

# 叠栅条纹相位分布对对准精度的影响分析

朱江平<sup>1, 2, 3</sup> 胡 松<sup>1</sup> 于军胜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)  
<sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 光刻对准中,一般将硅片和掩模对准标记制作成周期接近的光栅,通过光栅标记叠加形成的叠栅条纹的相位信息,探测掩模和硅片的相对位置关系。在实际的应用中,叠栅条纹的方向不仅与对准标记的几何位置有关,而且还与 CCD 的位置有关。为了将叠栅条纹的光刻对准方法推向实际应用,从矩形光栅到叠栅条纹,分析了一般光栅的相位分布规律。根据叠栅条纹相位特性分析了掩模、基片和 CCD 的几何位置对对准精度的影响;建立了实际对准偏差与理论值的数学关系模型。研究表明,没有角位移的情况下,当位移值小于 0.4 pixel 时,理论上最大对准误差低于 0.002 pixel。

**关键词** 测量;光刻对准;角位移;叠栅条纹;相位分析

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0912002

## Analysis of Phase-Distribution Effect of Moiré Fringes on Alignment Precision

Zhu Jiangping<sup>1, 2, 3</sup> Hu Song<sup>1</sup> Yu Junsheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*  
<sup>3</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** In lithographic alignment, alignment labels located on the mask and wafer are generally made by two gratings of slightly different periods. The relative position between the mask and wafer is detected by phase information of moiré fringes. In practical application, the direction of moiré fringes is not only related to geometric position of alignment labels, but also position of CCD. To propel the method of lithographic alignment into practice, phase distribution law of general gratings is analyzed from rectangle gratings to moiré fringes. Based on phase characteristics of moiré fringes, effects of geometric positions of the template, wafer and CCD on alignment precision are emphatically analyzed. Mathematical-relation models between the alignment deviation and theoretical displacement are also established. Research results show that the maximal alignment error is theoretically less than 0.002 pixel without an angular displacement when the displacement is less than 0.4 pixel.

**Key words** measurement; lithographic alignment; angular displacement; fringes analysis; phase analysis

**OCIS codes** 050.2770; 050.1970; 070.4790

## 1 引 言

叠栅条纹是由两个或多个具有周期性的几何结构叠加形成的一种光学现象。在变形测量、位移测量、面形测量、应力分析和光刻对准等多个领域具有

广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。

对准技术是光刻的核心技术之一。在纳米级光刻对准中,常常将硅片和掩模对准标记制作成周期接近的光栅,平行光通过两接近光栅形成按一定规

**收稿日期:** 2012-03-05; **收到修改稿日期:** 2012-04-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(60976077, 61076099)资助课题。

**作者简介:** 朱江平(1984—),男,博士研究生,主要从事光刻对准与工艺方面的研究。E-mail: zsyioe@163.com

**导师简介:** 胡 松(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事微电子总体专用设备方面的研究。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

律分布的叠栅条纹,该叠栅条纹包含稳定的相位信息,反映了对准时掩模和硅片的相对位置关系。这种将掩模和衬底标记光栅的相对位置关系反映在叠栅条纹的相位信息中的方法具有很好的抗干扰能力。叠栅条纹的周期和位置对两光栅的间隔变化不敏感,光源的强度变化和波长不影响条纹的相位信息,也不影响对准。特别是叠栅条纹对位移的放大作用,可用于实现纳米级高精度对准。

先前的研究工作主要针对于掩模与基片的相对线位移测量<sup>[5~9]</sup>,有关两光栅对准标记的相对倾斜对对准精度的影响的研究还没有报道。事实上,反映对准信息的叠栅条纹几何结构与相位信息不仅和

CCD 的位置信息有关,而且和两个光栅的位置信息密切相关。因此,有必要研究对准标记的位置对对准精度的影响规律。

## 2 叠栅条纹对准理论

在接近接触式光刻对准中,所采用的精对准标记是顺序相反的两组拼接线光栅,标记的上下部分可以同时实现对准,形成的两组相移叠栅条纹的移动方向相反<sup>[4]</sup>。图 1 为精对准中采用的光栅标记。在实际对准中,将采用排列方向互相垂直光栅标记以实现  $x, y$  方向的同时对准。这里以  $y$  方向对准为例加以说明<sup>[10]</sup>。

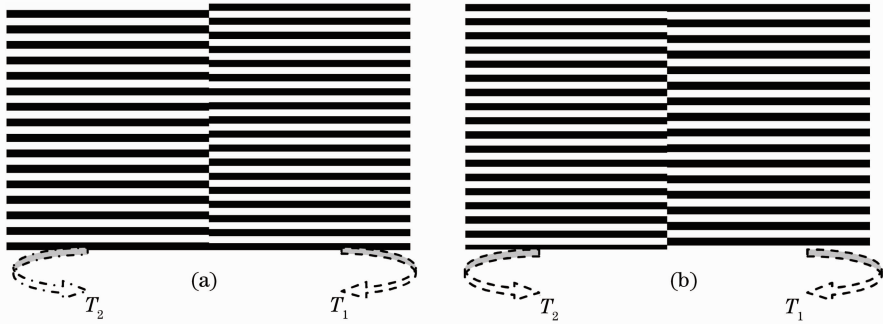


图 1 线光栅对准标记。(a)掩模标记;(b)硅片标记

Fig.1 Line-grating alignment marks. (a) Mask label; (b) Si wafer label

掩模与硅片实现对准,即当左右光栅同时处于初始坐标时,单位振幅平面波入射下,对于常用的  $(+1, -1)$  级叠栅条纹,其复振幅分布为

$$E_{(+1,-1)}(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_m D_{-m} \exp[i2\pi m(f_1 - f_2)y]. \quad (1)$$

对应叠栅条纹的周期为

$$T_F = 1/(f_1 - f_2) = T_1 T_2 / (T_2 - T_1). \quad (2)$$

当硅片相对掩模理论上偏移  $\Delta y$  时,左右两组条纹产生的相移分别为

$$\phi_R = 2\pi\Delta y/T_1, \quad \phi_L = -2\pi\Delta y/T_2. \quad (3)$$

由于左右两组条纹相移方向相反,其相移差

$$\Delta\phi_M = \phi_R - \phi_L = 2\pi\Delta y(1/T_1 + 1/T_2). \quad (4)$$

则左右两组条纹的相对移动量

$$\Delta Y_M = \Delta Y_R + \Delta Y_L = \frac{T_1 + T_2}{T_2 - T_1} \Delta y. \quad (5)$$

因此,只要提取硅片相对于掩模偏移的叠栅条纹的相移差,就可通过(4)式计算硅片相对于掩模的对准偏差

$$\Delta y = [\Delta\phi_M / (2\pi)] \times (\bar{T} / 2) = \Delta\phi_M / [2\pi(f_1 + f_2)], \quad (6)$$

(6)式将  $\bar{T} = 2T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$  定义为两差动光栅的平均周期。

## 3 叠栅条纹相位分析

从(6)式可以看出,叠栅条纹的相位提取精度对光刻对准的精度起着决定性的影响,并且其前提在于保证左右光栅的高度平行。然而实际光刻对准中,当掩模的位置确定后,基片上的光栅标记往往与掩模上的对准标记存在一定的角位移。此外,以掩模光栅标记为基准时,由于 CCD 获得掩模标记图像并不能保证光栅线与  $x(y)$  方向高度平行。从而不能保证叠栅条纹相位的正确提取。因此,从一般光栅出发,分析光刻对准中叠栅条纹相位分布的一般规律,并给出相应的对准偏差修正公式。

### 3.1 光栅相位分布

#### 3.1.1 矩形光栅的相位

基于光栅的衍射模式,光栅的截面可以用某一周期函数表示。一般情况下,对于常见的沿  $y$  方向排列的 0-1 光栅,如图 2 所示。其截面或透射率函数可以表示为

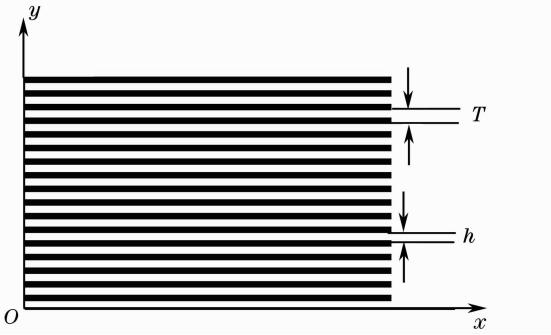


图2 矩形光栅

Fig. 2 Rectangle grating

$$F_{\text{TR}}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{y-nT}{h}\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n \exp(i2\pi n f_0 y), \quad (7)$$

式中  $H_n = \alpha \text{sinc } n\alpha$ ,  $f_0 = 1/T$ , 其中  $\alpha = h/T$  表示透光部分的占空比,  $h$  为光栅透光部分的宽度,  $T$  为光栅周期。另外

$$\text{rect}\left(\frac{y}{h}\right) = \begin{cases} 1, & |y| < h \\ 0, & |y| \geq h \end{cases} \quad (8)$$

当单位复振幅的平面波垂直入射该光栅时, 以  $z=0$  表示紧靠光栅后的孔径平面, 其复振幅分布为

$$E(x, y, 0) = 1 \times F_{\text{TR}}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n \exp(i2\pi n f_0 y). \quad (9)$$

(9)式可以理解为: 光栅衍射场分布可以等价为一系类不同空间频率的衍射波复振幅在  $xoy$  面内各次谐波的线性叠加。这里定义

$$\psi_n(x, y) = 2\pi n f_0 y \quad (10)$$

为频率  $f_n = n f_0$  的谐波成分在  $xoy$  面内的空间相位分布。对于其他外形的矩形光栅, 可以由线光栅经过

几何变换得到, 其变换函数用  $G(x, y)$  表示。则透射率函数修改为

$$F_{\text{TR}}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n \exp[i2\pi n f_0 G(x, y)]. \quad (11)$$

则(10)式可以写为

$$\psi_n(x, y) = 2\pi n f_0 G(x, y) = 2\pi f_n G(x, y). \quad (12)$$

由(12)式可以看出, 光栅的相位分布是由变换函数  $G(x, y)$  的几何形状决定的。并且定义, 某一点的相位方向与该点栅线的延伸方向垂直。

### 3.1.2 正弦光栅的相位

基于上述分析, 根据(9)式, 忽略高频次项, 保留基频  $f_0$  和零频, 即常见的光强呈正弦分布的光栅。沿  $y$  方向排列的正弦光栅, 其一般表达式为

$$I = A + B \cos[2\pi f_0 G(x, y)], \quad G(x, y) = y, \quad (13)$$

其中  $A$  为背景光强度,  $B$  为条纹对比度。其相位分布在  $xoy$  面内的表达式为

$$\psi_0(x, y) = 2\pi f_0 y. \quad (14)$$

当几何变换函数  $G(x, y)$  改变时, 正弦光栅的光强分布将随之变化。对应地, 关于  $x, y$  变量的光栅的相位分布也会相应变化。根据此定义, 这里以一般斜正弦光栅为例加以详细说明。如图3所示直角坐标系, 图3(a)为斜正弦光栅, 图3(b)为图3(a)的相位分布。若光栅线的延伸方向与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ , 则相位方向与  $x$  轴的夹角为  $\gamma = \theta + 90^\circ$ 。显然, 通常情况下, 要探测某一方向上的位移, 位移的方向与条纹的排列方向和相位方向必须高度平行, 才能达到高的探测精度。

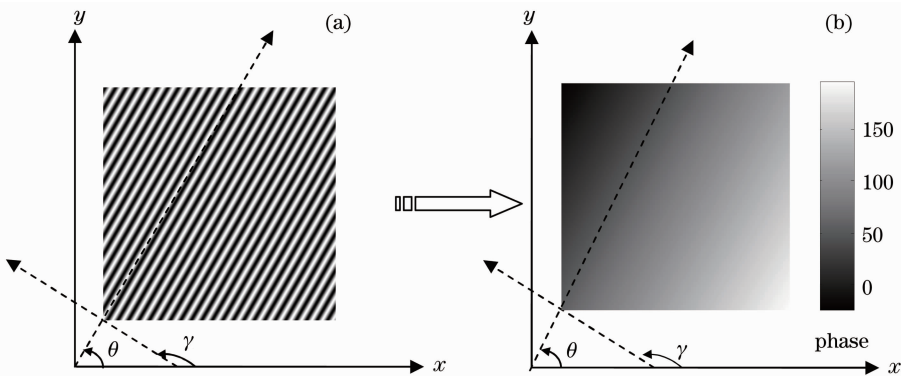


图3 相位方向。(a) 条纹; (b) 相位

Fig. 3 Phase direction. (a) Fringes; (b) unwrapped phase

图 4 为由标准正弦光栅经过不同几何变换得到不同光强和相位分布的光栅图像。其中图 4(b)~(c)是由图 4(a)经过简单的旋转变换得到的斜条纹正弦光栅,条纹的光强分布比较简单,每个点的相位的方向相对于图 4(a)旋转了一定的角度。图 4(d)~(e)由图 4(a)经过变换函数调制,光栅的几何形状发生了

剧烈的变化,每个点的相位方向不尽相同,相对于图 4(a)每个点的相位有很大的差异。因此,利用这些光栅产生的(+1,-1)级叠栅条纹探测  $x, y$  方向的位移是不可行的。特别是在实际的光刻对准中,条纹的方向发生了倾斜,对准的精度将会受到一定的影响。

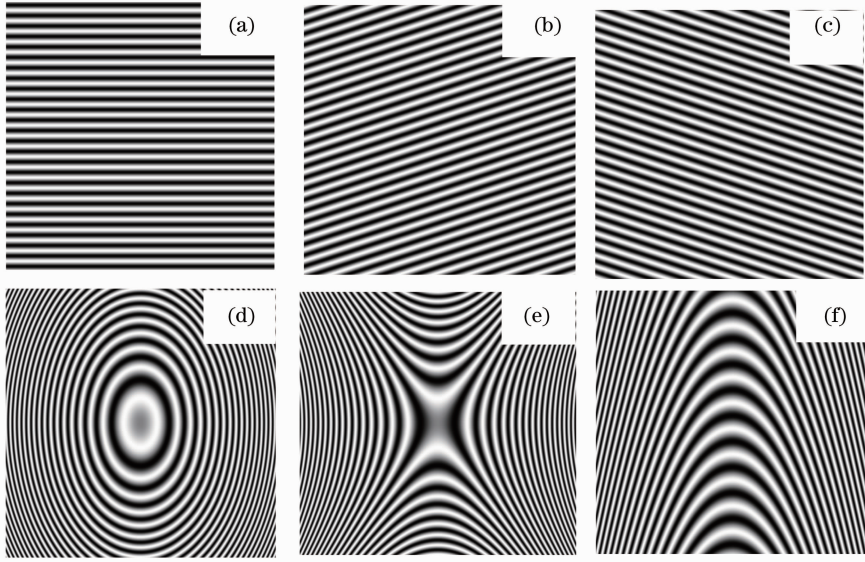


图 4 不同几何结构的光栅。(a)  $G(x, y) = y$ ; (b)  $G(x, y) = x \sin \theta + y \cos \theta, \theta = \pi/10$ ; (c)  $G(x, y) = x \sin \theta + y \cos \theta, \theta = -\pi/10$ ; (d)  $G(x, y) = -x^2/4 + y^2/9$ ; (e)  $G(x, y) = x^2/4 + y^2/9$ ; (f)  $G(x, y) = -x^2 + y^2/100$

Fig. 4 Gratings with different geometry structures. (a)  $G(x, y) = y$ ; (b)  $G(x, y) = x \sin \theta + y \cos \theta, \theta = \pi/10$ ; (c)  $G(x, y) = x \sin \theta + y \cos \theta, \theta = -\pi/10$ ; (d)  $G(x, y) = -x^2/4 + y^2/9$ ; (e)  $G(x, y) = x^2/4 + y^2/9$ ; (f)  $G(x, y) = -x^2 + y^2/100$

### 3.2 重叠光栅叠栅相位分布

为方便起见,假如参与重叠的周期性结构是光强呈余弦变化的标准余弦光栅,其透射率函数表达式为

$$F_{TR_1}(x, y) = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi f_1 G_1(x, y)],$$

$$F_{TR_2}(x, y) = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi f_2 G_2(x, y)], \quad (15)$$

式中  $G_1(x, y), G_2(x, y)$  的意义与(11)~(12)式相同,即分别决定两光栅的几何形状分布和空间相位分布,这里  $\phi_{TR_1}(x, y) = 2\pi f_1 G_1(x, y), \phi_{TR_2}(x, y) = 2\pi f_2 G_2(x, y)$ 。

当(15)式中两光栅重叠后,以单位强度的平面波垂直照射,其透射的光强分布为

$$I(x, y) = 1 \times F_{TR_1}(x, y) \times F_{TR_2}(x, y) = \frac{1}{4} \{1 + \cos[2\pi f_1 G_1(x, y)] + \cos[2\pi f_2 G_2(x, y)] + \frac{1}{2} \cos 2\pi[f_1 G_1(x, y) + f_2 G_2(x, y)] + \frac{1}{2} \cos 2\pi[f_1 G_1(x, y) - f_2 G_2(x, y)]\}. \quad (16)$$

显然,(16)式中决定叠栅条纹空间相位分布的是

$$\epsilon_M(x, y) = 2\pi[G(x, y)] = \phi_{TR_1}(x, y) - \phi_{TR_2}(x, y), \quad (17)$$

式中

$$G(x, y) = f_1 G_1(x, y) - f_2 G_2(x, y). \quad (18)$$

可见,叠栅条纹的相位分布不仅与原来两个光栅的空间频率有关,而且还与每个光栅的几何形状与相对位置信息有关。

根据图 3 中建立的坐标关系,假如两光栅都存在旋转变换。设

$$G_1(x, y) = x \sin \theta_1 + y \cos \theta_1, \\ G_2(x, y) = x \sin \theta_2 + y \cos \theta_2, \quad (19)$$

则对应的叠栅条纹的空间周期为<sup>[2]</sup>

$$T_m = [f_1^2 + f_2^2 - 2f_1 f_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)]^{-1/2}. \quad (20)$$

空间相位分布为

$$\omega_M(x, y) = 2\pi[(f_1 \sin \theta_1 - f_2 \sin \theta_2)x + (f_1 \cos \theta_1 - f_2 \cos \theta_2)y]. \quad (21)$$

由(21)式可以看出,叠栅条纹的相位分布由参与重叠的两个光栅的倾斜角  $\theta_1, \theta_2$  以及频率  $f_1, f_2$  决定。光栅的倾斜角改变,造成叠栅条纹的相位方向也会

发生变化。可见,光栅标记的倾斜角对于光刻对准偏差的探测有重要的影响。

### 3.3 光刻对准中叠栅条纹相位分析

#### 1) 对准条件 1 ( $\theta_1 \neq \theta_2 \neq 0$ )

在光刻对准中,是通过掩模与硅片上的两组差动光栅标记形成的叠栅条纹实现对准的。然而,当掩模与硅片上的两组光栅标记都存在旋转(倾斜)的情况实施对准,(3)~(4)式应写为

$$\phi_R = 2\pi f_1 \Delta y \cos \theta_1, \quad \phi_L = -2\pi \Delta y \cos \theta_2, \quad (22)$$

$$\Delta \phi_M = \phi_R - \phi_L = 2\pi \Delta y (f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2). \quad (23)$$

实际对准时,硅片相对于掩模的对准偏差公式与理论值的关系为

$$\Delta y_1 = \Delta \phi_M / [2\pi(f_1 + f_2)] = [(f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2) / (f_1 + f_2)] \Delta y, \quad (24)$$

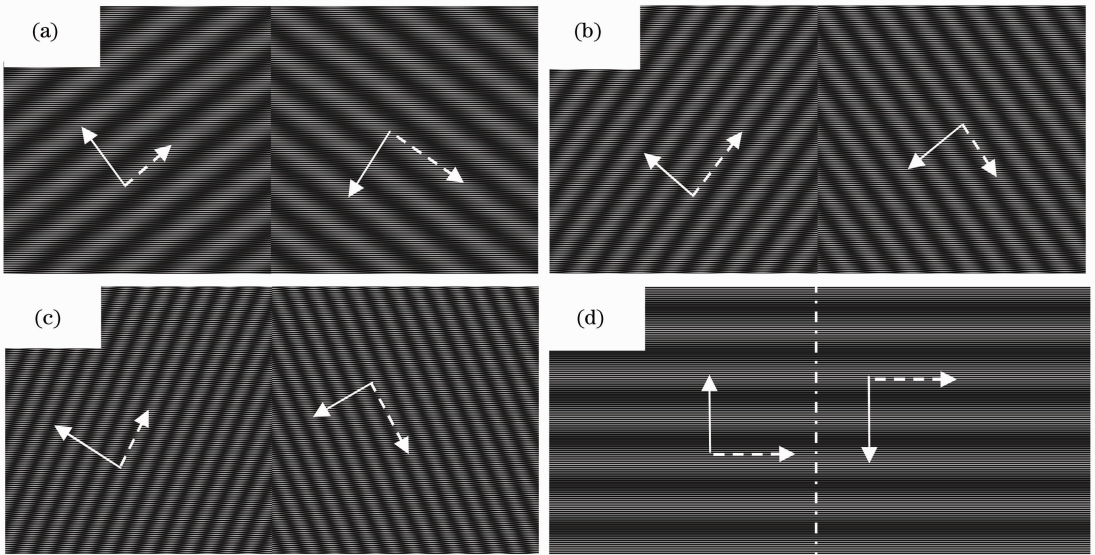


图5 对准条件1。(a)  $\theta_1 = -1^\circ, \theta_2 = 1^\circ$ ; (b)  $\theta_1 = -2^\circ, \theta_2 = 2^\circ$ ; (c)  $\theta_1 = -3^\circ, \theta_2 = 3^\circ$ ; (d)  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 0^\circ$   
Fig. 5 Alignment condition 1. (a)  $\theta_1 = -1^\circ, \theta_2 = 1^\circ$ ; (b)  $\theta_1 = -2^\circ, \theta_2 = 2^\circ$ ; (c)  $\theta_1 = -3^\circ, \theta_2 = 3^\circ$ ; (d)  $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 0^\circ$

#### 2) 对准条件 2 ( $\theta_1 = \theta_2 = \theta \neq 0$ )

当掩模对准标记与硅片对准标记倾斜角相同时,即  $\theta_1 = \theta_2 = \theta \neq 0$ 。对准偏差与理论值的关系为

$$\Delta y_2 = \Delta \phi_M / [2\pi(f_1 + f_2)] =$$

$$[(f_1 + f_2) \cos \theta / (f_1 + f_2)] \Delta y = \Delta y \cos \theta, \quad (25)$$

(25)式表明对准偏差与掩模和硅片上的光栅标记倾斜角有关。图6分别是掩模光栅标记与硅片光栅标记存在不同倾斜角形成的叠栅条纹。图6中白色实线箭头表示叠栅条纹的相位方向,虚线箭头表示叠栅条纹线的延伸方向。为了验证(25)式的合理性,表1给出了理论角位移  $\Delta y = 0.1$  pixel时,不同角位移对应的对准偏差数据。其中  $\Delta y_2$  是没有考

(24)式表明对准偏差与掩模和硅片上的光栅标记倾斜角有关。图5分别是掩模光栅标记与硅片光栅标记存在不同倾斜角形成的叠栅条纹。图5(d)是理想情况下的光刻对准条纹。图5(a)~(d)中,白色实线箭头表示叠栅条纹的相位方向,虚线箭头表示叠栅条纹线的延伸方向(彩图见网络电子版)。显然,光栅标记的倾斜角不同,叠栅条纹的相位方向具有很大的差异,只有当左右两组条纹的相位方向平行时,才能精确探测  $y$  方向上的位移。从图5(a)~(c)可以发现,掩模和硅片上的光栅标记的微小倾斜导致叠栅条纹的明显变化。显然,这种情况不适合高精度光刻对准。

虑角位移的数据,  $\Delta y \cos \theta$  是实际的对准偏差数据。根据图7中的曲线表明,此种情况下,当没有考虑角位移时,利用对准偏差(6)式产生的误差具有较大波动;如果考虑角位移,发现随着角位移的不断增大,实际的对准偏差与理论值相比越来越大。这与(25)式的结论基本一致。可见,即使保证两组标记高度平行,实际的位移值仍然与理论值有差异,并且误差随  $\theta$  的增大而增加。虽然两种情况下,与理论值的偏差不大,但是对于实际光刻对准中,无论是从现象上还是从信号提取上判断对准状态都是存在困难的。

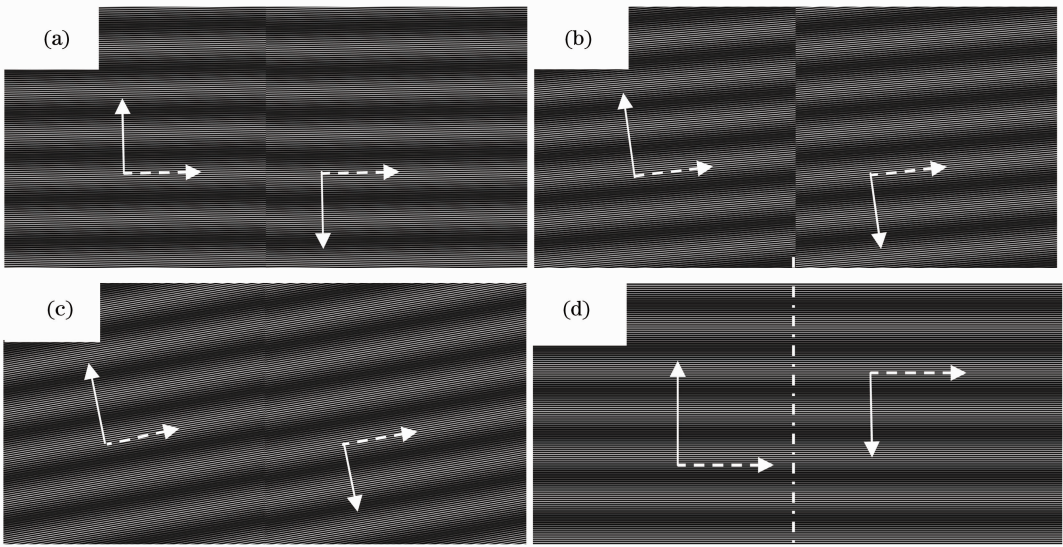


图 6 对准条件 2。(a)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 1^\circ$ ；(b)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 5^\circ$ ；(c)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 10^\circ$ ；(d)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 0^\circ$   
 Fig. 6 Alignment condition 2. (a)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 1^\circ$ ；(b)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 5^\circ$ ；(c)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 10^\circ$ ；  
 (d)  $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 0^\circ$

表 1 对准条件 2 ( $\Delta y = 0.1$  pixel)

Table 1 Alignment condition 2 ( $\Delta y = 0.1$  pixel)

$\theta / (^\circ)$	$\Delta y_2 / \text{pixel}$	$\Delta y \cos \theta / \text{pixel}$
1	0.0998	0.1000
2	0.1002	0.0999
3	0.1003	0.0999
4	0.1004	0.0998
5	0.0995	0.0996
6	0.0994	0.0995
7	0.0993	0.0993
8	0.0990	0.0990
9	0.0988	0.0988
10	0.0985	0.0985

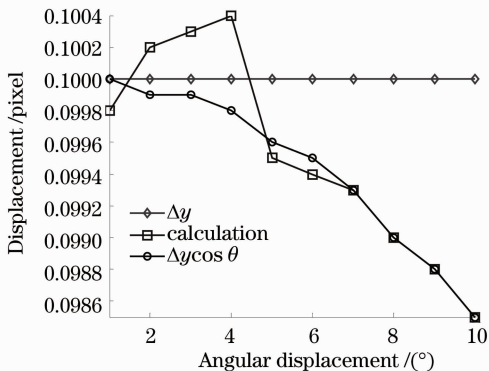


图 7 对准条件 2 ( $\theta_1 = \theta_2 = \theta \neq 0$ )

Fig. 7 Alignment condition 2 ( $\theta_1 = \theta_2 = \theta \neq 0$ )

3) 对准条件 3 ( $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0$ )

在光刻对准中,当掩模位置固定后,要实现掩模与光栅的对准,只需要调整基片的位置即可。换言之,当  $\theta_1 = 0$  的情况下,即在  $y$  方向准时,掩模上的光栅标记与  $x$  轴的夹角为零。此时,硅片的几何位置就会反映在叠栅条纹中。通过测量经叠栅条纹放大的角位移实现条纹方向的标定,就可以实现光刻对准。因此,对准偏差与理论值的关系为

$$\Delta y_3 = \Delta \phi_M / [2\pi(f_1 + f_2)] = [(f_1 + f_2 \cos \theta_2) / (f_1 + f_2)] \Delta y. \quad (26)$$

图 8(a)~(d)是对准偏差  $\theta_1$  为零对应的叠栅条纹。图 8 中白色实线箭头表示叠栅条纹的相位方向,虚线箭头表示叠栅条纹线的延伸方向。从图 8(a)~(c)可以看出,当  $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0$  时,叠栅条纹的几何分布对角位移非常敏感,其相位发生巨大的变化,严重影响相位的正确提取,从现象上完全无法判断是否对准。图 9(a)表示理论位移值 ( $\Delta y$ ) 与实际位移值  $\Delta y(f_1 + f_2 \cos \theta_2) / (f_1 + f_2)$  的数据曲线。数据表明,若考虑角位移,得到的对准偏差值随着角位移的增大,误差缓慢增加;如果对准中不考虑角位移,从图 9(b)可以得出结论,直接用(6)式计算对准偏差,其误差对角位移非常敏感,并且随角位移的增加,误差迅速增加。即使角位移  $\theta_2 \leq 1^\circ$  时,如果不考虑角位移对叠栅条纹相位提取的影响,其计算误差与理论值相比,仍然是不可接受的。

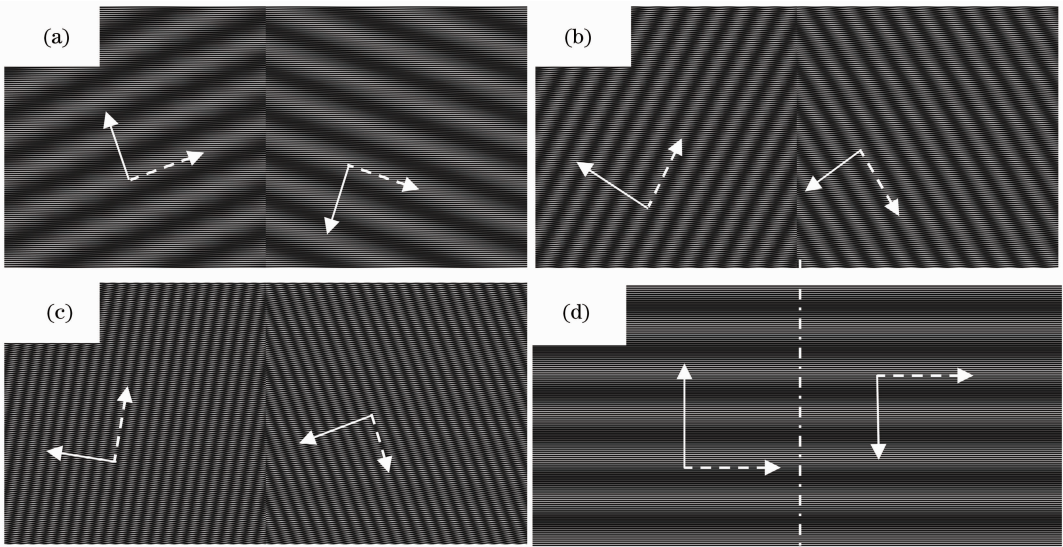


图 8 对准条件 3。(a)  $\theta_1=1^\circ$ ；(b)  $\theta_2=5^\circ$ ；(c)  $\theta_2=10^\circ$ ；(d)  $\theta_2=0^\circ$

Fig. 8 Alignment condition 3. (a)  $\theta_1=1^\circ$ ；(b)  $\theta_2=5^\circ$ ；(c)  $\theta_2=10^\circ$ ；(d)  $\theta_2=0^\circ$

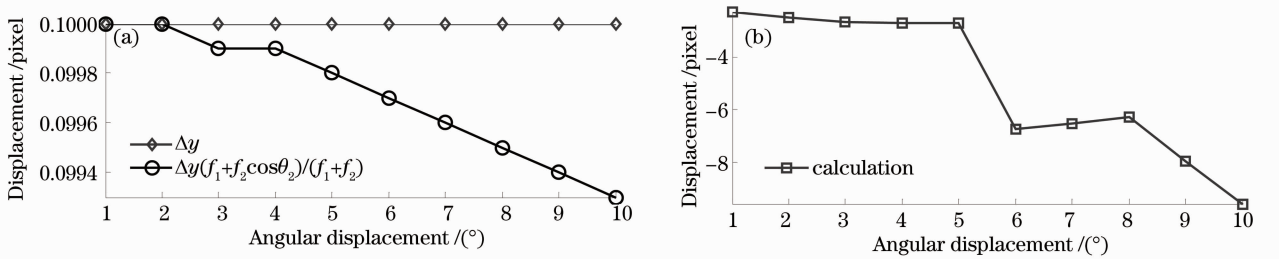


图 9 对准条件 3,误差分析( $\Delta y=0.1$  pixel,  $\theta_1=0, \theta_2 \neq 0$ )。(a)理论位移值与实际位移比较；

(b)不考虑角位移的位移计算结果

Fig. 9 Alignment condition 3, error analysis ( $\Delta y=0.1$  pixel,  $\theta_1=0, \theta_2 \neq 0$ ). (a) Comparison between theoretical displacement and real displacement; (b) displacement data obtained by calculation without considering angular displacement

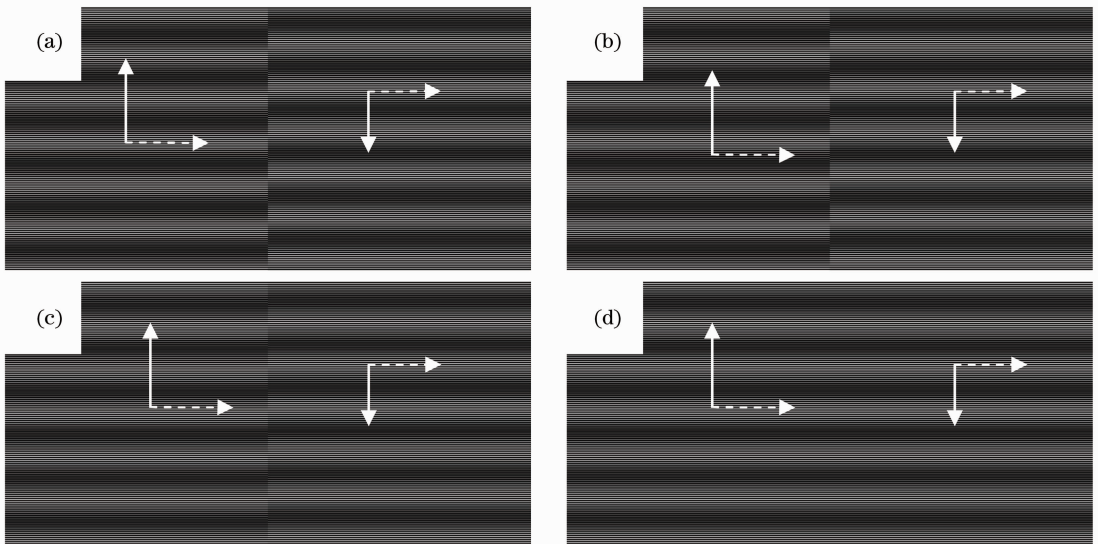


图 10 实际光刻对准偏差

Fig. 10 Alignment deviation of actual lithography

## 4 应用与讨论

实际光刻对准中,采用的是图 1 所示的光栅标记。图 1(a)与图 1(b)叠加形成的叠栅条纹如图 10 所示。图 10(a)~(d)分别对应  $y$  方向对准偏差为  $\bar{T}/4, \bar{T}/5, \bar{T}/10, 0$  的叠栅条纹,这里  $\bar{T} = 2T_1T_2/(T_1+T_2), T_1 = 4 \text{ pixel}, T_2 = 4.4 \text{ pixel}$ 。各图中,叠栅条纹的方向为标准方向,这里称之为“对准条件 4 ( $\theta_1 = \theta_2 = 0$ )”。

由(5)式可知,掩模与硅片的相对位移  $\Delta y$  直接引起两组条纹相对位移  $\Delta Y_M$ 。由此,只要满足  $\Delta y = (n/2)\bar{T}, (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$ ,即两光栅距离平均周期的半整数倍时,两组条纹之间距离为条纹周期的整数倍,此时两组条纹的空间相位一致。值得注意的是,图 10(d)表示两组条纹的对准偏差为  $\Delta y = (n/2)\bar{T}, (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 。因此,在光刻对准中,一般需要粗对准使两标记的距离小于以实现最终精对准。

基于上述理论,表 2 给出了对准偏差  $\Delta y = 0.1 \sim 0.4 \text{ pixel}$  的数值计算结果,数据表明,对准偏差随着偏差的不断增大而增加,理论上最大误差低于  $0.002 \text{ pixel}$ ,误差标准差为  $5.3702 \times 10^{-4} \text{ pixel}$ 。可见,基于叠栅条纹的光刻对准方法具有很高的对准精度。

表 2 对准条件 4

Table 2 Alignment condition 4

$\Delta y / \text{pixel}$	$\Delta y_1 / \text{pixel}$	$\Delta y / \text{pixel}$	$\Delta y_1 / \text{pixel}$
0.00	0.0000	0.20	0.1990
0.05	0.0497	0.25	0.2488
0.10	0.0995	0.35	0.3486
0.15	0.1492	0.40	0.3985

## 5 结 论

根据叠栅条纹的光刻对准理论,从一般矩形光栅的模型出发,分析了光栅相位分布的基本规律。在光刻对准中,掩模与硅片上的光栅标记存在不同的倾斜角,极大影响两组标记叠加后形成的叠栅条纹的空间分布和相位分布。文中列举了掩模和硅片上的对准标记叠加存在的几种可能的情况,深入分

析了对光刻对准精度的影响。最后对理想情况下对准作了仿真研究,分析了对准精度。研究表明,无论是掩模还是硅片存在角位移,对对准精度都有不同程度的影响。值得注意的是,当掩模和硅片角位移一致时,角位移对对准精度的影响不大,但不利于从形成的叠栅条纹现象上判断是否对准,并且实际应用中相位提取也是有困难的。因此,下一步的研究工作主要集中于如何在对准前实现光栅方向的标定。

## 参 考 文 献

- 1 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using moiré techniques [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. B*, 1972, **11**(6): 2455~2458
- 2 Y. Uchida, S. Hattori, T. Nomura. An automatic mask alignment technique using moiré interference[J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. B*, 1987, **5**(1): 244~247
- 3 S. Zhou, Y. Yang, L. Zhao *et al.*. Tilt-modulated spatial phase imaging method for wafer-mask leveling in proximity lithography [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3132~3134
- 4 S. L. Zhou, Y. Q. Fu, X. P. Tang *et al.*. Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7869~7880
- 5 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using moiré techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2455~2457
- 6 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 703~705  
周绍林, 杨 勇, 陈旺富 等. 基于双光栅的纳米测量方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 703~705
- 7 N. Li, W. Wu, S. Y. Chou. Sub-20-nm alignment in nanoimprint lithography using moiré fringe [J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(11): 2626~2629
- 8 A. Moel, E. E. Moon, R. D. Frankel *et al.*. Novel on-axis interferometric alignment method with sub-10 nm precision [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. B*, 1993, **11**(6): 2191~2194
- 9 E. E. Moon, M. K. Mondol, P. N. Everett *et al.*. Dynamic alignment control for fluid-immersion lithographies using interferometric-spatial-phase imaging [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. B*, 2005, **23**(6): 2607~2610
- 10 Zhu Jiangping, Hu Song, Yu Junsheng *et al.*. Theoretical analysis of photolithography alignment and calibration method based on moiré fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0607001  
朱江平, 胡 松, 于军胜 等. 基于叠栅条纹的光刻对准理论分析及标定方法 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0607001

栏目编辑: 何卓铭