

光刻对准中掩模光栅标记成像标定方法

朱江平^{1,2,3} 胡松¹ 于军胜² 唐燕¹ 周绍林⁴ 何渝^{1,3}

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中国科学院大学, 北京 100049
⁴华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510540

摘要 双光栅叠栅条纹对准方法具有精度高、可靠性强等特点,适用于接近接触式光刻。为了实现高精度测量,实际应用中要求掩模光栅标记与硅片光栅标记高度平行。掩模光栅标记在 CCD 中成像通常存在一定的倾斜角。由此,在已提出的相位斜率倾斜条纹标定方法上,提出了一种改进方法。该方法充分利用掩模光栅 45° 和 135° 两个方向的相位信息标定 CCD 的成像位置,以实现掩模光栅条纹的标定。对比两种方法分析表明,改进后的方法具有倾角测量范围大、抗噪性强、精度高等优点,理论极限精度优于 0.001° 量级。

关键词 光栅;掩模光栅;光刻对准;角度标定;叠栅条纹

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0108002

Calibration Method for Mask Grating Mark Imaging in Lithography Alignment

Zhu Jiangping^{1,2,3} Hu Song¹ Yu Junsheng² Tang Yan¹ Zhou Shaolin⁴ He Yu^{1,3}

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

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

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

⁴School of Electronic & Information, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510540, China

Abstract The alignment method of dual-grating Moiré fringe has characteristics of high-accuracy and reliability, which is mainly fit for contact and proximity lithography. For the realization of high-accuracy measurement, the parallelism between mask grating mark and wafer grating mark is practically required. Generally, mask grating mark imaged in CCD has a tiny inclined angle. Therefore, an improved method is proposed, based on the previously proposed calibration method for inclined fringes through phase slope. The improved method makes full use of phase information in directions of 45° and 135° to revise the imaging position of CCD. By this mean, the mask grating fringes are also calibrated. Through comparison between the two methods, the results imply that the improved method is provided with large-measurement scope, strong anti-noise and high-accuracy, and measurement accuracy is better than 0.001° level.

Key words gratings; mask grating; lithography alignment; angle calibration; Moiré fringes

OCIS codes 050.2770; 120.4120; 220.1140

1 引言

在光刻过程中,套刻精度是体现光刻工艺整体

性能的重要技术指标之一。而套刻精度的提高是凭借高精度的对准系统来实现的。一般而言,套刻误

收稿日期: 2012-07-03; 收到修改稿日期: 2012-09-24

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,博士,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

差只允许为特征尺寸的 1/10~1/7。而掩模与硅片之间的对准问题是导致套刻误差的主要因素。

在光刻对准技术中,基于双光栅差动叠栅条纹光刻对准方法^[1~3],对准标记制作成两套周期接近的光栅,当两套光栅标记叠加形成反映掩模与硅片位置信息的叠栅条纹。在保证掩模光栅标记与硅片光栅标记高度平行的前提下,该方法可实现纳米级高精度对准,具有较强的实用性。

然而,先前的研究理论主要针对于掩模与硅片的相对位移对准研究^[1~5]。通常,正确提取携带掩模与硅片对准信息的叠栅条纹相位是实现高精度对准的关键因素之一,其与掩模、CCD 以及硅片的倾角密切相关。遗憾的是有关这方面的研究甚少。传统的一些角位移测量方法具有较高精度^[6,7],但不适用于面内倾角的测量。为了满足双光栅差动叠栅条纹对准用于实际接近接触式光刻对准的需要,基于掩模与硅片的相对位置标定研究^[3],本文重点在理论上设计一种方法,标定掩模与 CCD 之间的位置关系,即凭借 CCD 对掩模光栅标记成像计算条纹的

倾斜角,反过来标定 CCD 的成像位置,以期为后续的对准系统夯实理论基础。

2 掩模标记成像

如图 1 所示,当 CCD 相对于掩模存在面内倾角时(这里不考虑硅片的位置状态),掩模光栅标记在 CCD 中的像就会发生倾斜。其中图 1(a)是当 CCD 相对于水平位置倾斜一定角度时,获取掩模标记的示意图。CCD 获取掩模标记得到的光栅像如图 1(b)所示。显然,掩模标记成像后,其相对于本身位置旋转了一定角度。在实际应用中,通常光刻机组装以后,掩模的位置就相对固定。因此掩模标记成像标定可以通过 CCD 的成像位置来标定。

上述分析表明,CCD 获取标记的位置发生倾斜后,掩模标记成像后会发生同样角度的倾斜。利用获取的标记条纹,经图像分析,可以计算条纹的倾角来标定 CCD 的成像位置,便于后续硅片与掩模之间的对准。图 1(c)为标定后的掩模对准标记图像。

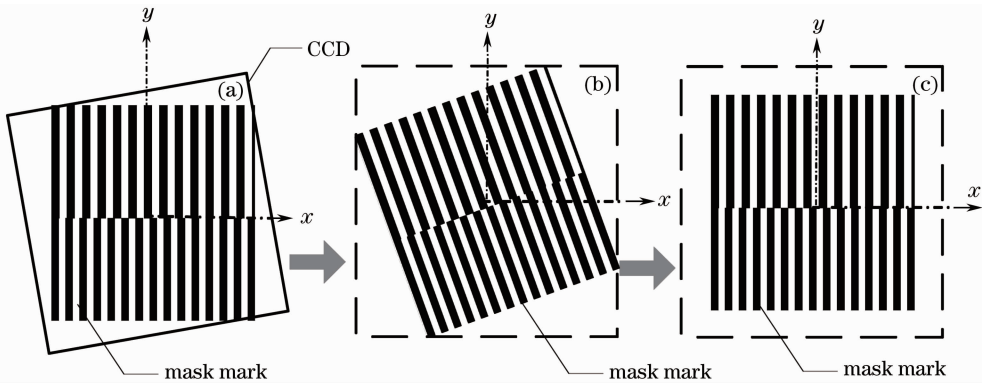


图 1 CCD 成像示意图。(a)倾斜成像;(b)掩模标记成像后的图像;(c)标定后成像

Fig. 1 Schematic of CCD imaging. (a) Inclined imaging; (b) inclined fringes after imaging; (c) imaging after calibration

3 掩模标记成像标定

当 CCD 存在一定倾斜角时,掩模光栅标记的成像后也会以同样角度倾斜。基于先前提出的相位斜率的条纹倾斜标定方法^[3],利用倾斜的光栅条纹相位信息,提出了一种改进的标定方法。以下就两种方法作对比分析。

3.1 标定方法

3.1.1 先前的标定方法

掩模光栅标记采用罗琦(Ronchi)光栅。如图 1 所示,当 CCD 采集到掩模光栅标记后,光栅标记可以采用快速傅里叶变换的方法(FFT)分析条纹的相位信息^[8,9]。为便于叙述,假设 CCD 获取的条纹分

布可以表示为

$$I(x, y) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y), \quad (1)$$

式中 $I_b(x, y)$ 表示背景光强度, $I_a(x, y)$ 表示缓慢变化的条纹振幅, f_x 和 f_y 表示条纹在 x 、 y 两个方向上的空间频率,同时忽略初始相位。

这里定义

$$k_x = 2\pi f_x, k_y = 2\pi f_y, \quad (2)$$

式中 k_x, k_y 分别为方向上相位斜率^[3]。则条纹相位为

$$\phi(x, y) = \phi_x(x, y) + \phi_y(x, y), \quad (3)$$

其中

$$\phi_x(x,y) = k_x x, \quad \phi_y(x,y) = k_y y, \quad (4)$$

由(1)~(4)式,条纹的倾角可表示为^[3]

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_x}{k_y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{f_x}{f_y}\right). \quad (5)$$

标定的处理步骤如图 2 所示。

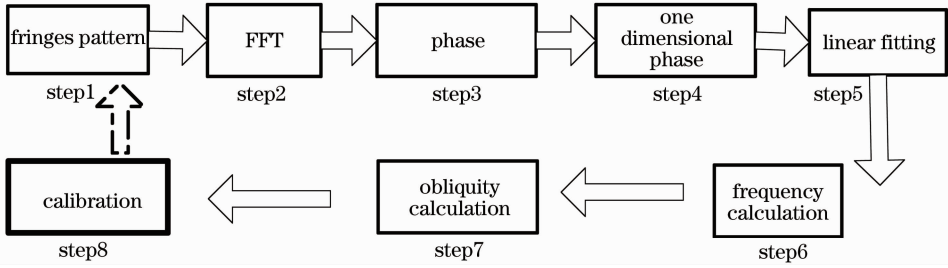


图 2 标定步骤

Fig. 2 Calibration steps

step1:掩模光栅标记位置固定,CCD 获取光栅图像;

step2:对条纹进行快速傅里叶变换;

step3:相位展开得到条纹的连续相位分布;

step4:取 step3 中所得相位任意行列的一维相位;

step5:对 step4 中的 x, y 方向上的一维相位进行拟合得到行列两个方向上的相位斜率 k_x, k_y ;

step6:利用 step5 中的相位斜率计算行列方向上的空间频率 f_x, f_y ;

step7:利用 step6 中的频率分量计算条纹的倾角;

step8:通过 step7 中的计算结果,标定 CCD 的成像位置。

3.1.2 改进的标定方法

3.1.1 所述方法中,step6 中的空间频率 f_x, f_y 通过 step5 中的相位斜率计算。这里以 45° 和 135° 正交方向上的相位差计算 $f_{x_{45^\circ}}, f_{y_{135^\circ}}$,从而间接计算条纹的倾角,如图 3 所示。

在图 3 中,条纹的倾斜角为 θ ,条纹的频率为 f 。通过将条纹的频率分别投影到 $x_{45^\circ} o y_{135^\circ}$ 坐标系统

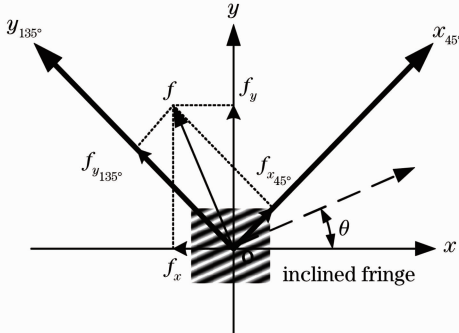


图 3 改进的标定方法空间频率分析示意图

Fig. 3 Schematic of spatial frequency analysis for improved calibration method

中,则根据几何关系有

$$\begin{cases} f_{x_{45^\circ}} = f \sin(45^\circ - \theta), \\ f_{y_{135^\circ}} = f \cos(45^\circ - \theta). \end{cases} \quad (6)$$

因此,通过(6)式可以得到条纹的倾斜角为

$$\theta = 45^\circ - \tan^{-1}(f_{x_{45^\circ}}/f_{y_{135^\circ}}), \quad (7)$$

式中, 45° 和 135° 方向上的频率分量为

$$\begin{cases} f_{x_{45^\circ}} = \Delta\phi_{x_{45^\circ}} / (2\pi\Delta n_{x_{45^\circ}}), \\ f_{y_{135^\circ}} = \Delta\phi_{y_{135^\circ}} / (2\pi\Delta n_{y_{135^\circ}}), \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\Delta\phi_{x_{45^\circ}}$ 与 $\Delta\phi_{y_{135^\circ}}$ 分别表示 45° 和 135° 方向上 CD、AB 的相位差; $\Delta n_{x_{45^\circ}}$ 与 $\Delta n_{y_{135^\circ}}$ 分别表示 45° 和 135° 方向上 CD、AB 之间的像素个数,如图 4 所示。通常 $\Delta n_{x_{45^\circ}}$ 与 $\Delta n_{y_{135^\circ}}$ 预先设置为大小相等。所以,(6)式可以改写为

$$\theta = 45^\circ - \tan^{-1}(\Delta\phi_{x_{45^\circ}}/\Delta\phi_{y_{135^\circ}}). \quad (9)$$

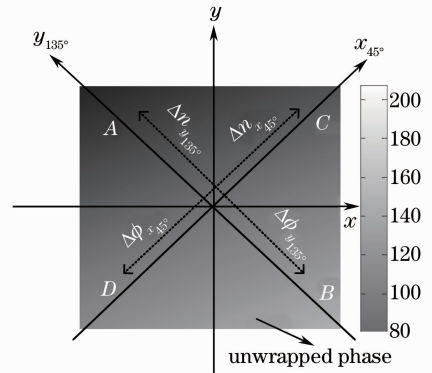


图 4 改进的标定方法倾角计算示意图

Fig. 4 Schematic of inclined angle calculation for improved calibration method

3.2 模拟分析

通常而言,噪声、条纹图像的尺寸大小、条纹的周期以及条纹倾斜的程度对标定精度可能有一定的影响。以下通过数值计算分析比较上述两种方法受这几种因素的影响特性。

如图 5 所示,图 5(a)为条纹周期对标定精度的影响。图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,条纹的倾斜角设定为 1° 。图 5(a) 数据显示,当条纹周期在 $3 \sim 15 \text{ pixel}$ 范围变化时,先前的标定方法误差对条

纹的周期较为敏感,随着条纹周期的增大而逐渐增大,其最大误差低于 0.08° 。相比之下,改进后的方法其误差对条纹周期呈缓慢增加趋势,最大误差低于 0.002° 。

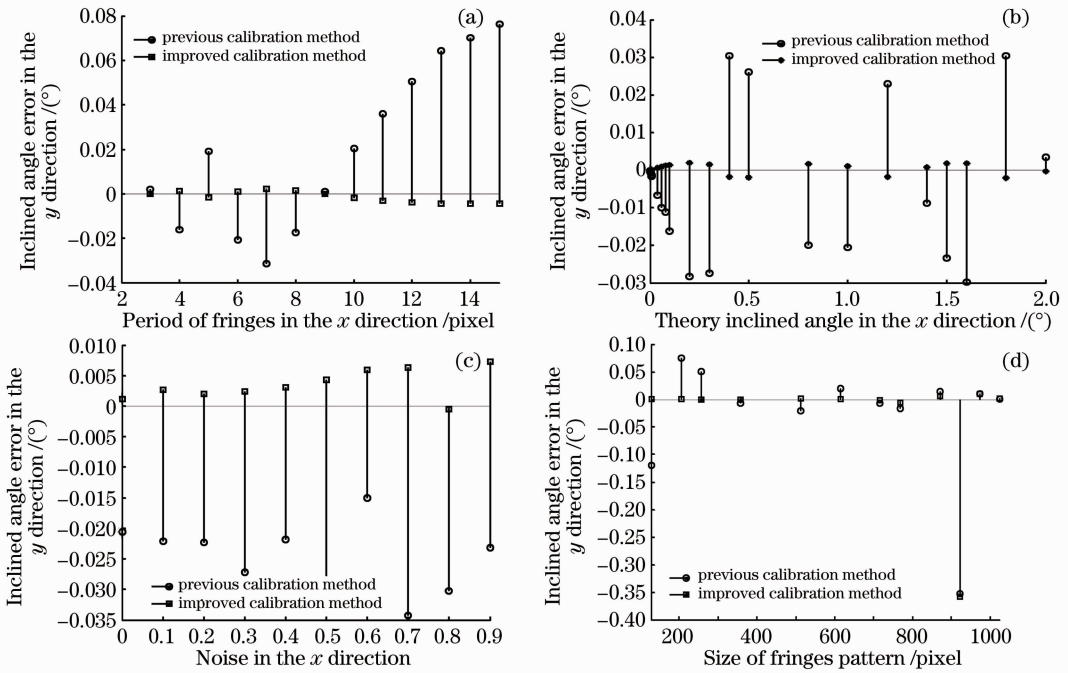


图 5 (a)条纹周期;(b)倾斜角;(c)噪声以及(d)图像大小对标定精度的影响

Fig. 5 Effects of (a) fringe period; (b) inclined angle; (c) noise and (d) image size on the calibration accuracy

图 5(b)是不同倾斜角对标定精度的影响。图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,条纹周期为 6 pixel 。当倾斜角在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 范围变化时,先前标定方法的精度基本局限在 0.025° 左右,最大误差小于 0.03° 。然而,改进后的方法对倾斜角的变化并不敏感,特别是当条纹倾斜角低于 0.005° 时,其最大误差小于 0.0001° 。倾斜角在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 范围,最大误差低于 0.002° 。可见改进后的方法在条纹小角度倾斜时可以实现高精度标定。

表明,与改进后的方法标定方法相比,先前方法的标定结果对图像大小有更强的依赖性。当图像大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 时,与先前方法的标定误差 0.1201° 相比,改后的方法仅为 0.0004° 。需要特别指出的是,当图像大小约为 $920 \text{ pixel} \times 920 \text{ pixel}$ 时,两种方法都出现了较大误差,这可能是傅里叶变换相位提取造成的。

图 5(c)是高斯噪声对标定精度的影响结果,横坐标表示高斯噪声的均方差。理论角度设定为 1° ,条纹尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。从图中可以得出,两种方法随噪声的增加,标定误差总体上均具有增加的趋势。但噪声对改进后的方法影响较小,最大误差低于 0.007° 。但高斯噪声的均方差低于 0.4 时,最大误差低于 0.003° ,而先前的标定方法最大误差低于 0.03° ,相差一个数量级。这表明,同等条件下,改进后的方法具有更好的抗噪声能力。

因此,上述分析表明,改进后的方法其保守精度为 $0.001^\circ (10^{-5} \text{ rad})$ 量级,并且对噪声、图像大小、测量范围、条纹周期不敏感。特别适用于掩模光栅标记小角度倾斜的标定。

当倾斜角度为 1° ,条纹周期为 6 pixel ,图像大小 ($128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel} \sim 1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$) 对标定精度的影响特性如图 5(d) 所示。对比分析

4 应用与讨论

光刻对准中,通常采用反射式的对准方案。如图 6 所示,波长为 635 nm 的激光光源 (LS) 经过透镜 (L1、L2) 和光阑 (D) 得到均匀的平行光。然后经分光棱镜 (SS) 传播到掩模 (M) 和硅片 (W) 光栅对准标记。到达硅片 (W) 光栅标记后,反射光继续传播通过掩模 (M) 对准标记形成叠栅条纹,经分光棱镜,最后被成像系统 CCD 接收。一般硅片的位置是可以调整的。而 CCD 和掩模位置一般是光刻机装调

时就固定。因此,通过上述掩模成像标定方法,可以在光刻机整机装调时,将掩模(光栅对准标记)作为基准,对 CCD 进行标定。这一过程完成后,掩模与

硅片之间的对准,可以通过硅片工件台(图中未画出)调整。

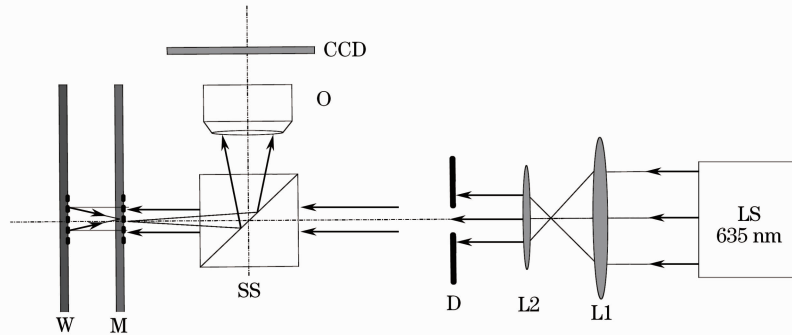


图 6 基于叠栅条纹反射式光刻对准方案

Fig. 6 Reflective lithography alignment scheme based on Moiré fringes

5 结 论

双光栅叠栅条纹对准方法在掩模与硅片上设计光栅周期接近,位置相反的对准标记^[1~3]。通过叠栅条纹的相位信息同时实现 x, y 两个方向上的位移探测,其前提在于保证掩模与硅片上光栅对准标记高度平行。因而,掩模对准标记的倾斜成像特性对对准精度有较大影响。在先前研究工作的基础上,提出了一种改进的条纹倾斜标定方法。该方法仍以条纹的相位信息为核心,通过 45° 和 135° 两个相互垂直的正交方向上条纹的空间频率,间接测量条纹的倾斜角。研究表明,改进后的方法特别适用于掩模光栅标记小角度倾斜的标定,可实现理论极限精度优于 0.001° 量级的角度探测。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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

- 3 Zhu Jiangping, Hu Song, Yu Junsheng *et al.*. Theoretical analysis of photolithography alignment and the 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
- 4 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using Moiré techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(6): 2455~2458
- 5 Y. Uchida, S. Hattori, T. Nomura. An automatic mask alignment technique using Moiré interference [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structure*, 1987, **5**(1): 244~247
- 6 Zhang Zhiling, Sun Jie, Jin Hui. Dip angle measurement based on grating diffraction [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2008, **24**(2): 67~68
- 张智伶, 孙杰, 金辉. 光栅衍射条纹法测量平面的倾斜角度 [J]. *天津理工大学学报*, 2008, **24**(2): 67~68
- 7 Tao Wei, Pu Zhaobang, Sun Yunbin. The development of angle measurement technique [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(2): 5~7
- 陶卫, 浦昭邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展 [J]. *激光杂志*, 2002, **23**(2): 5~7
- 8 Isaac Amidror, Roger D. Hersch. Fourier-based analysis of phase shifts in the superposition of periodic layers and their Moiré effects [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(5): 974~987
- 9 M. Taketa, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160

栏目编辑: 韩峰