

# 压印光刻中的两步对正技术\*

王 莉 卢秉恒 丁玉成 刘红忠

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

**摘 要** 压印光刻中套刻需要粗、精两级对正. 实验采用一对斜纹结构光栅作为对正标记. 利用物镜组观察光栅标记图像的边界特征进行粗对正,其准确度在精对正信号的捕捉范围内;利用光电接收器件阵列组合接收光栅莫尔信号,在莫尔信号的线区进行精对正. 由于线性区的斜率大,精对正过程中得到相应  $x, y$  方向的对正误差信号灵敏度高,利用高灵敏度对正误差信号作为控制系统的驱动信号,对承片台进行驱动定位,实现精对正. 最终使  $X, Y$  方向上的重复对正准确度分别达到了  $\pm 21 \text{ nm}(\pm 3\sigma)$  和  $\pm 24 \text{ nm}(\pm 3\sigma)$ .

**关键词** 压印光刻;对正准确度;光栅;莫尔信号;粗对正;精对正

**中图分类号** TH705;TN249 **文献标识码** A

## 0 引言

在微电子制造中,随着微细制造的特征尺寸越来越小,决定特征尺寸大小的光刻技术越发显现其重要性. 其中对正准确度的高低又是光刻技术的关键. 对正是指曝光的目标图形与比较标记重合或置中的过程. 它限制了集成密度,因而也限制了电路性能. 在 ULSI 光刻中规定:对正误差应该不大于分辨率的  $1/3^{[1]}$ . ULSI 中对正过程一般分为两步:粗对正和精对正. 经过实现系统初步对正的粗对正后系统的对正误差(一般对正误差为几十微米)在精对正标记的动态捕捉范围内,然后通过精对正过程将对正误差限制在系统对正准确度的要求范围内(亚微米级或纳米级). 在常温压印光刻(一种无需昂贵的投

影光学系统就可在室温下制造出特征尺寸小于  $100 \text{ nm}$  的图形复型技术<sup>[2,3]</sup>)中,要达到  $0.1 \mu\text{m}$  的最小特征尺寸,其最终对正准确度应在  $0.03 \mu\text{m}$  左右<sup>[4]</sup>. 在传统光刻技术中,一般需设计多个对正标记来分别实现粗对正和精对正,这样对正标记会占用大量的晶片空间,降低晶片的使用效率. 基于这个原因,本文提出了只用 1 对分别位于掩模相和晶片对正标记来实现粗对正和精对正的新型方法. 本方法的对正标记采用特殊斜纹结构光栅,在单色光的照射下,当光栅栅距选择适当时,通过显微镜观察来实现系统的粗对正. 然后根据光栅产生的叠栅条纹,由光电探测器检测莫尔信号,识别掩模相对于晶片的微小位移实现两者精对正.

## 1 对正方法

### 1.1 莫尔信号

当光束射到相互叠合的平行光栅副上,因光栅副之间的相对位移,光强会产生周期变化—即莫尔信号. 如图 1,假设光栅副中 2 块长光栅  $G_1, G_2$  的

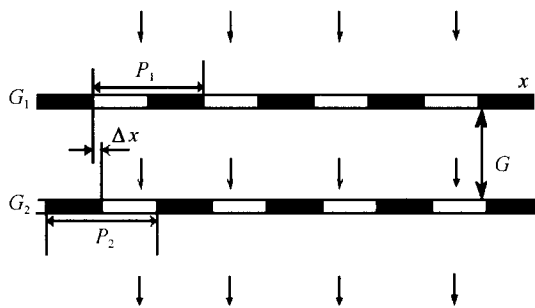


图 1 光栅副示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gratings

光栅面平行,光栅栅距(即光栅的空间周期)分别为  $p_1$  及  $p_2$  ( $p_1 < p_2$ ,  $\Delta x$  是光栅副之间的相对位移, 2 光栅面的间距为  $G$  (2 块光栅在彼此的菲涅耳区内). 设光栅面上与  $G_1$  栅线垂直的方向为  $x$  轴,当单色平行光束垂直入射于  $G_1$  的光栅面,光透过  $G_1$  在  $G_2$  处得到的菲涅耳衍射<sup>[5,6]</sup> 为

$$\Psi_1(x_2, \Delta x, G) = \sum_{m=-M}^M \int_{-\frac{w_1}{2} + mp_1 + \Delta x}^{\frac{w_1}{2} + mp_1 + \Delta x} r^{-1/2} \left(1 + \frac{G}{r}\right) \cdot \exp(-ikr) dx_1 \quad (1)$$

$$r = (G^2 + (x_1 - x_2)^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

式中,  $2M+1$  是  $G_1$  的栅线数,  $\lambda$  是单色光的波长,  $w_1$  为  $G_1$  透光栅线的宽度. 而从透出来的第  $K$  级衍射光由以下夫琅和费衍射给出

$$\Psi_2(\Delta x, G) = \sum_{n=-N}^N \int_{-\frac{w_2}{2} + np_2}^{\frac{w_2}{2} + np_2} \Psi_1(x_2, \Delta x, G) \cdot \exp\left(\frac{i2\pi K x_2}{p_2}\right) dx_2 \quad (4)$$

\*国家自然科学基金(50275118), 国家 863 计划重点(2002AA420050) 和国家重点基础研究发展计划(2003CB716203) 资助  
Tel: 029-82665120 Email: wangli@mailst. xjtu. ed. cn  
收稿日期: 2005-07-06

式中  $2N+1$  是  $G_2$  的栅线数,  $w_2$  为  $G_2$  透光栅线的宽度. 对于零级光 ( $K=0$ ) 有

$$\Psi_2(\Delta x, G) = \sum_{n=-N}^N \int_{-\frac{w_2}{2} + np_2}^{\frac{w_2}{2} + np_2} \Psi_1(x_2, \Delta x, G) dx_2$$

光强  $I(\Delta x, G)$  为

$$I(\Delta x, G) = |\Psi_2(\Delta x, G)|^2 \quad (5)$$

根据菲涅耳衍射的原理当入射光透过光栅在距离为  $jp^2/\lambda$  ( $j$  为整数) 处的衍射光具有极大值. 所以对光栅副的间距  $G$  取为  $p^2/\lambda$ , 通过 Matlab 仿真可以得到莫尔信号的零级光和光栅副间相对位移的关系如图 2 中实线.

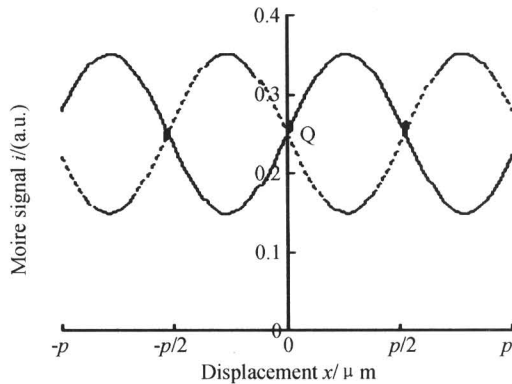


图 2 莫尔信号的零级光和光栅副间相对位移关系的 Matlab 仿真

Fig. 2 Simulation of Moiré signal and displacement of the grating

可见随光栅副的相对位移莫尔信号的零级光光强按正弦规律变化. 当光栅栅距选择的较大时 ( $>10 \mu\text{m}$ ), 光强基本集中在零级光. 本系统中莫尔信号只考虑零级光光强. 如采用一对幅值相同、相差为  $180^\circ$  莫尔信号时, 两莫尔信号强度差值为零的光栅位置点 ( $Q$  点的横坐标  $x_Q$ ) 即为两莫尔信号强度相同的位置点, 可以作为光栅副位置对正点来使用, 如图 3. 由于莫尔信号在此点附近有一个线性区

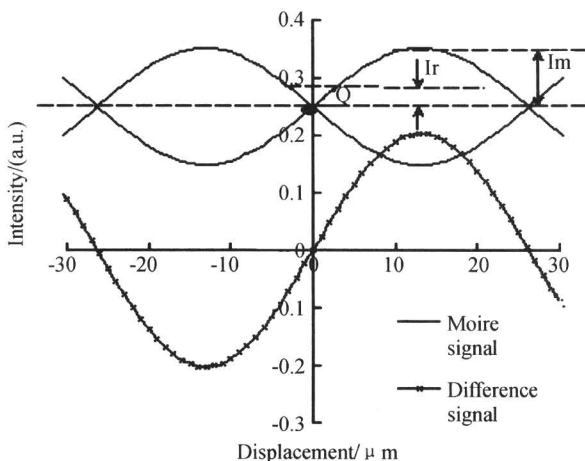


图 3 相差  $180^\circ$  的莫尔信号及其差动信号

Fig. 3  $\pi$ -phase difference signals between a pair of gratings and the difference signal

很陡峭—即随光栅副间的相对位移信号的灵敏度很高, 所以在此区域可进行高准确度的对正控制. 但是对于光栅副来说这样的交点 ( $x_{Q \pm p \times n}$ ,  $P$  是光栅栅距,  $n=0, 1, 2, \dots$ ) 很多, 因此光栅副间的相对位移应该限制在  $x_{Q \pm p/2}$  内, 才可找到唯一的交点, 进行高准确度对正控制, 这就需要先进行粗对正.

### 1.2 粗对正

为找到唯一的交点, 系统必须先进行粗对正. 由于对正标记很小, 为了方便接收引入了具有显微作用的物镜组对光栅标记进行放大接收. 物镜的放大参量选择和光栅的栅距相配合, 通过显微物镜放大观察栅线的移动情况, 结合对正标记的边界特征, 可把光栅副间的相对位移限制在  $Q \pm p/2$  内, 实现粗对正.

### 1.3 精对正

粗对正完成后就把两标记的相对位移限制在一个栅距内了, 这时可以根据莫尔信号中唯一的交点, 来进行精对正. 在一对幅值相同、相差为  $180^\circ$  的莫尔信号交点  $Q$  附近有一个线性区, 如在此线性区进行精对正, 灵敏度高, 对正误差 (即相对位移) 的大小可近似表示为

$$\Delta l = \frac{p}{2\pi} \frac{i_r}{i_m} \quad (6)$$

式中  $p$  为光栅的栅距;  $i_r$  为某一微小对正误差处莫尔信号的值;  $i_m$  为莫尔信号的幅值. 采用一对相差为  $180^\circ$  的莫尔信号的差动模式, 其幅值为基本莫尔信号的两倍, 线性区的斜率会变大, 在差动模式下, 同样微小的位移会得到更大的信号变化量, 使得信号检测的分辨率相应提高.

## 2 对正标记及信号接收

为了同时实现光栅栅线平面内  $x, y$  方向上的对正并提高空间利用率, 设计了如图 4 结构光栅标记. 结构光栅标记分为四个区域, 如图 4(a). i、ii 区栅线与水平基线 (取水平基线为  $x$  方向, 与其垂直的方向为  $y$  方向) 的夹角为  $\pi/4$ , iii、iv 区栅线与水平基线的夹角为  $3\pi/4$ , 孔栅比为  $1:2$ ; 通过每个区中心的栅线具有相同的相位关系. 在结构光栅副中,

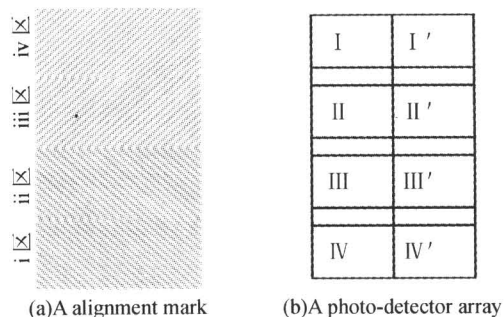


图 4 对正标记及光电接收阵列

Fig. 4 A alignment mark and a photo-detector array

$G_1$  的 ii、iii 区栅距为  $50 \mu\text{m}$ , i、iv 区栅距为  $52.5 \mu\text{m}$ ,  $G_2$  的 ii、iii 区栅距为  $52.5 \mu\text{m}$ , i、iv 区栅距为  $50 \mu\text{m}$ .  $G_1$ 、 $G_2$  叠合时形成的游标叠栅条纹宽度  $W_v = p_1 p_2 / (p_2 - p_1) = 1050 \mu\text{m}$ , 每个区域宽度按一个叠栅条纹的宽度来选取.

本系统中选用的显微物镜的直径为  $8 \text{ mm}$ , 放大倍数为 14 倍, 分辨力为  $8.3 \mu\text{m}$ , 人眼分辨力为  $0.07 \text{ mm}$ . 由于选用的光栅栅距经过物镜放大后为  $0.7 \text{ mm}$  左右, 所以可以清晰看到经过显微物镜放大后栅线的移动情况. 两对正标记叠合时的边界轮廓随着  $x, y$  方向相对位移而改变, 观察两对正标记的边界是否重合, 可以把模板间的相对位移限制在  $Q \pm 25 \mu\text{m}$  内, 实现粗对正.

为实现精对正设计光电接收阵列如图 4(b). 光电接收阵列中的  $I, I'$  区对图 4(a) 中 i 区的莫尔信号进行两细分接收. 如果  $G_1$  相对  $G_2$  移动, 可以得到一对相差为  $180^\circ$  的莫尔信号. 同理结构光栅其他三个区的莫尔信号被光电接收器件阵列中的对应区分别进行两细分接收后, 可得到三对相差为  $180^\circ$  的莫尔信号. 它们的大小在光栅副作相对位移经过位置  $Q$  时相同, 位置  $Q$  被作为正确对正的位置.

叠合的对正标记在  $x, y$  方向上的相对位移由式(7), (8)给出

$$f(\Delta x) = (i_{I1} + i_{II'} + i_{III} + i_{IV}) + (i_{I1'} + i_{II} + i_{III'} + i_{IV'}) \quad (7)$$

$$f(\Delta y) = (i_{I1} + i_{I1'} + i_{IV} + i_{IV'}) + (i_{II} + i_{II'} + i_{III} + i_{III'}) \quad (8)$$

式中  $\Delta x, \Delta y$  分别表示叠合的对正标记在  $x, y$  方向上的相对位移,  $f(\Delta x), f(\Delta y)$  是光强函数表示由  $\Delta x, \Delta y$  的改变引起的组合莫尔信号光强变化, 它们分别是  $\Delta x, \Delta y$  的线性函数, 符合式(6)的变化规律; 式(7)、(8)中等号右边是光电接收处光强组合, 当  $f(\Delta x) = 0, f(\Delta y) = 0$ , 时,  $\Delta x = 0, \Delta y = 0$  即为对正状态. 实际装置中以  $f(\Delta x), f(\Delta y)$  为采样信号进行采样分析处理后输出相应的步进驱动信号对承片台进行闭环控制, 直至达到  $\Delta x \leq \epsilon_x, \Delta y \leq \epsilon_y$  ( $\epsilon_x, \epsilon_y$  为给定的误差极限值), 此时可作为对正状态.

### 3 对正实验

实验装置如图 5. 激光器发出的激光使模板上的对正标记形成叠栅条纹信号, 经由物镜组被放大, 再经过分光棱镜把所得放大的叠栅条纹分成人眼和光电接收器件两路接收. 通过人眼观察进行粗对正, 把相对误差限制在  $Q \pm 25 \mu\text{m}$  内. 然后把光电接收到的信号经过放大、滤波后, 按照对正误差和信号间的对应关系进行运算, 所得模拟信号经由 12 位的 A/D 采集卡转换为数字信号, 输入计算机进行处

理, 产生相应的驱动信号控制压印工作台运动, 从而实现了对正过程. 在对正系统的驱动环节中采用宏微两级驱动. 宏驱动采用  $120 \text{ mm}$  行程的直线电机, 分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ , 重复定位准确度  $\pm 1 \mu\text{m}$ ; 微驱动采用  $30 \mu\text{m}$  行程的 PZT, 分辨率为  $0.3 \text{ nm}$ , 重复定位准确度  $\pm 1 \text{ nm}$ . 驱动过程中由德国 SIOS 公司的激光干涉仪实行全程检测, 并与控制系统一起构成闭环系统. 在控制系统中, 宏微两级驱动的动态切换控制是由 PID (Proportional Integral Derivative) 和 EMM (Exact Model Matching) 控制算法实现的.

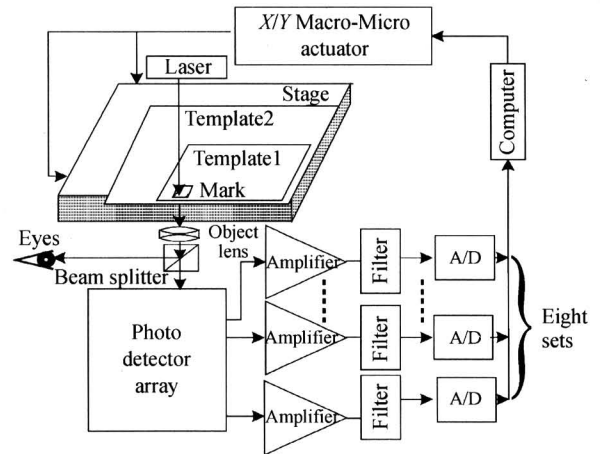


图 5 实验装置示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

### 4 结果与分析

采用波长  $650 \text{ nm}$  的激光, 系统粗对正通过宏驱动来实现. 系统首先进行宏驱动, 通过观察, 实现粗定位. 具体通过显微物镜放大后可以观察到的图像如图 6.

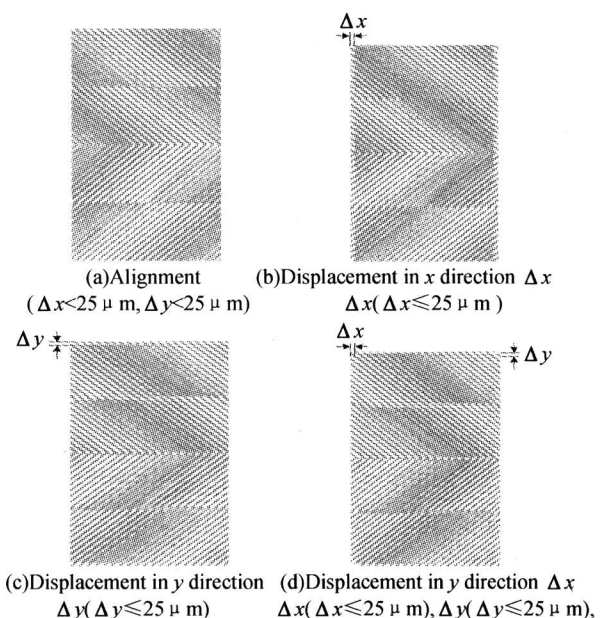


图 6 两对正标记叠合时的边界随着  $x, y$  方向相对位移的改变情况  
Fig. 6 Borderlines of the superposed marks

当由眼睛通过分光棱镜的观察如图 6(a) 的边界情况时,可以得到  $x, y$  方向上对正准确度为  $\Delta x < \pm 25 \mu\text{m}, \Delta y < \pm 25 \mu\text{m}$ , 此时此对正标记已经在精对正的动态捕捉范围内。

在完成粗定位后,精对正采用宏微驱动结合的方式实现,切换点在  $Q \pm 12 \mu\text{m}$  处. 当光栅副间距在  $0.03 \text{ mm} \sim 0.04 \text{ mm}$  时叠栅条纹的光强保持相对稳定且对比度大. 测得差动莫尔信号的基波幅值约为  $160 \text{ A. U.}$ , 基波幅值波动量约为  $0.8 \text{ A. U.}$ , 由式 (6) 可得差动莫尔信号波动量对应的位置误差约为  $20 \text{ nm}$ .

当承片台在微驱动的控制下以  $40 \text{ nm}$  的步长步进时,所得的步进结果如图 7. 从图 7 可知系统可以精确分辨  $40 \text{ nm}$ , 驱动步距一样时,对正误差信号的变化非常均一并且往复过程体现出来高度的一致性。

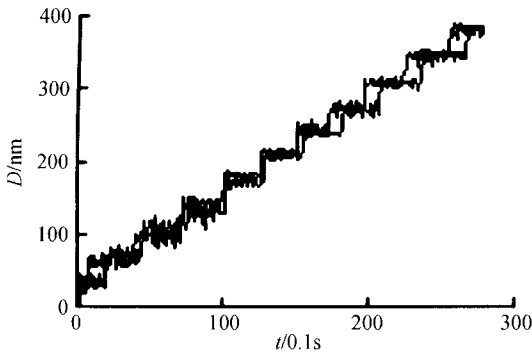


图 7 40 nm/s 往复过程的一致性  
Fig. 7 40 nm per step

在  $x, y$  方向上分别做了 50 次重复对正实验,采用 SIOS SP120 型激光干涉仪(分辨率约为  $1.3 \text{ nm}$ ) 测试套印对正系统准确度,实验结果如表 1, 2. 最终得到的  $x$  方向上重复对正准确度为  $\pm 21 \text{ nm} (\pm 3\sigma)$ ,  $y$  方向上重复对正准确度为  $\pm 24 \text{ nm} (\pm 3\sigma)$ . 达到了亚微米压印光刻套刻准确度的要求。

表 1 对正实验数据(x 方向)

	-5	8	-12	-5	5
	-15	4	-7	-8	-4
	-2	6	-2	9	-6
对正位置	-9	-4	-4	6	2
激光干涉	-2	4	8	-12	-4
仪的读数/	12	-10	3	-4	3
nm	2	-6	-4	8	-7
	3	4	-2	-6	2
	-4	-8	6	12	4
	3	10	12	-3	15
$\sigma/\text{nm}$	7				
$3\sigma/\text{nm}$	21				

表 2 对正实验数据(y 方向)

	-6	16	-6	-16	-16
	6	-10	12	-8	14
	-4	20	0	4	-13
对正位置	9	10	-10	-14	-4
激光干涉	15	16	8	-9	-18
仪的读数/	8	-5	10	-15	-12
nm	17	18	-20	-12	-20
	-16	16	-2	-7	18
	-8	-10	-16	-10	20
	20	-8	24	4	10
$\sigma/\text{nm}$	8				
$3\sigma/\text{nm}$	24				

### 4 结论

在压印光刻中为实现套刻准确度进行两级对正过程. 实验采用一对结构光栅作为对正标记. 利用具有显微作用的物镜组观察对正标记的边界实现粗对正,使得粗对正的准确度在精对正信号的捕捉范围内. 利用光栅副产生莫尔信号一个周期内的线性倾斜区进行精对正. 由于线性区的斜率大,可得到灵敏的对正误差信号,利用高灵敏度的误差信号作为控制系统的驱动信号,并由激光干涉仪作为控制系统的反馈环节在驱动过程中进行全程监测,实现自动对正. 最终得到的  $x$  方向上重复对正准确度为  $\pm 21 \text{ nm} (3\sigma)$ ,  $y$  方向上重复对正准确度为  $\pm 24 \text{ nm} (3\sigma)$ , 达到了亚微米级压印光刻的对正准确度要求。

### 参考文献

- Stephen A C. The science and engineering of microelectronic fabrication, second edition, New York: Oxford University Press, 2001. 17~18
- Chou S Y, Chris K. Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon. *Nature*, 2002, **417**(20): 835~838
- Otto M. Characterization and application of a UV-based imprint technique. *Microelectronic Engineering*, 2001, **57**(9): 361~366
- James R S, Bruce W S. Microlithography: science and technology. New York: Marcel Dekker Inc, 1998. 317~367
- 刘战伟, 谢惠民, 方岱宁, 等. 纳米云纹法条纹倍增技术研究. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1431~1433  
Liu Z W, Xie H M, Fang D N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1431~1433
- 唐雄贵, 高福华, 高峰, 等. 利用严格模式理论分析光栅透镜的衍射特性. *光子学报*, 2005, **34**(6): 881~884  
Tang X G, Gao F H, Gao F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 881~884

## A Novel Two-Step Alignment Technique for Imprint Lithography

Wang Li, Lu Bingheng, Ding Yucheng, Liu Hongzhong

*The State-key Lab of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

Received date: 2005-07-06

**Abstract** A two-step alignment, coarse-fine alignment, is proposed for obtaining high alignment accuracy in room-temperature imprint lithography process. A pair of special slant gratings are used as alignment marks. Coarse alignment was realized by observing the borderlines of the superposed marks through object lens, and alignment accuracy is within the capture range of fine alignment. The Moiré signals in the linear region for fine alignment generated by the alignment marks were detected by a photo-detector array and used to estimate the fine alignment errors in  $x$  and  $y$  directions respectively. Since the linear region of moiré signal is very steep, the signals highly sensitive to alignment error can be obtained and used to control the alignment of a  $X$ - $Y$  stage by fine positioning. The final alignment accuracy can reach  $\pm 21$  nm in  $x$  direction and  $\pm 24$  nm in  $y$  direction.

**Keywords** Imprint lithography; Alignment accuracy; Grating; Moiré signal; Coarse alignment; Fine alignment



**Wang Li** received her M. S. degree in 2002. She is a p.H. D. candidate in Xi'an Jiaotong University. She is working in various fields, such as imprint lithography, optical measurement, laser application and photoelectric detection, etc.