

# 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术

孙裕文<sup>1,2,3</sup> 李世光<sup>1,2,3</sup> 宗明成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微电子研究所, 北京 100029

<sup>2</sup>中国科学院微电子研究所微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029

<sup>3</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, 调焦调平系统的测量精度达到几十纳米。在纳米尺度范围内, 集成电路(IC)工艺对调焦调平测量精度的影响很大。提出一种基于光学三角法和叠栅条纹法的调焦调平测量技术, 利用空间分光系统将两组位相差为  $\pi$  的叠栅条纹同时成像到两个探测器上, 通过归一化差分的方法计算硅片高度, 可有效降低调焦调平测量技术对 IC 工艺的敏感度, 尤其是 IC 工艺导致的光强变化的敏感性。实验结果表明, 该系统测量重复性精度为 8 nm( $3\sigma$ ), 线性精度为 18 nm( $3\sigma$ )。当测量光强变化达 90% 时, 该测量技术引起的线性精度变化为 15 nm( $3\sigma$ ); 当光强变化为 65% 时, 线性精度变化小于 1 nm( $3\sigma$ )。

**关键词** 测量; 调焦调平; 空间分光; 硅片高度; 集成电路工艺

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0512002

## Nanoscale Focusing and Leveling Measurement Technology Based on Optical Spatial Split

Sun Yuwen<sup>1,2,3</sup> Li Shiguang<sup>1,2,3</sup> Zong Mingcheng<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

<sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** With the development of semiconductor manufacturing to 1x nm technological node, the measurement accuracy of the focusing and leveling system is down to several tens of nanometers. In the range of nanoscale, integrated circuit (IC) process plays an important impact on the measurement accuracy of the focusing and leveling system. A kind of focusing and leveling measurement technology based on optical triangulation and moiré fringes method is proposed. Two sets of moiré fringes with  $\pi$  phase difference are imaged onto two detectors using the spatial splitting system. The height of wafer is calculated by normalized differential method. The sensitivity of the system on the IC process, especially on the light intensity fluctuations is reduced. Experimental results show that the measurement repeatability of the system is 8 nm ( $3\sigma$ ) and the linear accuracy is 18 nm ( $3\sigma$ ). When the light intensity fluctuates 90%, the linear accuracy changes 15 nm ( $3\sigma$ ). When the light intensity fluctuates 65%, the linear accuracy changes less than 1 nm ( $3\sigma$ ).

**Key words** measurement; focusing and leveling; spatial split; silicon wafer height; integrated circuit process

**OCIS codes** 120.3940; 120.4120; 220.3740; 050.2770

## 1 引 言

光刻技术是集成电路(IC)制造的核心技术,随着大规模集成电路的发展,光刻机的分辨力逐步提高。通

收稿日期: 2015-12-14; 收到修改稿日期: 2016-01-07

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)

过缩短曝光波长和增大投影物镜的数值孔径可显著提高光刻分辨力,但同时导致可用焦深明显下降<sup>[1]</sup>。为解决可用焦深变小而带来的离焦问题,先进光刻机采用调焦调平技术调节硅片曝光区域位于最佳焦平面上。调焦调平技术主要包括测量技术和硅片实时控制技术。其中,调焦调平测量技术对硅片表面高度进行测量,其测量数据用于控制位于光刻机硅片曝光区域的最佳焦平面上。随着半导体制造步入1x nm技术节点时代,光刻机的对焦控制精度只有60~80 nm<sup>[2-3]</sup>。因此,研制具有纳米级精度的调焦调平测量技术对保证曝光质量具有重要意义。

目前,国际主流光刻机厂商 Nikon、Canon、ASML 的调焦调平测量技术均基于光学三角法原理,测量光将不同的投影标记以大入射角投射到硅片表面,反射光携带硅片高度信息被探测器接收,通过探测器上的光强或光斑位置变化来计算硅片高度<sup>[4]</sup>。在纳米尺度范围内,IC 工艺对调焦调平系统测量精度影响很大。IC 工艺可改变测量光信号的振幅、光谱、位相和偏振态,从而引起测量误差<sup>[5-6]</sup>。由于 IC 工艺具有随机性和不可预见性,因此调焦调平测量技术对 IC 工艺的适应性成为了评价该技术实用性的重要指标。为克服 IC 工艺引起的硅片反射率变化对测量光信号振幅的影响,Nikon 利用振动反射镜将探测的直流光强信号调制为交流信号,提高了光路的抗干扰能力<sup>[7]</sup>;Canon 在光路中加入光学校正系统,保证探测器上成像稳定<sup>[8]</sup>;ASML 采用归一化分时差分的方法测量硅片高度,克服光强波动影响<sup>[9-11]</sup>。具体实现时,偏振分光晶体将测量光分为两束偏振态相互垂直的光束,这两束光可以产生两组位相差  $\pi$  的叠栅条纹,光弹调制器将这两组叠栅条纹分时成像在探测器上,进行探测和信号处理<sup>[12-17]</sup>。在该方法中,光弹调制器的引入会带来以下问题:1)探测器分时探测不同偏振方向光强,在测量高速运动的硅片时易引入测量误差;2)光弹调制器为有源器件,发出热量会对光刻机内环境造成影响;3)光弹调制器的后端解调电路复杂,会显著增加处理电路的设计复杂度。

本文提出一种基于空间分光的调焦调平测量技术,采用空间分光系统将两组叠栅条纹空间分开,通过归一化光学差分的方法测量硅片高度,有效降低调焦调平系统对光强波动的敏感性,具有无差分信号时延、对光刻机环境影响较小、后端解调电路简单等特点。详细阐述基于空间分光的调焦调平测量技术的基本原理,并采用渥拉斯顿棱镜作为空间分光元件搭建了实验验证系统,实验验证了系统性能及光强变化对测量精度的影响。

## 2 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 为检测光栅, C1、C2 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  $\hat{n}$ 。从投影光栅出射的平行光束以入射角  $\alpha$  投射到硅片表面,被硅片反射后到达检测光栅。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)位置将在检测光栅处产生  $\Delta x$  偏移。由几何关系可知,硅片高度变化量  $h$  与偏移量  $\Delta x$  的关系为

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

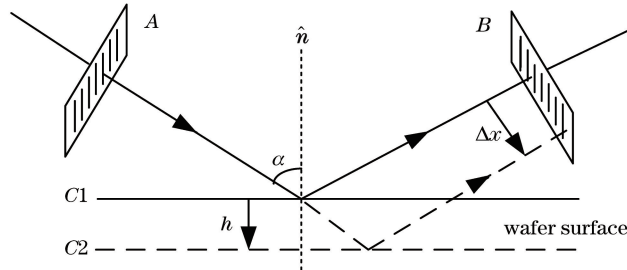


图 1 调焦调平测量技术基本原理

Fig. 1 Basic principle of focusing and leveling measurement technology

当入射角  $\alpha$  恒定且已知时,通过测量检测光栅处光束的偏移量  $\Delta x$ ,便可获得硅片表面的高度变化量  $h$ 。实际应用中,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检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、硅片和检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检测光栅上。这种变化不改变测量原理,但测量精度得到极大地提高。

图 2 为基于空间分光的调焦调平测量系统示意图。一照明光源均匀照射到投影光栅上,投影光栅经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,经过另一双远心光学系统再次成像到检测光栅上。投影光栅像与检测光栅叠加形成叠栅条纹。当被测硅片表面发生起伏时,叠栅条纹发生变化。

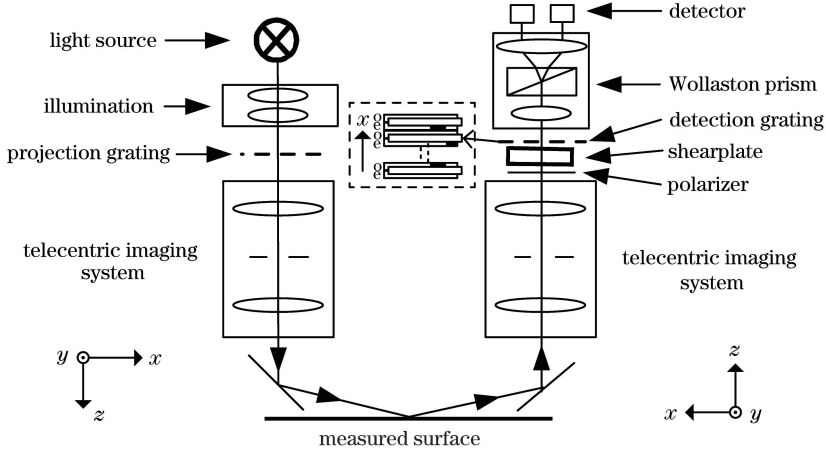


图 2 基于空间分光的调焦调平测量系统光路示意图

Fig. 2 Optical schematic of focusing and leveling measurement system based on spatial optical split

为了对光学信号进行光学差分,在检测光栅前加入偏振片和分光晶体。偏振片使入射光成为线偏振光,分光晶体将投影光栅像分为偏振方向相互垂直的 o 光与 e 光,两偏振图像在垂直光栅方向上错位半个光栅周期。两束投影光栅像与检测光栅分别叠加,形成两组叠栅条纹,如图 2 中小图所示。调整偏振片的透光轴与分光晶体光轴夹角,使硅片在参考零位高度时,o 光与 e 光的光强相等。一成像光学系统位于检测光栅后方,将叠栅条纹成像在光电探测器上。渥拉斯顿棱镜置于该成像系统中间,将两种不同偏振态的叠栅条纹在空间完全分开,并分别成像到两个完全对称的探测器上。探测器将 o 光与 e 光光强信号转换为电流信号,经过信号放大和转换,传输到计算机上进行计算和存储。

### 3 理论分析

如图 2 所示,假设垂直于光栅刻线方向的坐标轴为  $x$  轴,光轴方向为  $z$  轴,光轴垂直通过投影光栅中心。投影光栅为振幅型光栅,其复振幅透射率为

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

式中  $P$  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的前焦面上。假设投影光栅表面入射光强为单位强度,在远心系统的第一个透镜(组)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,在远心系统的后焦面(投影光栅像面、硅片表面)得到的复振幅分布为

$$E_w(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + 2 \text{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x}{P}\right) \right]. \quad (3)$$

在硅片和检测光栅之间的远心系统与硅片和投影光栅之间的远心系统相同,则在检测光栅表面得到的复振幅分布为

$$E_d(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + 2 \text{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x+\Delta x}{P}\right) \right]. \quad (4)$$

经过分光晶体后 o 光和 e 光的复振幅分布分别为

$$E_o(x) = \frac{c}{2} \left[ 1 + 2 \text{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x+\Delta x}{P}\right) \right], \quad (5)$$

$$E_e(x) = \frac{c}{2} \left[ 1 + 2 \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x + \Delta x + P/2}{P}\right) \right], \quad (6)$$

式中  $c$  为(偏振片+分光晶体)组件的透射率。

检测光栅与投影光栅相同,检测光栅的刻线方向和  $x$  轴垂直,检测光栅的中心位置相对于远心系统的光轴在  $x$  方向上移动四分之一周期,即检测光栅的透射率为

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

两个投影光栅像与检测光栅叠加形成的叠栅条纹信号为

$$I_o = \int_{-\infty}^{+\infty} |E_o(x)t_d(x)|^2 dx = \left(N - \frac{|\Delta x|}{P}\right) \frac{c}{4} \left\{ \frac{P}{2} \left[ 1 + 2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\right) \right] + \frac{4P}{\pi} \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{P} \Delta x\right) \right\}, \quad (8)$$

$$I_e = \int_{-\infty}^{+\infty} |E_e(x)t_d(x)|^2 dx = \left(N - \frac{|\Delta x|}{P}\right) \frac{c}{4} \left\{ \frac{P}{2} \left[ 1 + 2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\right) \right] - \frac{4P}{\pi} \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{P} \Delta x\right) \right\}. \quad (9)$$

根据(1)、(8)和(9)式,得到  $o$  光与  $e$  光光强随硅片表面变化曲线如图 3 所示。这两个光强信号被渥拉斯顿棱镜在空间完全分开,分别被两个探测器探测。

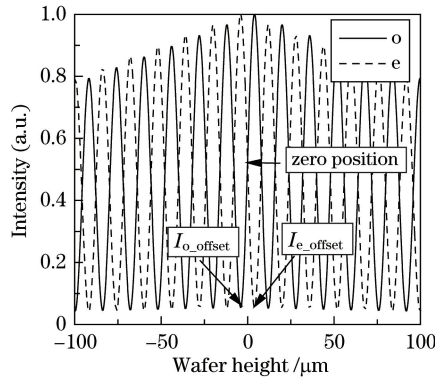


图 3  $o$  光和  $e$  光的光强随硅片高度变化仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of  $I_o$  and  $I_e$  versus Silicon wafer height

根据 SEMI MF657-0707E 标准,0.3 m 的标准硅片其厚度变化范围在  $\pm 1.25 \mu\text{m}$  以内。设调焦调平测量系统线性范围为  $\pm 1.25 \mu\text{m}$ ,在此范围内,硅片高度的计算公式为

$$h = G \frac{(I_e - B_e) - (I_o - B_o)}{(I_e - B_e) + (I_o - B_o)}, \quad (10)$$

式中  $I_e$  和  $I_o$  分别为  $e$  光和  $o$  光光强;  $B_e$  与  $B_o$  为存在光信号时  $e$  光和  $o$  光探测器处的背景噪声,可近似为图 3 中参考零平面附近一个光栅周期内  $e$  光与  $o$  光光强的最小值;  $G$  为比例系数,它与光栅周期、光束入射角的关系为

$$G = \frac{P/4}{2 \sin \alpha}. \quad (11)$$

方便起见,将  $\frac{(I_e - B_e) - (I_o - B_o)}{(I_e - B_e) + (I_o - B_o)}$  简写为  $h_{\text{raw}}$ 。实际工作中,为了获得更加精确的测量结果,  $h$  通常采用  $h_{\text{raw}}$  的  $n$  阶多项式拟合获得。

## 4 实验装置及实验结果

### 4.1 实验装置

为验证基于空间分光的调焦调平测量技术的性能,自行研制一套实验验证系统,如图 4 所示。在超净间环境中(万级,温度:  $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ),光源为宽光谱卤素灯,投影光栅和检测光栅的光栅周期为  $30 \mu\text{m}$ ,光束的入射角度为  $70^\circ$ ,探测器为定制硅探测器对,高平面度(面型:  $\lambda/20$ )的标准反射镜作为被测表面,放置在纳米级



位移台(PI P562.6CD)上。位移台垂直方向运动范围为 200  $\mu\text{m}$ ,线性度为 0.01%,分辨力为 1 nm。整套装置放在密封罩内,保证局部温度、湿度和气压的稳定,装置的最底部采用气浮隔振,消除地基振动对测量系统的影响,提高实验验证系统的稳定性。

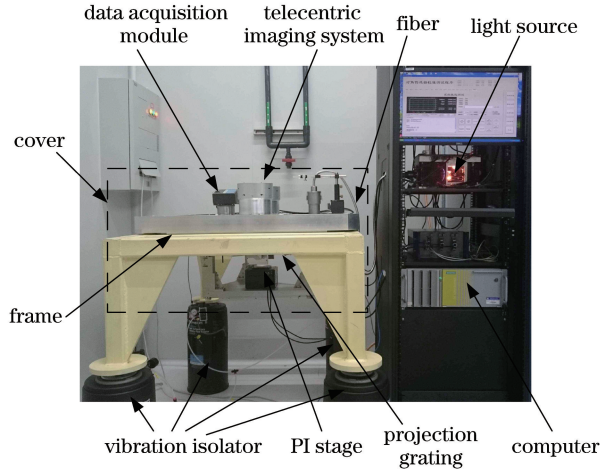


图 4 调焦调平实验验证装置

Fig. 4 Experimental setup of focusing and leveling

#### 4.2 基于空间分光的调焦调平测量系统性能

控制位移台在  $Z$  方向运动,  $o$  光与  $e$  光光强随位移台位置变化关系如图 5 所示。为了评估光强变化对测量精度的影响,实验中光源的驱动电压分别设置为 4.2、8.4、12.6 和 14 V。

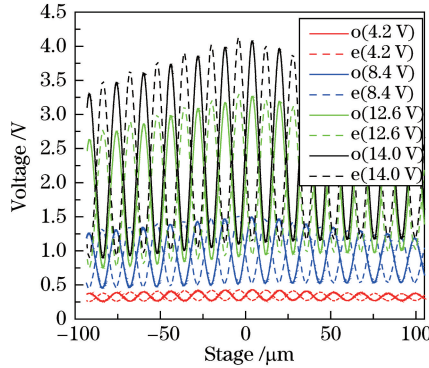


图 5 不同光源驱动电压下探测器输出的原始  $I_o$ 、 $I_e$  电压信号

Fig. 5 Original voltage signals of  $I_o$  and  $I_e$  from detector under different driving voltages of light source

选取驱动电压为 14V 的测量信号,在调焦调平系统参考零点附近得到  $h_{\text{raw}}$  曲线,如图 6(a)所示,实验曲线与理论曲线一致,验证了理论分析的正确性。在线性范围内,实验曲线采用 5 阶多项式拟合,得到硅片高度(此处即为位移台移动高度)与  $h_{\text{raw}}$  关系曲线如图 6(b)所示。根据该拟合曲线和  $h_{\text{raw}}$  值,即可得到硅片高度  $h$ ,其中拟合曲线关系式为

$$h = 1.352 h_{\text{raw}}^5 + 0.4887 h_{\text{raw}}^4 - 0.6435 h_{\text{raw}}^3 - 0.2197 h_{\text{raw}}^2 - 2.749 h_{\text{raw}} \quad (12)$$

将双抛光的硅片放置在位移台上,保持在调焦调平测量系统参考零点位置,以 1 kHz 频率连续采集 30 s 的高度信号,得到图 7(a)。由图可知,该系统的重复性精度为 8.4 nm( $3\sigma$ )。在线性区间  $\pm 1.25 \mu\text{m}$  范围内,调焦调平测量高度  $h$  和测量硅片表面真实高度之间的关系如图 7(b)黑色曲线所示,图 7(b)中红色曲线为调焦调平测量高度与硅片表面真实高度之差,可见线性范围内测量精度为 18.2 nm( $3\sigma$ )。

#### 4.3 光强变化对调焦调平测量精度的影响

在调焦调平系统中,IC 工艺的多样性会导致硅片表面反射率变化,从而引起测量光强变化。典型 IC 工艺中,工艺引起硅片表面反射率变化在 90% 以内。实验通过改变光源驱动电压来调整信号光强,验证该技术对光强变化的敏感性。

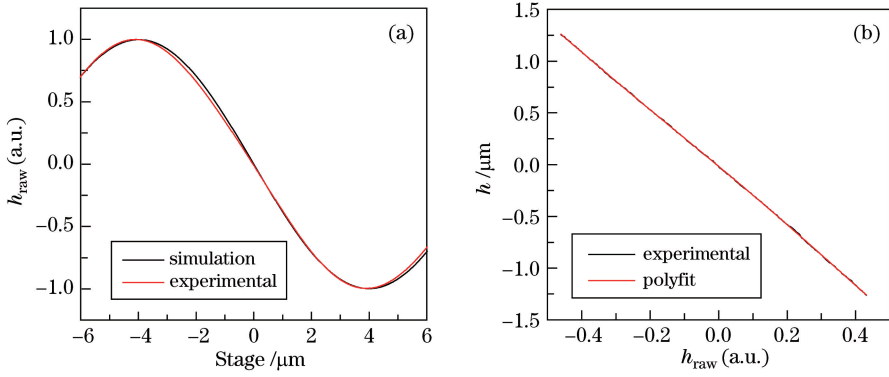


图 6 (a)  $h_{\text{raw}}$  随位移台高度变化关系;(b)线性范围内多项式拟合曲线

Fig. 6 (a)  $h_{\text{raw}}$  versus stage height; (b) polynomial fitting curve within the linear range

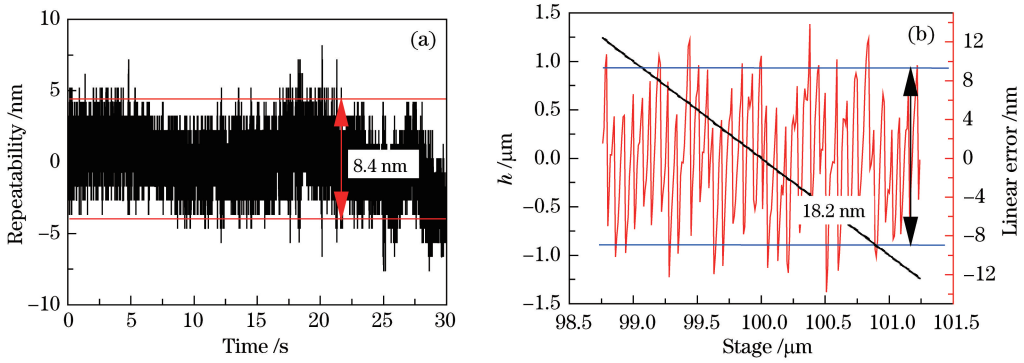


图 7 系统性能。(a)重复性;(b)线性精度

Fig. 7 System performance. (a) Repeatability; (b) linear accuracy

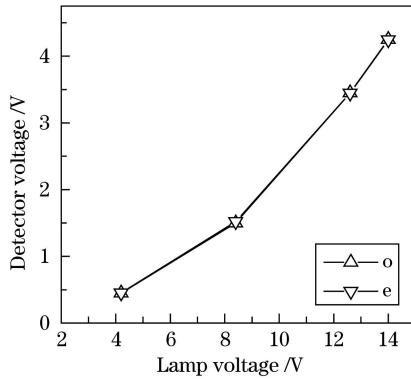


图 8 探测器输出光信号与光源驱动电压的关系

Fig. 8 Relationship between detector output signal and driving voltage of light source

假设系统其他条件不变,光源驱动电压与信号光强的关系如图 8 所示。当驱动电压从 14 V 下降到 4.2 V 时,探测器光强信号从 4.24 V 下降到 0.45 V。设驱动电压为 14 V 时模拟信号光强最大的情况,则当驱动电压为 4.2 V 时,光强信号  $0.45/4.24 \approx 0.1$ ,即本实验考察光强信号变化 90% 时,调焦调平系统测量精度的变化情况。 $I_o$ 、 $I_e$  的原始信号如图 5 所示, $h_{\text{raw}}$  如图 9(a) 所示。

将图 9(a) 虚线框内曲线放大,得到零点附近不同电压下  $h_{\text{raw}}$  的极值及其位置如表 1 所示,其中  $h_{\text{raw}}$  峰谷间距离即为信号的半周期。由表 1 可知,不同电压下  $h_{\text{raw}}$  的幅值不变,为  $\pm 1$ 。峰谷间距离的标准偏差为  $0.056 \mu\text{m}$ ,仅占理论值  $7.981 \mu\text{m}$  [(11) 式] 的 0.7%。峰谷间距离的数值与电压之间没有明显关系,应是非光强因素造成,因此可认为信号的幅值和周期对光强变化均不敏感。

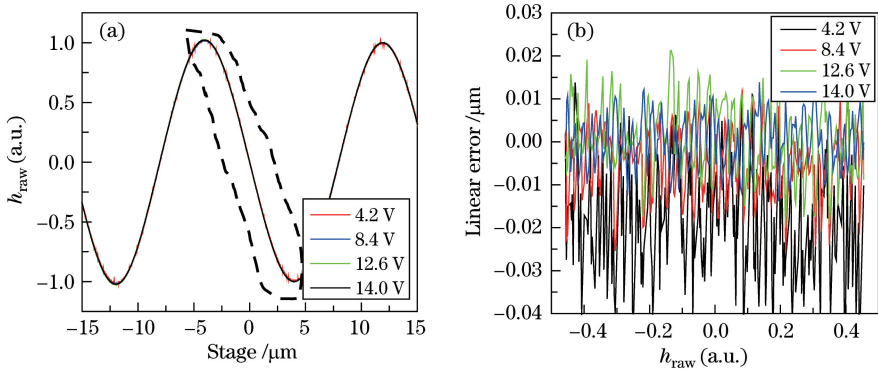


图 9 (a)不同驱动电压下的  $h_{raw}$  曲线;(b)不同驱动电压下的线性精度

Fig. 9 (a)  $h_{raw}$  curve under different driving voltages; (b) linear accuracy under different driving voltages

表 1 不同电压下  $h_{raw}$  的极值及位置

Table 1 Extremum and position of  $h_{raw}$  under different driving voltages

Driving voltage /V	Max ( $h_{raw}$ )	Min ( $h_{raw}$ )	Max-min ( $h_{raw}$ )	Max position / $\mu\text{m}$	Min position / $\mu\text{m}$	Max-min / $\mu\text{m}$
4.2	1.0000	-1.0000	2.0000	-4.0066	4.0283	8.0349
8.4	1.0108	-0.9892	2.0000	-4.1023	3.8646	7.9669
12.6	1.0139	-0.9863	2.0002	-4.0808	4.0016	8.0824
14.0	1.0189	-0.9892	2.0081	-4.1308	3.8376	7.9684

将图 9(a)虚线框内曲线进行 5 阶多项式拟合,根据拟合系数和  $h_{raw}$  值,计算出硅片高度  $h$ 。为评估不同电压时硅片高度的变化,分别计算不同光强情况下的调焦调平系统的线性精度,测量结果如图 9(b)所示,统计结果如表 2 所示。以 14 V 时的计算高度曲线为参照,当光强变化 65%时,±1.25  $\mu\text{m}$  线性范围内测量精度变化小于 1 nm( $3\sigma$ ),当光强变化 90%时,线性精度变化约为 15 nm( $3\sigma$ ),此精度变化主要由系统噪声引起,严格控制系统噪声可以使此测量精度提高。

表 2 不同电压下的线性精度

Table 2 Linear accuracy under different driving voltages

Driving voltage /V	Light intensity variation /%	Linear accuracy ( $3\sigma$ ) /nm
4.2	90	33.4
8.4	65	18.7
12.6	20	19.2
14.0	0	18.2

## 5 结 论

理论分析并实验验证了一种基于空间分光的调焦调平测量技术。该技术不仅能够有效抑制光强变化对测量结果的影响,还具有对光刻机环境影响较小、无差分信号时延、后端解调电路简单等特点。实验结果表明,基于该技术的调焦调平测量系统重复性精度为 8 nm( $3\sigma$ ),线性度精度为 18 nm( $3\sigma$ )。当测量光强变化达 90%时,该测量技术引起的线性精度变化为 15 nm( $3\sigma$ );当光强变化为 65%时,线性精度变化小于 1 nm( $3\sigma$ )。

## 参 考 文 献

- 1 Yao Hanming, Hu Song, Xing Tingwen. Optical projection lithography for micro and nano-fabrication [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方法 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 61-62.
- 2 Paolo Alagna, Omar Zurita, Vadim Timoshkov, *et al.*. Optimum ArFi light source bandwidth for 10 nm node logic imaging performance [C]. SPIE, 2015, 9426: 942609.
- 3 Igor Bouchoms, Martijn Leenders, Jan Jaap Kuit, *et al.*. Extending 1.35 NA immersion lithography down to 1x nm production nodes [C]. SPIE, 2012, 8326: 83260L.

- 4 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.  
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.
- 5 Shu Huer Hou, Edgar Huang, Aroma Tseng, *et al.*. Improvement of the common DoF across field for hole-structure process layers[C]. SPIE, 2008, 6924: 692434.
- 6 Bernhard Liegl, Allen Gabor, Golin Brodsky, *et al.*. Measuring layer-specific depth-of-focus requirement [C]. SPIE, 2008, 6924: 69244J.
- 7 Yasuhiro Hidaka, Kiyoshi Uchikawa, Daniel G Smith. Error analysis and compensation method of focus detection in exposure apparatus[J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(1): 10-18.
- 8 Takenobu Kobayashi, Yuji Kosugi. Surface position measuring method and apparatus: US, 7668343 B2[P]. 2010-02-23.
- 9 Theodorus Marinus Modderman, Gerrit Johannes Nijmeijer, Johannes Christiaan Maria Jasper. Off-axisleveling in lithographic projection apparatus: US, 7206058B2[P]. 2007-04-17.
- 10 Arie Jeffrey Den Boef, Jozef Petrus Henricus Benschop, Ralph Brinkhof, *et al.*. Level sensor, lithographic apparatus, and substrate surface positioning method: US, 2013/0077079 A1[P]. 2013-03-28.
- 11 J E van der Werf. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. J Vac Sci Technol B, 1992, 10(2): 735-740.
- 12 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调焦调平方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212005.
- 13 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.
- 14 Yan Wei, Li Yanli, Chen Mingyong, *et al.*. Moiré fringe-based 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调焦调平方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0805001.
- 15 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.  
李 杰, 唐 锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508006.
- 16 Tong Junmin, Zhou Shaolin, Zhao Lixin, *et al.*. Angular measurement using moire interferometry for alignment of proximity lithography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208001.  
佟军民, 周绍林, 赵立新, 等. 接近式光刻对准中的叠栅干涉测角方法[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208001.
- 17 Cao Shaoqian, Bu Yang, Wang Xiangzhao, *et al.*. Measurement technique for the Mueller matrix based on a single photoelastic modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112006.  
曹绍谦, 步 扬, 王向朝, 等. 基于单光弹调制器的米勒矩阵测量技术[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112006.