

基于叠栅条纹的光刻对准理论分析及标定方法

朱江平^{1,2,3} 胡松¹ 于军胜² 唐燕¹ 周绍林¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 在线光栅用于纳米光刻对准理论的基础上,为实现光栅方向的标定和掩模硅片对准,提出一种利用相位斜率消除角位移的新方法,并给出线光栅标记及其对准原理。在对准前,掩模对准标记和硅片对准标记存在角位移,重点讨论了此种情况下叠栅条纹的特性以及与光栅物理参数的关系,并给出了相应的计算公式。基于傅里叶频域分析法,对叠栅条纹频率成分与条纹的关系做了简要分析。利用提取叠栅条纹行列方向的一维相位,通过数据拟合,得出了相位斜率与角位移的内在关系,实现了条纹方向的标定。模拟实验结果表明,该方法简单可靠,可分辨的最小角位移低于 0.02° 。

关键词 傅里叶光学;光刻对准;角位移;叠栅条纹;相位斜率;线光栅标记

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0607001

Theoretical Analysis of Photolithography Alignment and Calibration Method Based on Moiré Fringes

Zhu Jiangping^{1,2,3} Hu Song¹ Yu Junsheng² Tang Yan¹ Zhou Shaolin¹

¹ *Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

² *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*

³ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract To realize the calibration of grating direction and alignment between mask and wafer, on the basis of theory of line grating used for photolithography alignment, a novel method for eliminating angular displacement using phase slope is proposed. Line grating masks and their alignment principle are also given. Before alignment, there exists angular displacement between mask alignment marks and wafer alignment masks. The nature of Moiré fringes and their relation with physical parameters of grating are mainly discussed, and the corresponding calculation formulas are obtained. According to Fourier method of frequency domain, relation between Moiré fringe frequency components and stripes is briefly analyzed. Using extracted one dimensional phase of Moiré fringes in ranks, inner relation between phase slope and angular displacement is obtained by data fitting, and calibration of stripe direction is realized. Simulation experimental results show that this method is simple and reliable, minimum angular displacement with less than 0.02° can be identified.

Key words Fourier optics; photolithography alignment; angular displacement; Moiré fringe; phase slope; line grating mark

OCIS codes 070.2615; 070.4790; 070.6120

1 引言

近年来,高分辨力光刻技术促进了纳米科技的发展,纳米器件作为纳米技术的基础,与光刻技术的

快速进步密不可分;另外,随着大规模集成电路及器件的研发,其特征尺寸越来越小,进而对光刻分辨力提出了更高的要求。目前,193 nm ArF 浸没式光刻

收稿日期: 2011-11-29; **收到修改稿日期**: 2012-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(61076099)和国家 863 计划(2009AA03Z341)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等方面的研究。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

技术已突破 45 nm 线宽并且有望延伸至 32 nm。然而,仅凭借缩短波长与增大数值孔径的光学光刻方法遇到了技术上的极大挑战,尤其是 32 nm 节点下光刻设备所需的高额成本已成为该领域的障碍。

对准技术是光刻的核心技术之一,一般要求对准精度为特征尺寸的 1/7~1/10。光刻分辨率的提高,导致对准精度提出更高的要求,当前所需的对准精度已进入纳米量级。目前流行的对准方法大体上包括:基于几何图案标记、波带片及光栅标记等,每种方法都有不同优缺点。传统对准方法的精度已经难以适应逐渐提高的光刻分辨率,研究与之相应的高精度对准方法具有重要意义。其中,周绍林等^[1~3]提出了基于光栅调制相位成像的纳米光刻对准方法,将叠栅条纹应用到光刻对准中,理论上该方法具有纳米级(小于 10 nm)的精度,但还有诸多问

题尚未解决,比如掩模标记与硅片光栅标记之间存在角位移将无法实现精确对准的问题,由此本文研究相应的标定方法消除角位移很有必要,这对该对准方法推向实际应用具有重要意义。

2 叠栅条纹对准理论

2.1 线光栅对准标记与对准原理

在掩模与硅片精对准中,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^[1~4]。图 1 为精对准采用的光栅标记。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,在此以 y 方向对准为例加以说明。

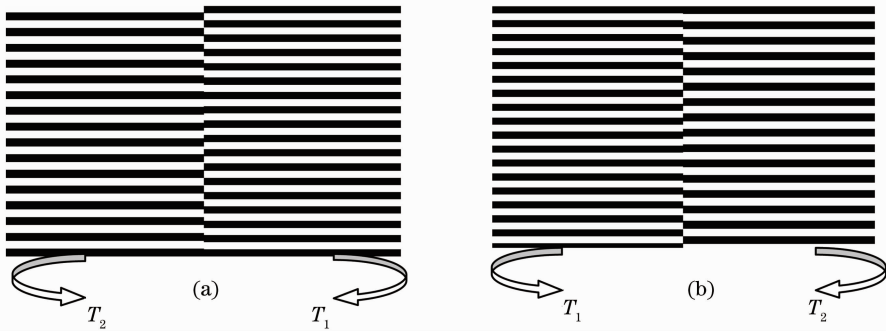


图 1 线光栅标记。(a)掩模标记;(b)硅片标记

Fig. 1 Line grating marks. (a) Mask label; (b) 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,对于常用的(+1, -1)级叠栅条纹,对应叠栅条纹的周期为

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

当硅片相对掩模偏移 Δy 时,左右两组条纹产生的相移为

$$\phi_R = 2\pi\Delta y/T_1, \text{ 与 } \phi_L = -2\pi\Delta y/T_2. \quad (2)$$

由于左右两组条纹相移方向相反,其相移差为

$$\Delta\phi_M = \phi_R - \phi_L = 2\pi\Delta y(1/T_1 + 1/T_2), \quad (3)$$

则左右两组条纹的相对移动量为

$$\Delta Y_M = \Delta Y_R + \Delta Y_L = \frac{T_1 + T_2}{T_2 - T_1} \Delta y. \quad (4)$$

因此,只要提取硅片相对于掩模偏移叠栅条纹的相移差,就可通过(3)式计算硅片相对于掩模的对准偏差

$$\Delta y = \phi_R - \phi_L = 2\pi\Delta\phi(1/T_1 + 1/T_2) = [\Delta\phi_M/(2\pi)] \times (\bar{T}/2), \quad (5)$$

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

以上分析是硅片光栅标记与掩模标记之间严格平行所适用的情况。然而,当硅片相对于掩模之间存在某一微小角位移时,利用线光栅叠栅条纹实现的对准方案是不能实现的。这是因为当光栅倾斜时获得的左右两组叠栅条纹的相位差与光栅高度平行得到的叠栅条纹的相位差相比,具有很大的差异。此时通过叠栅条纹相位差反馈得到的对准位置是不可靠的。因此,要利用线光栅形成的差动叠栅条纹实现掩膜与硅片的高精度对准,必须在计算分析对准偏差前,保证掩膜与硅片上的光栅标记达到互相平行或准平行的状态,即光栅标记平行标定。

2.2 两组标记存在角位移

不失一般性,对于两标记在直角坐标系中存在旋转的情况,假设两标准线光栅经过旋转变换,得到斜条纹分布。设其变换规则为

$$G_1(x, y) = x \cos \alpha_1 + y \sin \alpha_1, \quad (6)$$

$$G_2(x, y) = x \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_2, \quad (7)$$

式中 α_1, α_2 表示旋转角度。则两斜条纹光栅方程可以表示为

$$I_1 = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi G_1(x, y)/T_1], \quad (8)$$

$$I_2 = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi G_2(x, y)/T_2]. \quad (9)$$

两光栅重叠后得到的光场分布

$$I = I_1 \times I_2 = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos\left(2\pi \frac{x \cos \alpha_1 + y \sin \alpha_1}{T_1}\right) + \cos\left(2\pi \frac{x \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_2}{T_2}\right) + \right. \\ \left. \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \left(\frac{\cos \alpha_1}{T_1} + \frac{\cos \alpha_2}{T_2}\right)x + 2\pi \left(\frac{\sin \alpha_1}{T_1} + \frac{\sin \alpha_2}{T_2}\right)y\right] + \right. \\ \left. \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \left(\frac{\cos \alpha_1}{T_1} - \frac{\cos \alpha_2}{T_2}\right)x + 2\pi \left(\frac{\sin \alpha_1}{T_1} - \frac{\sin \alpha_2}{T_2}\right)y\right] \right\}, \quad (10)$$

对(10)式分析可知,虚线框内的表达式具有明显较低的空间频率,即叠栅斜条纹项。叠栅斜条纹相对于水平方向的倾斜角为

$$\omega_M = \arctan(F_v/F_u), \quad (11)$$

式中 $F_u = \frac{\cos \alpha_1}{T_1} - \frac{\cos \alpha_2}{T_2}$, $F_v = \frac{\sin \alpha_1}{T_1} - \frac{\sin \alpha_2}{T_2}$, 分别代表叠栅条纹在 x, y 方向的频率。

若 $\alpha_1 = 0$, 即以光栅 T_1 为基准建立直角坐标(不旋转), 则 $\alpha_2 = \Delta\delta$, $\Delta\delta$ 表示两组光栅之间的角位移, 如图 2 所示。此时形成的叠栅条纹与光栅 T_2 之间的夹角为

$$\phi_2 = \arctan\left(\frac{T_2 \sin \Delta\delta}{T_2 \cos \Delta\delta - T_1}\right). \quad (12)$$

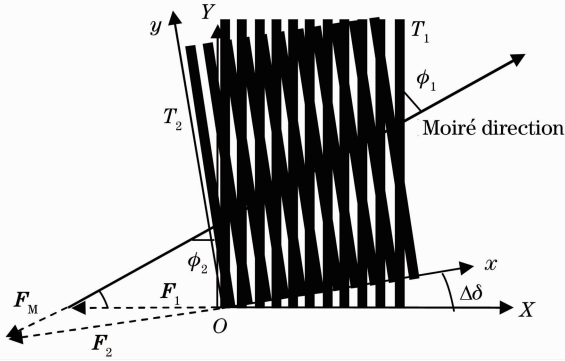


图 2 叠栅条纹示意图

Fig. 2 Moiré fringes scheme

若 $\alpha_2 = 0$, 即以光栅 T_2 为基准建立直角坐标(不旋转), 则 $\alpha_1 = \Delta\delta$, 此时形成的叠栅条纹与光栅 T_1 之间的夹角为

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{T_1 \sin \Delta\delta}{T_1 \cos \Delta\delta - T_2}\right). \quad (13)$$

图 2 为两周期相近且具有一定角位移 $\Delta\delta$ 的光栅叠加形成的斜叠栅条纹。其中 ϕ_1, ϕ_2 分别为叠栅条纹的方向与原始光栅 ϕ_2, ϕ_1 之间的夹角。如图中虚线

矢量三角形所示, 通过几何关系转换可以得到叠栅条纹矢量 F_M 、光栅 T_1 矢量 F_1 与光栅 T_2 矢量 F_2 之间的关系^[3]

$$F_M = F_2 - F_1, \quad (14)$$

式中 $F_2 = \exp(j\alpha_2)/T_2$, $F_1 = \exp(j\alpha_1)/T_1$ 。

通过(14)式和图 2 中的矢量关系, 可以得到叠栅条纹的节距(宽度)^[5,6]

$$T_M = T_1 T_2 / \sqrt{T_1^2 + T_2^2 - 2T_1 T_2 \cos \Delta\delta}. \quad (15)$$

设定角位移范围为 $(-15^\circ, 15^\circ)$, 硅片与掩模差动光栅标记的周期分别为 $T_1 = 4$ pixel, $T_2 = 4.4$ pixel 可以得到叠栅条纹宽度与角位移、原光栅 T_1, T_2 的夹角关系以及两组光栅形成叠栅条纹的夹角与角位移的关系, 如图 3 所示。从图 3(a) 可以看出, 叠栅条纹的宽度随角位移增大迅速减小; 图 3(b) 与图 3(c) 反映了叠栅条纹与两差动光栅的夹角随角位移的增大而急剧增大的趋势, 但是两种情况下条纹移动方向相反。当角位移 $\Delta\delta \in (-5^\circ, 5^\circ)$ 时, 叠栅条纹对微小角位移的放大作用存在近似线性关系。图 3(d) 反应两组叠栅条纹的夹角与角位移之间的关系, 当 $\Delta\delta \in (-5^\circ, 5^\circ)$ 时, 两组叠栅条纹的相对夹角大约在 $(-80^\circ, 80^\circ)$ 之间, 而且当角位移很小时, 条纹的倾斜很明显。由此, 如果两组差动标记光栅存在一微小夹角, 用线光栅实现掩模与硅片的精对准以及利用(9)、(10)式计算对准偏差无法实现的, 计算的数据误差巨大。

3 条纹对准现象及分析

基于上述理论分析, 对线光栅标记实现纳米光刻精对准的两种情况, 即存在角位移和不存在角位移时实现精对准作了详细分析, 并利用傅里叶变换法重点分析了角位移的计算方法和消除途径。

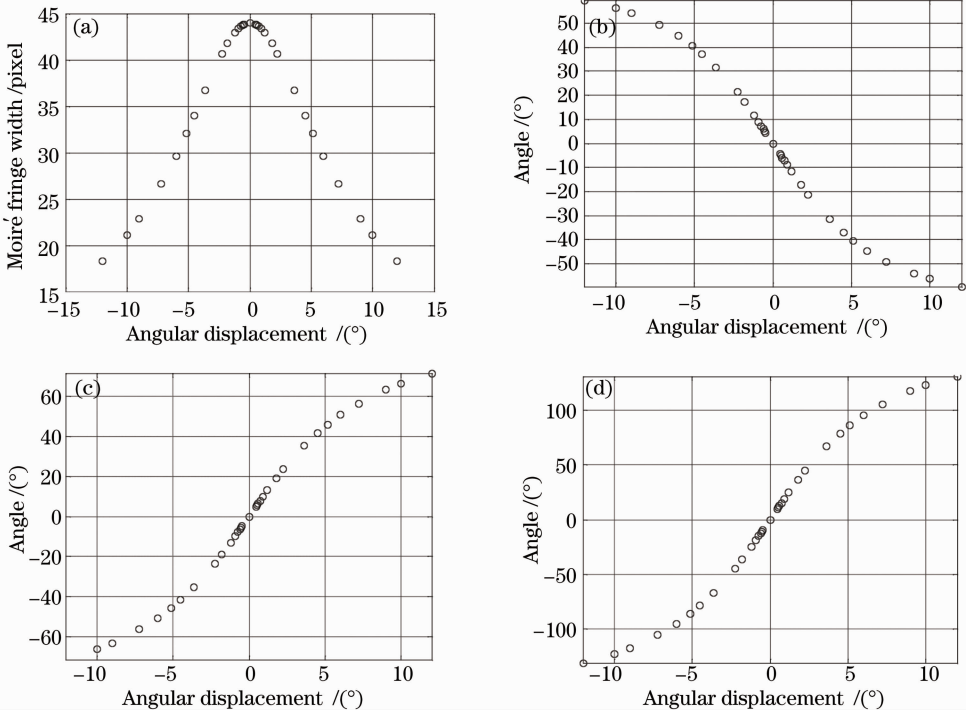


图 3 角位移与叠栅条纹的关系。(a)叠栅条纹的宽度与角位移之间的关系;(b)叠栅条纹与光栅 1 的夹角关系;(c)叠栅条纹与光栅 2 的夹角关系;(d)两组叠栅条纹的夹角与角位移的关系

Fig. 3 Relation between angular displacement and Moiré fringes. (a) Relation between Moiré width and angular displacement; (b) relation between Moiré fringes and grating 1; (c) relation between Moiré fringes and grating 2; (d) relation between two Moiré fringes and angular displacement

3.1 零角位移对准

如图 4 所示,硅片与掩模光栅标记之间角位移为零时的对准过程。其中图 4(a)~(e)的对准偏差分别是 $\Delta x = \bar{T}/4, \bar{T}/8, \bar{T}/16, \bar{T}/32, \bar{T}/64$ 。相应地上下两组条纹间的相移差为 $\pi, \pi/2, \pi/4, \pi/8, \pi/16$ 。图 4(f)是硅片与掩模刚好对准时对应的叠栅条纹图。计算发现,当 $\Delta x = N \times (\bar{T}/2), N = 0, 1, 2, 3, \dots$, 即对

应两组条纹的相移差为 2π 的整数倍时,上下两组条纹完全重合,这与(5)式完全符合。由于 T_1, T_2 大小接近,从(4)式可以得出,硅片的微小位移将会受到叠栅条纹的明显放大和移动作用,而且周期差别越小,放大倍率越大,条纹移动越灵敏。图 1 所示标记可以产生两组相移反向的差动条纹,这使得对硅片的位移探测更加灵敏。这种方法在理论上可以达

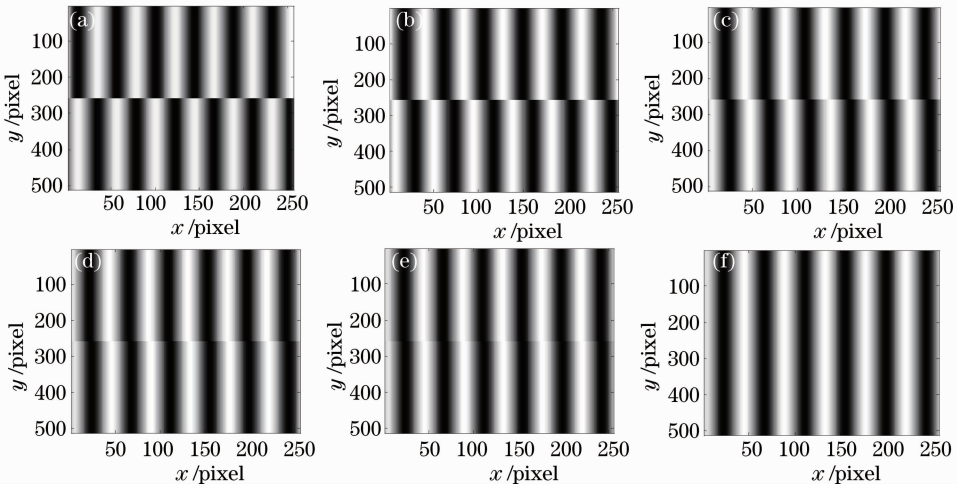


图 4 线光栅标记对准。相移差为(a) π ; (b) $\pi/2$; (c) $\pi/4$; (d) $\pi/8$; (e) $\pi/16$; (f) 0

Fig. 4 Line grating mark alignment. Phase displacement differences are (a) π ; (b) $\pi/2$; (c) $\pi/4$; (d) $\pi/8$; (e) $\pi/16$; (f) 0

到纳米量级的精度。

3.2 存在角位移对准

在实际光刻对准过程中,随着光刻分辨力的不断提高,对准精度也提出更高的要求。然而掩模(光栅标记)与硅片(光栅标记)调平调焦以及粗对准后,仍然不可能完全保证对准标记高度平行,这就给实

际对准造成困难,但可以利用叠栅条纹对角位移的放大作用来探测角位移完成标定。如图5所示,假设当掩模与硅片存在角位移存在较小角位移到逐渐消除至零的几组条纹图。计算表明,两组标记光栅存在微小角位移会造成叠栅条纹的明显倾斜。图中由于角位移差别不大,叠栅条纹的宽度并没有明显变化。

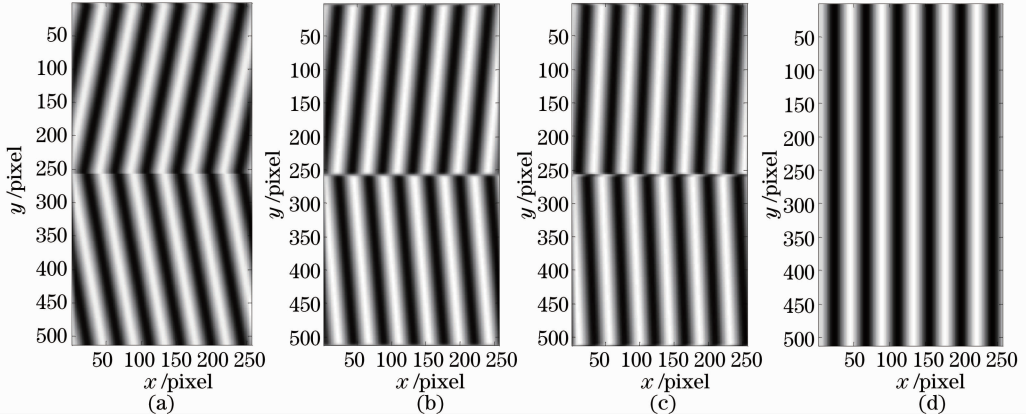


图5 掩模与硅片角位移分别为 (a) 1°; (b) 0.5°; (c) 0.25°; (d) 0°

Fig. 5 Angular displacements between mask and wafer are (a) 1°; (b) 0.5°; (c) 0.25°; (d) 0°

4 傅里叶分析法消除角位移

4.1 叠栅条纹频域分析

当硅片与掩模光栅标记存在面内角位移时,且掩模的位置固定后,只需要调整硅片并与掩模对准后即可曝光。硅片与掩模之间存在一定角位移时硅片和掩模上的两组差动光栅标记形成的叠栅条纹与水平方向有一定夹角。如图6所示,截取了上半部分的叠栅条纹来分析,其中上一组图像为叠栅条纹,下一组图像为经过滤波操作后得到的对应纯叠栅条

纹。针对最容易分辨的(+1, -1)级叠栅条纹,通过傅里叶变换分析发现,在叠栅条纹的频谱域中,叠栅条纹的频率、周期、叠栅条纹与水平方向的夹角和两光栅的角位移存在以下关系^[7]:

$$F_M = (F_u^2 + F_v^2)^{1/2}, \quad T_M = 1/F_M,$$

$$\sin \omega_M = \frac{T_1 \sin \Delta\delta}{\sqrt{(T_1^2 + T_2^2 - 2T_1 T_2 \cos \Delta\delta)}}, \quad (16)$$

如图7所示。

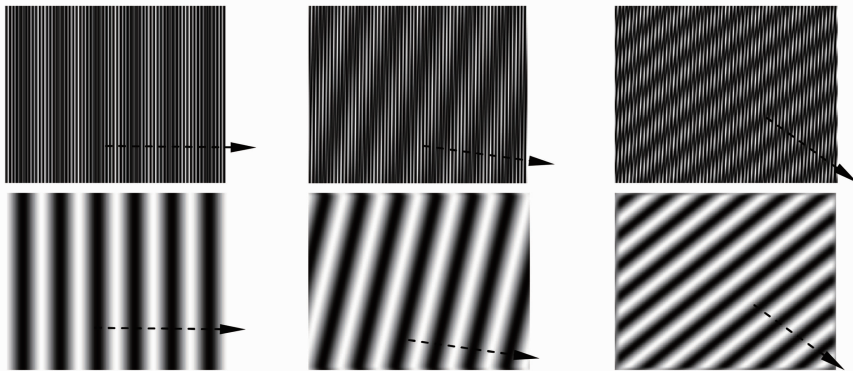


图6 叠栅条纹与纯叠栅条纹

Fig. 6 Moiré fringes and pure Moiré fringes

为便于分析,图7中只给出了零频和差频(叠栅项)^[8]。为此,图6展示了几组掩模与硅片存在偏移的叠栅条纹图。经过傅里叶变换到频域^[9,10],叠栅项对应的差频成分会在频谱面的位置发生改变,并

且其位置代表了垂直方向上叠栅条纹的性质,如图6虚线箭头所示。因此,只要将叠栅条纹频率项滤波后,得到纯叠栅条纹并提取相位,就可以利用相位的改变计算叠栅条纹与水平方向的倾斜角。

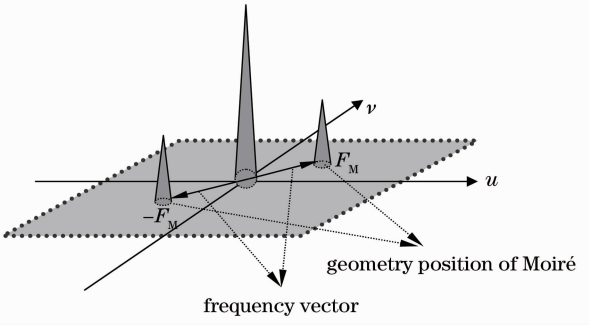


图 7 叠栅条纹的频域示意图

Fig. 7 Frequency domain schemes of Moiré fringes

4.2 相位斜率消除角位移

随着叠栅条纹倾斜角的不断改变,其频率成分在频谱面中得位置也会相应变化。值得注意的是,叠栅条纹的相位也会发生改变,特别是在 x, y 方向相位分量 Ψ_x, Ψ_y 将会发生明显变化。以下根据相位变化提出两种计算角位移的方案。

不失一般性,对于一般的 x, y 方向的叠栅条纹,其方程可以表示为

$$I = A + B\cos(K_x x + K_y y), \quad (17)$$

式中 A 代表条纹的背景光强度,对相位不敏感, $K_x = 2\pi F_u, K_y = 2\pi F_v$, 称之为相位斜率。则

$$\psi_M(x, y) = \psi_x(x, y) + \psi_y(x, y),$$

$$\psi_x(x, y) = K_x x, \quad \psi_y(x, y) = K_y y. \quad (18)$$

1) 方案 A:

结合(11)式有

$$\omega_M = \arctan\left(\frac{K_y}{K_x}\right), \quad (19)$$

因此,只要知道叠栅条纹两个方向的相位斜率并结合(16)式就可以计算并消除硅片与掩模光栅标记之间的角位移,从而实现对准。

2) 方案 B:

因为 $K_x = 2\pi F_u, K_y = 2\pi F_v$, 则

$$F_u = \frac{K_x}{2\pi}, \quad F_v = \frac{K_y}{2\pi}, \quad (20)$$

因此,综合(15)、(16)式中的前 2 个公式与(20)式得到角位移的计算公式为

$$\Delta\delta = \arccos\left[\frac{(T_1^2 + T_2^2)T_M^2 - T_1^2 T_2^2}{2T_1 T_2 T_M^2}\right] (\text{clockwise}),$$

$$\Delta\delta = \arccos\left[\frac{(T_1^2 + T_2^2)T_M^2 - T_1^2 T_2^2}{2T_1 T_2 T_M^2}\right] (\text{inverse clockwise}), \quad (21)$$

比较方案 A 和 B,其共同特点就是利用了相位计算角位移,实现差动光栅标记方向的标定。然而,分析发现,方案 B 对角位移的变化比较敏感且易于计算。

4.3 数值计算与讨论

通过上述分析,图 8 给出(a)角位移为 1° 时的叠

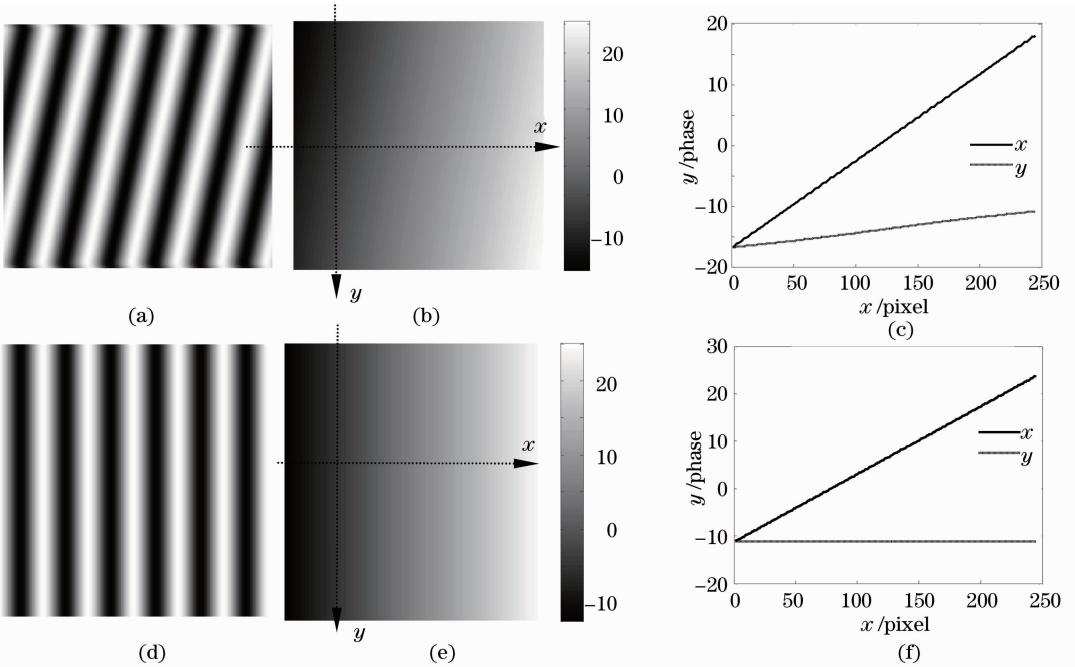


图 8 角位移计算。角位移为 1° 时:(a)叠栅条纹,(b)相位,(c) x, y 方向的一维相位;角位移为 0° 时:(d)叠栅条纹,(e)相位,(f) x, y 方向的一维相位

Fig. 8 Calculation of angular displacement. Angular displacement 1° : (a) Moiré fringes, (b) phase, (c) one-dimensional (1D) phase of x, y direction; angular displacement 0° : (d) Moiré fringes, (e) phase, (f) 1D phase of x, y direction

栅条纹,图 8(b)对应的相位分布与(c) Ψ_x, Ψ_y ,其中原始光栅标记的周期分别为 4 pixel 和 4.4 pixel,图像大小为 264 pixel \times 264 pixel。对于图 8(b)的连续相位分布,通过行列相位扫描可以得到图 8(c)中的一维相位曲线,再经过线性拟合,就可以计算 K_x, K_y 实现角位移的高精度计算。为便于对比分析,给出了角位移为零时,叠栅条纹图样及其相位分布,如

表 1 B 方案计算结果

Table 1 Calculation results based on B scheme

$\Delta\delta$ (theory) /($^\circ$)	K_x	K_y	T_M /pixel	$\Delta\delta'$ (simulation) /($^\circ$)
0	0.14280	1.6637×10^{-16}	43.9999	0.0118
1	0.14259	0.026954	43.2979	0.9878
2	0.14198	0.054083	41.6644	1.9848
3	0.14094	0.081573	38.5840	2.9947

从表 1 可以看出, K_y 的值随角位移从 0° 跃变到 1° 急剧变化,反映了 K_y 对角位移具有很高的灵敏度,而且随角位移的增加测量误差越小;理论角位移 $\Delta\delta$ 与模拟计算结果 $\Delta\delta'$ 相比发现,利用方案 B 理论可以分辨的最小角位移小于 0.02° 。可见,该方法具有较高的测量精度。

5 结 论

线光栅用于纳米光刻对准的方法中,由于对准过程中掩模光栅标记与硅片光栅标记存在面内角位移,叠栅条纹就会产生明显的倾斜,这种现象对实现精对准是不利的,提出了一种基于叠栅相位斜率变化的新方法,该方法直接利用差动光栅标记形成的叠栅条纹探测角位移,不需要设计另外的标记。通过初步分析,该方法理论上能够较好地消除角位移。同时给出了几种途径可以计算角位移:1)利用叠栅条纹的周期(频率)计算角位移;2)利用斜叠栅条纹相位变化计算角位移;3)探测两组叠栅条纹的夹角消除角位移。理论分析表明,B 方案对角位移的变化比较敏感,模拟计算可分辨的最小角位移小于 0.02° 。对一般的基于光栅标记对准的投影光刻对准、纳米压印光刻以及无掩模光刻对准都有重要的指导意义。

参 考 文 献

1 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-

图 8(d)~(f)。结果发现,图 8(c)与图 8(f)中 x 方向的相位斜率没有变化,而 y 方向的相位斜率发生了明显变化,这是因为角位移被叠栅条纹放大后,叠栅条纹的空间相位也发生了明显变化;并且当角位移为零时, y 方向的相位斜率为零。因此可以通过这一点判断零角位移点。为证实本文提出方案的有效性,基于方案 B,表 1 给出了不同角位移时的计算结果。

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

2 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

3 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

4 Wangfu Chen, Wei Yan, Song Hu *et al.*. Extended dual-grating alignment method for optical projection lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(4): 708~713

5 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

6 G. Oster, M. Wasserman, C. Zwerling. Theoretical interpretation of Moiré patterns[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(2): 169~175

7 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using Moiré techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2455~2457

8 M. Taketa, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160

9 Song Lei, Yue Huimin. Fourier transform profilometry of colorful composite grating based on point array projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1369~1370

宋雷,岳慧敏.基于点阵投影的彩色复合光栅傅里叶变换轮廓术[J].*光学学报*,2010,**30**(5):1369~1370

10 Chen Lijuan, Xu Lihua. Fourier transform profilometry for surface with specular reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1349~1353

陈利娟,徐利华.含镜面反射面形的傅里叶变换轮廓术[J].*光学学报*,2010,**30**(5):1349~1353