一点(如图 3 红色粗光束所示)的光由投影光栅上 0 号主光线反射光、1 号主光线的 1 次反射光、2 号主光线的 2 次反射光等合成,该点的复振幅包括:



$$E_0 = E_P(x_P)r_0, \quad (10)$$

$$E_1 = E_P(x_P + \Delta x_2)t_0r_2t_1 \exp(i\varphi), \quad (11)$$

$$E_2 = E_P(x_P + 2\Delta x_2)t_0r_2r_1r_2t_1 \exp(i2\varphi), \quad (12)$$

.....

$$E_n = E_P(x_P + n\Delta x_2)t_0r_2(r_1r_2)^{n-1}t_1 \exp(in\varphi), \quad (13)$$

式中,  $\Delta x_2$  为相邻反射光束之间的距离,  $\Delta x_2 = 2d \tan \theta_1 \cos \theta_0$ ,  $\varphi$  为相邻两束光的相位差,  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [2n_1 d \cos(\theta_1)]$ ,

其中,  $d$  为光刻胶厚度,  $\theta_1$  为空气与光刻胶界面的折射角,  $\theta_1 = \arcsin \left[ \frac{n_0}{n_1} \sin(\theta_0) \right]$ , 式中  $\theta_0$  为光束入射角度。

结合硅片表面高度变化公式[(1)式]、投影光栅的复振幅分布公式[(3)式]和非涅耳公式, 在探测光栅上某一位置处 o 光和 e 光的复振幅分布为:

$$E_{(os,op)}(x_d) = \text{rect} \left( \frac{x_d + \Delta x_1}{NP/2} \right) \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \left( 2\pi \frac{x_d + \Delta x_1}{P} \right) \right] r_{0(os,op)} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \text{rect} \left( \frac{x_d + \Delta x_1 + n\Delta x_2}{NP/2} \right) \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \left( 2\pi \frac{x_d + \Delta x_1 + n\Delta x_2}{P} \right) \right] r_{2(os,op)} (1 - r_{0(os,op)}^2) (-r_{0(os,op)} r_{2(os,op)})^{n-1} \exp(in\varphi) \right\}, \quad (14)$$

$$E_{(es,ep)}(x_d) = \text{rect} \left( \frac{x_d + \Delta x_1}{NP/2} \right) \left[ \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \left( 2\pi \frac{x_d + \Delta x_1}{P} \right) \right] r_{0(es,ep)} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \text{rect} \left( \frac{x_d + \Delta x_1 + n\Delta x_2}{NP/2} \right) \left[ \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \left( 2\pi \frac{x_d + \Delta x_1 + n\Delta x_2}{P} \right) \right] r_{2(es,ep)} (1 - r_{0(es,ep)}^2) (-r_{0(es,ep)} r_{2(es,ep)})^{n-1} \exp(in\varphi) \right\}. \quad (15)$$

o 光和 e 光的复振幅分布公式(14)、(15)式与(5)、(6)式具有不同的表达形式, 将它们代入(8)式和(9)式时, o 光和 e 光的光强不同, 代入(2)式即得到不同的测量高度。2 个测量高度的差异为调焦调平系统的工艺相关性误差。

通过上述分析表明, 工艺相关性误差主要来源于投影光栅像在探测光栅处某点的光强不再单一由该点所对应的投影光栅位置处的透射率决定, 还包括投影光栅上其他点的贡献。这些贡献是测量光在光刻胶涂层内部的多次反射造成的。所有贡献量的复振幅在该点叠加干涉, 形成新的投影光栅像的强度分布。根据三角法和叠栅条纹法测量原理, 硅片高度的测量值完全依赖于测量信号的光强。当信号光强发生变化时, 测量高度随之发生变化, 该变化为工艺相关性测量误差。

## 4 仿真分析和讨论

半导体制造分为前道工艺和后道工艺, 前道工艺主要指晶圆上形成晶体管等器件的过程, 后道工艺主要是器件分离和封装等过程。纳米级光刻工艺主要用于前道工艺之中。前道工艺分为前段工艺(FEOL)和后段工艺(BEOL), FEOL 主要指硅片上生长器件结构的过程, BEOL 主要是金属互联的过程。图 4 给出了 2 种光刻工艺硅片的常见叠层结构, 图 4(a)为 FEOL 工艺示例, 图 4(b)为 BEOL 工艺示例。在调焦调平系统测量光波长范围内, 由于光刻胶与  $\text{SiO}_2$ 、底部抗反射涂层(BARC)的折射率近似, 因此, 对光刻胶、 $\text{SiO}_2$  和 BARC 不做区分, 统一当做光刻胶层。基于图 3 的结构模型, 基底材料分别选取 FEOL 工艺的硅和 BEOL 工艺的铝。

为保证仿真系统参数与实验系统相同, 投影光栅和探测光栅周期均为  $30 \mu\text{m}$ , 采用宽光谱卤素灯光源, 光谱宽度  $600 \sim 1000 \text{ nm}$ , 测量光入射角度为  $70^\circ$ , 远心成像系统的数值孔径为  $0.065$ 。选取 TOK 公司的 PI6133 光刻胶、SHIPLEY 公司的 S1805 光刻胶和  $\text{SiO}_2$  进行仿真, 分析工艺相关性误差随光刻胶厚度和入射角度变化关系, 如图 5(a)所示, PI6133 光刻胶、S1805 光刻胶和  $\text{SiO}_2$  的变化趋势相同, 光刻胶厚度在  $50 \sim 300 \text{ nm}$  范围内, 工艺相关性误差随光刻胶厚度呈周期性变化, 整体呈上升趋势, 工艺相关性误差在  $5 \sim$

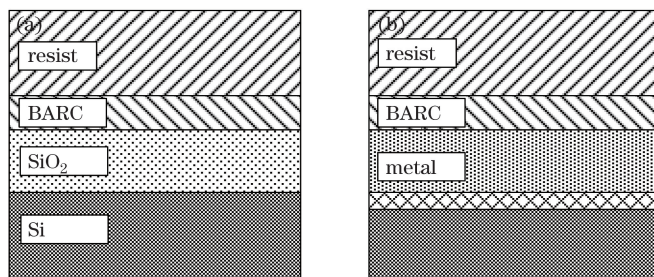


图 4 工艺硅片叠层结构。(a)FEOL 工艺;(b)BEOL 工艺

Fig. 4 Stacked structure of processed silicon wafer. (a) FEOL process; (b) BEOL process

30 nm之间。如图 5(b)所示,铝基底的工艺相关性误差远大于硅基底工艺相关性误差。铝基底的工艺相关性误差在光刻胶厚度 50~150 nm 之间变化较快,光刻胶厚度变化 1 nm 引起的工艺相关性误差约为 1 nm。在光刻机中,通常采用对焦曝光矩阵来校准同一种工艺硅片的工艺相关性误差,但同一工艺硅片上光刻胶厚度的差异仍会产生较大的工艺相关性误差。因此,为减少标定之后残余工艺相关性的误差,需提高光刻胶的涂胶均匀性。

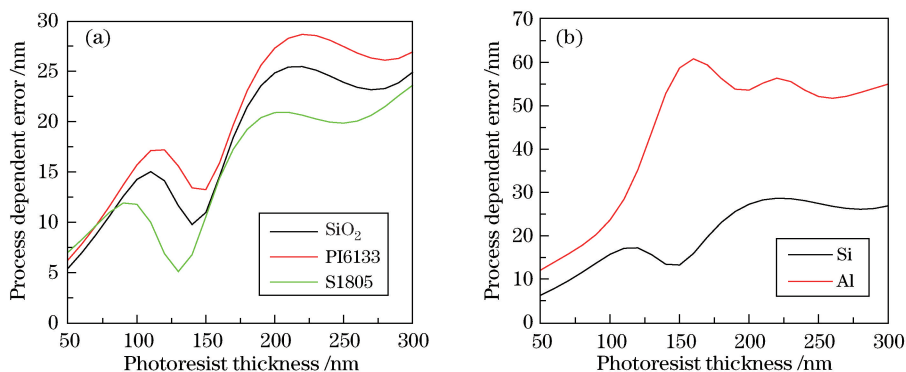


图 5 工艺相关性误差随光刻胶厚度的变化关系曲线。(a)硅基底上不同光刻胶变化曲线;  
(b)PI6133 光刻胶在硅基底和铝基底上变化曲线

Fig. 5 Curves of process dependent error with different photoresist thicknesses.

(a) Curves of different photoresist on substrate Si; (b) curves of PI6133 photoresist on substrate Si and Al

如图 6 所示,不同光刻胶厚度情况下,测量光入射角度在 45°~85°范围内,工艺相关性误差随入射角度的增加而减少,工艺相关性误差变化范围在 0~120 nm 之间。在不进行标定的情况下,为获得尽可能小的工艺相关性误差,可调整调焦调平系统的测量光入射角度至 80°~85°范围内。如对工艺相关性误差进行标定,为减弱入射角度变化对标定之后残余的工艺相关性的误差,需减少光刻胶表面的起伏,并以尽量小的入射光张角入射到硅片表面。

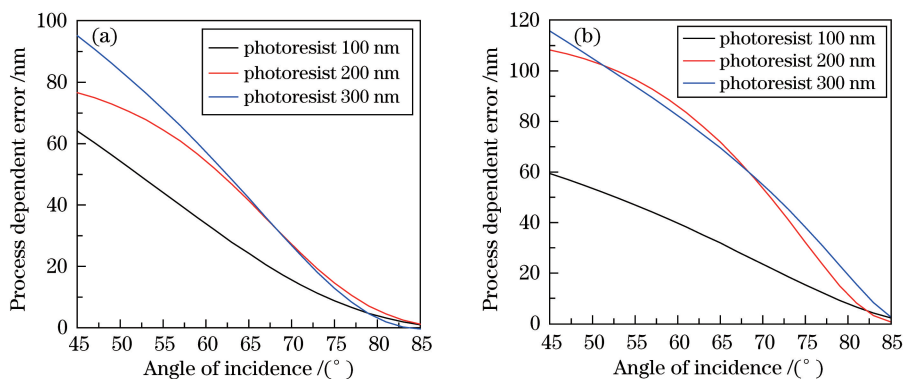


图 6 工艺相关性误差随入射角度的变化关系曲线。(a)基底为硅;(b)基底为铝

Fig. 6 Curves of process dependent error with different angles of incidence. (a) Substrate is Si; (b) substrate is Al

## 5 实验验证

### 5.1 实验装置与测试样品

调焦调平系统工艺相关性测量误差的验证实验,在自行研制的实验平台上进行,如图 7 所示。系统参数与上述仿真系统相同,单个测量光斑尺寸:2.9 mm×2.5 mm,探测器为定制硅探测器对。硅片放置在纳米级位移台上(PI P562.6CD),位移台垂直方向运动范围为 200 μm,线性度为 0.01%,分辨率为 1 nm。为了保证局部温度、湿度和气流稳定性,整套装置放置在密封罩内,装置的底部采用气浮隔振,消除地基振动对测量系统的影响,提高实验系统的稳定性。实验系统的重复性精度优于 10 nm。测量光斑之间参考零点差异小于 200 nm。

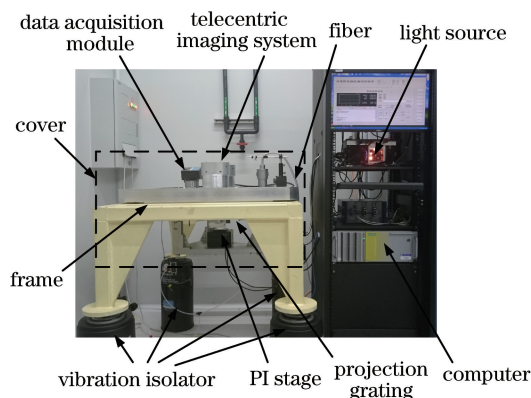


图 7 调焦调平实验验证装置

Fig. 7 Focusing and leveling experimental setup

8 个测试样品如图 8(a)所示,工艺参数如表 1 所示。在 2 英寸(1 inch=2.54 cm)本征硅片上涂光刻胶,经过曝光、显影和烘干之后,硅片上一半存在光刻胶,另一半为裸硅片。一个裸硅片用于校准各个测试光斑的差异。测量时,假设裸硅片对光的反射为理想镜面反射。硅片样品测量光斑位置和尺寸如图 8(b)所示,1 号光斑和 2 号光斑的尺寸均为 2.9 mm×2.5 mm。

表 1 工艺硅片参数

Table 1 Parameters of processed silicon wafer

Wafer	Substrate	Resist type	Photoresist thickness /nm
Calibration	Si		
Process No.1	Si	S1805	48.2
Process No.2	Si	S1805	108.3
Process No.3	Si	S1805	293.0
Process No.4	Si	S1805	371.1
Process No.5	Si	S1805	615.2
Process No.6	Si	SiO <sub>2</sub>	211.5
Process No.7	GaAs	S1805	110.2

采用台阶仪(Dek tak 150)分别测量 8 个硅片上测量光斑区域的高度,每个测量光斑区域测量 5 条线,间隔约 0.5 mm,5 条线的平均值作为该测量光斑区域的高度值。台阶仪测量重复性 0.6 nm,分辨率 0.1 nm。分别测量涂胶之前和涂胶之后的测量光斑区域的高度值,该高度差认为是光刻胶厚度。

### 5.2 IC 工艺对调焦调平测量精度的影响

评估硅片工艺对调焦调平系统测量精度影响的测试流程如图 9 所示。使用调焦调平系统的 2 个测量光斑,1 号测量光斑测量未涂覆光刻胶区域,2 号光斑测量涂覆光刻胶区域。由于调焦调平测量系统的成像镜头畸变等因素影响,不同光斑所对应的参考零点高度略有不同,测量前利用校准硅片校准 2 个测量光斑之间的差异,并记录 1 号和 2 号光斑的零点高度值  $h_{01}$  和  $h_{02}$ 。为了减少测量误差,标定参考零点前,调整位移台,使校准硅片的倾斜趋近于零。然后更换工艺硅片,重新调整硅片倾斜,移动位移台寻找 1 号测量光斑的参考

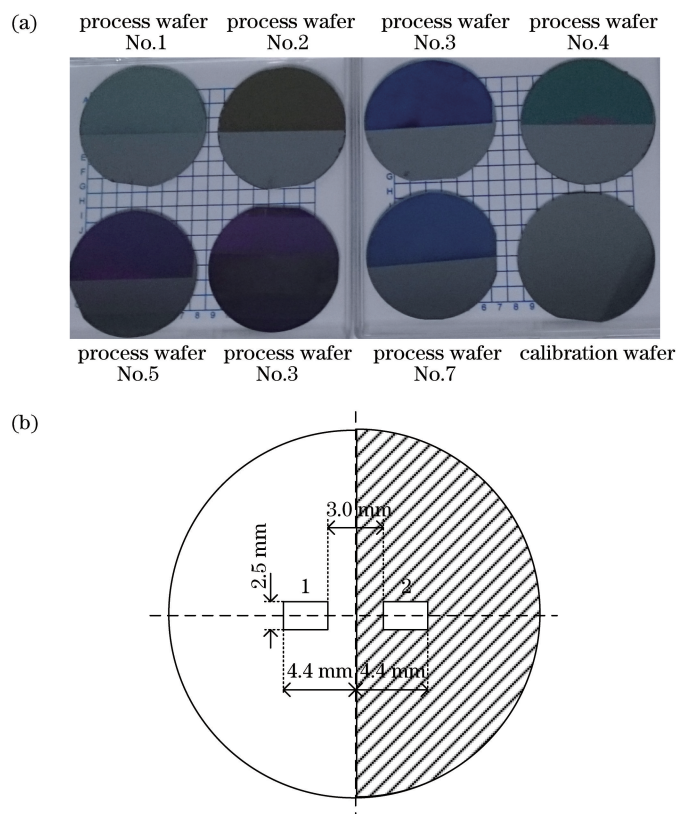


图 8 (a) 硅片测试样品; (b) 硅片测量光斑位置

Fig. 8 (a) Test silicon wafer samples; (b) position of measurement spot on silicon wafer

零点位置,保证工艺硅片和校准硅片的倾斜状态和位置高度相同。记录 1 号光斑的零点高度值  $h_1$ 。接着,根据表 1 中 1 号和 2 号光斑位置区域有光刻胶厚度时的高度差数据,控制位移台移动,从而使工艺硅片的 2 号测量光斑区域上表面位于参考零点位置,记录 2 号光斑的零点高度值  $h_2$ 。IC 工艺引起的测量误差为  $(h_2 - h_1) - (h_{02} - h_{01})$ 。

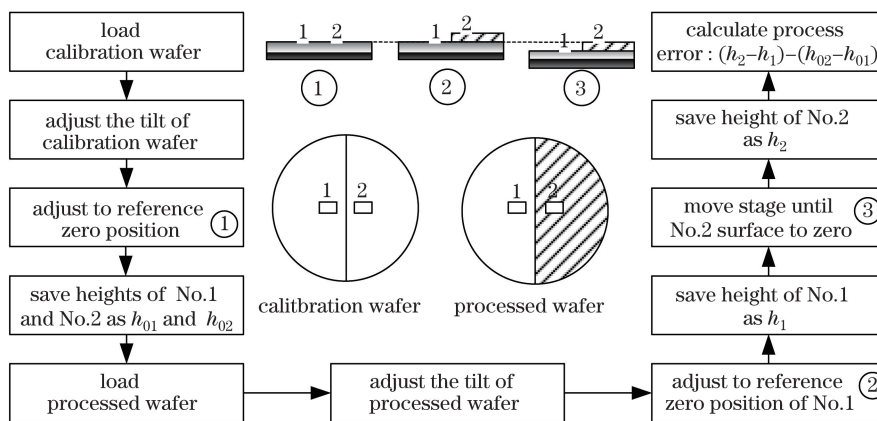


图 9 测试流程图

Fig. 9 Figure of testing process

控制位移台在  $Z$  方向运动,分别得到 8 个硅片样品的  $o$  光与  $e$  光光强原始信号随位移台位置变化关系如图 10(a)所示。取图 10(a)中线性度较好的  $\pm 1.25 \mu\text{m}$  范围作为调焦调平系统的线性工作范围。为减少测量光斑之间参考零点差异的影响,取线性范围内的  $\pm 1 \mu\text{m}$  范围内数据,1 号测量光斑和 2 号光斑的测量高度差异如图 10(b)所示,该高度差异已经排除 1 号和 2 号测量光斑区域物理高度差。可见,1 号和 2 号测量高度差异随硅片高度的不同而不同,这是由于利用(2)式计算光斑 1 和光斑 2 的高度时,2 个光斑的比例系数  $G$  不同造成的。分别对比 7 个工艺硅片与校准裸硅片,得到每个硅片在不同高度时的工艺相关性误



差,测量值与理论值如图 10(c)所示。可见,当光刻胶厚度一定时,线性范围内测量误差均随硅片高度的变化趋势不明显。但有明显的整体高度偏移,该高度偏移的大小与光刻胶厚度没有单调递增或递减关系。

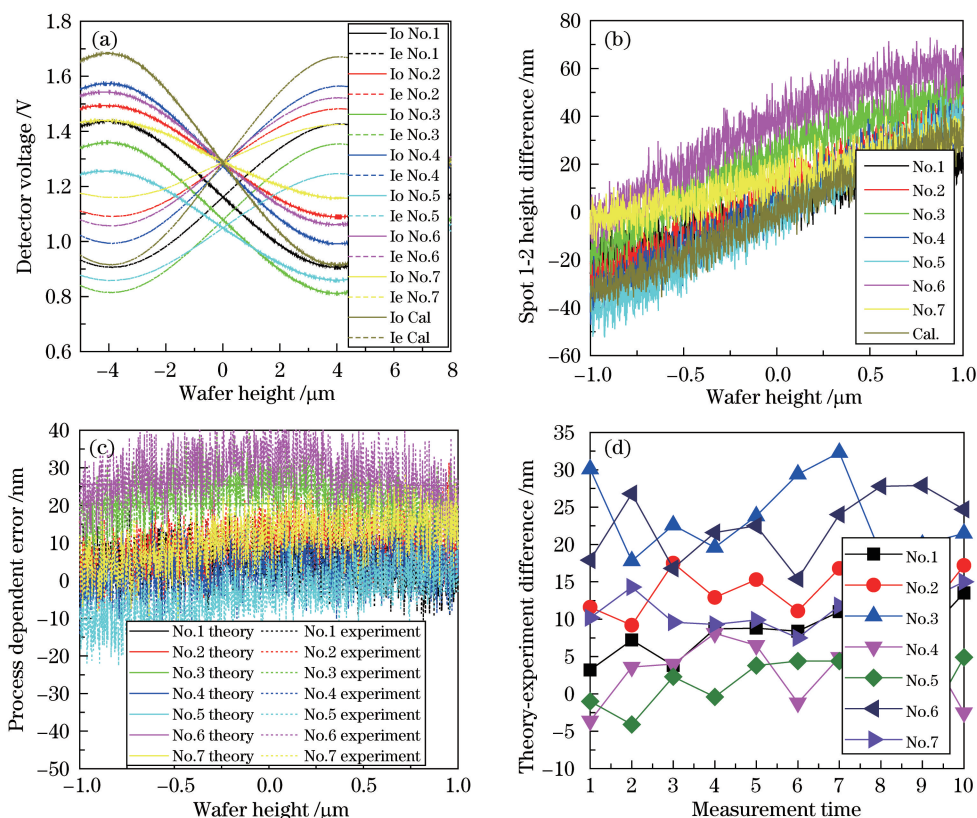


图 10 (a)不同光刻胶厚度下探测器输出原始电压信号;(b)1号光斑和2号光斑测量高度差;  
(c)不同光刻胶厚度下工艺相关性误差的理论值与实验值;(d)10次实验数据

Fig. 10 (a) Original voltage signal from detector under different photoresist thicknesses;  
(b) measuring height difference between spot 1 and spot 2; (c) process dependent error of theory and  
experiment under different photoresist thicknesses; (d) experimental data of 10 experiments

由于测量时实验装置受到气流、振动、杂散光等因素影响,图 10(b)和(c)的测量值存在抖动。因此,采用硅片高度 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内 2000 个采样点的平均值来评估实验数据与理论数据差异。重复实验 10 次,每次实验数据的平均值如图 10(d)所示。选择其中 5 个 S1805 光刻胶的硅片样品,每个硅片 10 次测量平均值与图 5(a)的仿真数据对比如图 11 所示,实验结果与理论仿真结果一致。8 个硅片样品 10 次测量的平均值和标准差如表 2 所示,理论计算值与实验测量平均值的差异小于 6 nm。

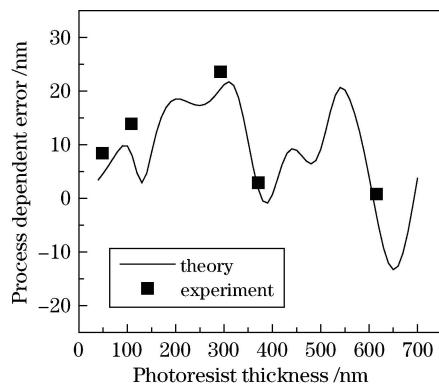


图 11 实验数据与仿真数据对比图

Fig. 11 Comparison between experimental data and simulative data



表 2 不同工艺硅片样品理论值与测量值差异

Table 2 Theory-experiment difference under different processed silicon wafer samples

Wafer	Theory /nm	Experiment		Theory-experiment difference (mean) /nm
		Mean /nm	Sigma /nm	
No.1	4.4	8.4	3.2	4.0
No.2	8.4	13.9	3.2	5.4
No.3	20.5	23.6	5.2	3.1
No.4	1.6	2.9	4.1	1.3
No.5	-3.1	0.8	3.7	3.9
No.6	25.5	22.5	4.6	-3.0
No.7	8.2	11.4	2.5	3.2

## 6 结 论

在纳米光刻中,硅片上的 IC 工艺显著影响调焦调平系统的测量精度。基于实际的调焦调平光学系统模型和三角法、叠栅条纹法测量原理,提出一种调焦调平系统工艺相关性理论模型。该模型认为:工艺相关性误差主要来源于投影光栅像在探测光栅处某点的光强不再单一由该点处投影光栅的透射率决定,还包括投影光栅上其他点的贡献。这些贡献是测量光在光刻胶涂层内部的多次反射引起的。选取 TOK 公司的 PI6133 光刻胶、SHIPLEY 公司的 S1805 光刻胶和  $\text{SiO}_2$  进行仿真分析,3 种光刻胶的工艺相关性误差随光刻胶厚度变化趋势相同,随光刻胶厚度(50~300 nm)的增加呈周期性变化,随入射角( $45^\circ\sim 85^\circ$ )的增大而减小。搭建了调焦调平系统工艺相关性实验验证平台,测量了不同基底、不同光刻胶型号和不同光刻胶厚度的 7 种工艺硅片,实验结果与理论仿真结果一致,实验测量值与理论模型计算值差异统计平均值小于 6 nm。分析表明,在不进行标定的情况下,为获得尽可能小的工艺相关性误差,应以尽可能大的入射角入射到硅片表面。如对工艺相关性误差进行标定,为减少标定后残余的工艺相关性误差,需减小入射到硅片表面的入射光张角和提高光刻胶的涂胶均匀性。

## 参 考 文 献

- Alagna P, Zurita O, Timoshkov V, *et al.* Optimum ArFi light source bandwidth for 10 nm node logic imaging performance[C]. SPIE, 2015, 9426: 942609.
- Bouchoms I, Leenders M, Kuit J J, *et al.* Extending 1.35 NA immersion lithography down to 1x nm production nodes [C]. SPIE, 2012, 8326: 83260L.
- Yao Hanming, Hu Song, Xing Tingwen. Guangxue touying baoguang weina jiagong jishu [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 61-62.  
姚汉明, 胡 松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 61-62.
- Zeng Aijun, Wang Xiangchao, Xu Deyan. Progress in focus and level sensor for projection lithography system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(7): 24-30.  
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.
- Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Polarization modulation technology for a position sensor with grating imaging[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1397-1401.  
胡建明, 曾爱军, 王向朝. 光栅成像位置传感器中的偏振调制技术[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1397-1401.
- Feng Jinhua, Hu Song, Li Yanli, *et al.* Nano focusing method based on moire fringe phase analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212005.  
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.
- Yan Wei, Li Yanli, Chen Mingyong, *et al.* Moire fringebased focusing-test scheme for optical projection lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0805001.  
严 伟, 李艳丽, 陈铭勇, 等. 基于光栅叠栅条纹的纳米检焦方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0805001.
- Yang Guishuan, Chen Tao, Zhang Zhifeng. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708004.  
杨桂栓, 陈 涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7):

0708004.

- 9 Geng Yunfei, Chen Xi, Jin Wen, *et al.* Influence of seawater refractive index on the precision of oil film thickness measurement by differential laser triangulation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408004.  
耿云飞, 陈曦, 金文, 等. 海水折射率对差分激光三角法油膜厚度测量精度的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408004.
- 10 van der Werf J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. J Vac Sci Technol B, 1992, 10(2): 735-740.
- 11 Smith D G. Wafer thin film effects in lithographic focus detection[C]. SPIE, 2012, 8550: 85503L.
- 12 Hidaka Y, Uchikawa K, Smith D G. Error analysis and compensation method of focus detection in exposure apparatus [J]. Optical Society of America A, 2009, 26(1): 10-18.
- 13 Teunissen P A A, Broodbakker P J M, Queens R M G J. Lithographic apparatus, level sensor, method of inspection, device manufacturing method, and device manufactured thereby: US, 7646471[P]. 2010-01-12.
- 14 Den Boef A H, Benschop J P H, Brinkhof R, *et al.* Level sensor, lithographic apparatus, and substrate surface positioning method: US, 8675210[P]. 2014-03-18.
- 15 Sun Yuwen, Li Shiguang, Zong Mingcheng. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0512002.  
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.