

基于二维 Ronchi 光栅的纳米光刻对准技术研究

司新春^{1,2} 佟军民³ 唐 燕¹ 胡 松¹ 刘俊伯^{1,2} 李金龙¹ 周 毅^{1,2} 邓钦元^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

³许昌职业技术学院, 河南 许昌 461000

摘要 提出了一种基于二维光栅叠栅效应的纳米光刻对准方法,用于接近式光刻实现二维同步对准。该方法采用两组周期接近的二维光栅重叠产生一组周期分布的叠栅条纹,条纹的周期相对于两光栅周期被大幅度放大,将光栅间的位移反应在条纹的相位信息中。利用二维光栅在傅里叶频谱中 x 、 y 向相互独立的频谱分布,通过傅里叶变换对正交叠栅条纹横纵两个方向上的相位信息进行解析,可实现高精度二维同步对准。建立了双二维 Ronchi 光栅对准复振幅分布物理模型,推导了基片、掩模相对位移量与叠栅条纹相位之间的关系。通过计算机模拟对该对准方法进行了仿真分析,考虑噪声情况下,对准精度可以达到 2 nm;通过实验系统对该对准方法进行测试,实验结果对准精度可以达到 22 nm。

关键词 傅里叶光学; 二维光栅; 光刻对准; 叠栅条纹; 频谱

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0910001

Lithography Alignment Technology Based on Two-Dimensional Ronchi Grating

Si Xinchun^{1,2} Tong Junmin³ Tang Yan¹ Hu Song¹ Liu Junbo^{1,2} Li Jinlong¹
Zhou Yi^{1,2} Deng Qinyuan²

¹State Key Laboratory of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

³Xuchang Vocational College, Xuchang, Henan 461000, China

Abstract A kind of nanometer lithography alignment method for two dimensional (2D) synchronization alignment in proximity lithography is presented. This method is based on the moiré effect. Two superposed 2D gratings with slightly different periods are adopted to generate a set of periodic moiré fringes, the period of which is hugely magnified with regard to that of two gratings and the relative displacement of gratings is encoded in the phase of fringes. Using the independent spectrum distribution of x and y direction in the Fourier spectrum and parsing the phase information on the transverse and longitudinal of moiré fringe by Fourier transformation can realize two dimensional high precision synchronization alignment. A kind of complex amplitude distribution model about two Ronchi 2D gratings alignment is built. Then, the relationship between the offsets of substrate and mask with moiré fringe is derived on the basic of this model. A simulation analysis about built model using computer is performed. The result shows that the accuracy can reach 2 nm when noise is considered; an experiment is made to test this alignment method after numerical computation. The accuracy of the result can reach 22 nm.

Key words Fourier optics; two dimensional grating; lithography alignment; moiré fringe; spectrum

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 050.1970

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61204114、61274108、61376110)

作者简介: 司新春(1990—),男,硕士研究生,主要从事光刻设备与光机设计方面的研究。E-mail: xyxido@hotmail.com

导师简介: 唐 燕(1982—),女,博士,副研究生,主要从事微纳加工以及分辨力增强方面的研究。

E-mail: ty0513@163.com(通信联系人)

1 引 言

随着微纳技术的不断发展,其特征尺寸由原来的微米量级向亚微米甚至纳米量级延伸,对光刻加工技术提出了越来越严格的要求^[1]。传统投影式光刻通过缩小波长及增大数值孔径的方式提高分辨率,可实现 22 nm 线宽加工,但设备极其复杂且价格高昂。在此情况下,纳米压印、表面等离子体等新型接近式光刻,被认为是未来实现高分辨力、低成本光刻的重要手段,具有极大的发展潜力。

任何一种光刻技术都要有与其适应的对准技术,对准技术作为光刻技术的核心技术之一,要求达到分辨率的 1/7~1/10^[2]。现有的接近式光刻对准技术主要包括:几何图像对准法、波带片光强探测法以及光栅叠栅条纹对准法等。几何图像对准法及波带片光强探测法对准精度有限,只能实现几十甚至几百纳米的对准精度。在此情况下,叠栅条纹对准技术成为纳米压印等高分辨力光刻技术的首选。周绍林等^[3-4]对基于叠栅条纹的接近式光刻对准技术进行了系统的研究,实现了纳米级对准精度。在实际对准中,掩模、电荷耦合器件(CCD)、硅片的倾角会对实验数据造成误差,朱江平等^[5]为此提出了一种方法来标定 CCD 的成像位置;佟军民等^[6]也提出了一种测倾斜与面内偏转角度的方法;泰伯效应(泰伯自成像)也会对实验数据造成影响,朱江平等^[5,7]对于在对准中泰伯自成像对实验数据的影响做了详细的论述以减小乃至消除泰伯效应对于对准过程的影响。

现有的叠栅条纹对准方法需要分别设计 x 、 y 两个方向上的标记,并在对准过程中通过移动 CCD 对两个方向上的标记分别进行对准,不仅增加了对准时间,而且增大了系统结构复杂性。

本文提出了一种基于二维 Ronchi 光栅的高精度近场光刻对准方法,该方法基于基片和掩模上周期具有微小差异的二维光栅形成正交叠栅条纹,基于二维光栅 x 、 y 向相互独立的频谱分布特性,通过对不同方向上的条纹相位信息进行解析,实现高精度二维同步对准。该方法无需移动 CCD,即可实现 x 、 y 两个方向上的对准,减少了对准流程,降低了系统复杂性,提高了对准效率。通过理论分析和实验验证表明,该方法检测精度可以达到纳米量级,能够满足纳米压印等近场光刻对高精度对准的需要。

2 原理与对准模型

基于二维光栅叠栅条纹效应的近场光刻对准模型如图 1 所示,照明系统发出的光经半透半反镜后投影到掩模标记处,其衍射光场经基片标记后再次反射到掩模表面,CCD 透过高放大倍率镜头观察掩模面上的标记图形。受镜头数值孔径限制,仅有低级次的衍射光进入镜头,因此,对该对准模型进行简化,如图 1(b)所示,在照明光源的另一端,透过掩模及基片上的标记,利用高放大倍率镜头观察其所形成的叠栅条纹图像。

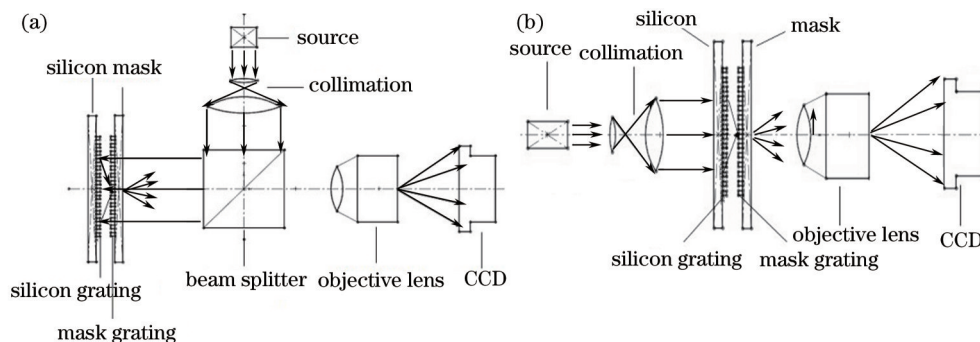


图 1 光刻对准系统简图。(a) 反射式模型; (b) 透射式模型

Fig.1 Diagram of lithography alignment system. (a) Model of reflection; (b) model of transmission

为实现二维同步对准,基片及掩模上的标记分别为周期具有差异的二维光栅,同一个光栅正交方向的周期相等,假设基片光栅周期为 P_1 ,掩模光栅周期为 P_2 , P_1 、 P_2 具有微小差异。由傅里叶光学可知,单位振幅平面波透过光栅后,在栅后的衍射分布可以看作一系列不同传播方向对应于不同空间频率的各次谐波的线性叠加的结果,光栅透射系数可表示为^[8-9]

$$E(x, y) = r(x, y) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{m,n} \exp(i2\pi m f_0 x) \times \exp(i2\pi n f_0 y), \quad (1)$$

式中 $r(x,y)$ 为非均匀性反射率, m, n 分别为 x, y 方向级次, $a_{m,n}$ 为对应级次傅里叶系数, $f_0 = 1/P$ 表示谐波基频(其中 P 为光栅周期)。

单位振幅平面波透过掩模和基片后的复振幅分别为 $E_1(x,y), E_2(x,y)$ 。当该平面波透过两个光栅标记时, 忽略衍射波在两光栅间微小间隙的角谱传播效应, 透射之后的复振幅可以用 $E(x,y) = E_1(x,y)E_2(x,y)$ 近似表示^[3]。即 (m,n) 级叠栅条纹的复振幅可以表示为:

$$E_{(m,n)}(x,y) = A_{m,n} B_{m,n} \exp[i2\pi m f_1 G_1(x,y) + i2\pi n f_2 G_2(x,y)], \quad (2)$$

式中 $f_1 = 1/P_1, f_2 = 1/P_2$ 分别为掩模与基片上的光栅的基频; $A_{m,n}, B_{m,n}$ 为傅里叶系数; $G_1(x,y), G_2(x,y)$ 为面型几何函数。由于几何面型决定衍射波的空间相位从而最终决定叠栅条纹的相位分布, 在对准模型中基片相对掩模板产生位移变化, 位移变化则会反映在叠栅条纹的变化中。受镜头数值孔径限制, 对准系统仅能记录低级次的衍射光。本方法通过探测正交两个方向上最易分辨的 $(1, -1)$ 级衍射光所形成的叠栅条纹实现对准。当分析 $(1, -1)$ 级条纹时, (2) 式为:

$$E_{(1,-1)}(x,y) = A_{1,-1} B_{1,-1} \exp\{i2\pi[f_1 G_1(x,y) - f_2 G_2(x,y)]\}, \quad (3)$$

假设掩模光栅静止地位于初始坐标位置, 基片光栅在 x 方向相对移动 Δx , 在 y 方向相对移动 Δy , 则移动前后对应的叠栅条纹相位分布为:

$$\varphi(x,y) = 2\pi[f_1 G_1(x,y) - f_2 G_2(x,y)], \quad (4)$$

$$\varphi(x + \Delta x, y + \Delta y) = 2\pi[f_1 G_1(x + \Delta x, y + \Delta y) - f_2 G_2(x,y)], \quad (5)$$

通过后期的图像分析, 提取图像的相位信息可以计算前后的相位差, 建立相位与光栅位移之间的关系, 从而计算 $\Delta x, \Delta y$ 的值。此时, 移动前后的相位差为:

$$\Delta\varphi(x,y) = 2\pi f_1 [G_1(x + \Delta x, y + \Delta y) - G_1(x,y)], \quad (6)$$

当仅存在 x 方向偏差时, 在 x 轴上的相移关系为:

$$\Delta\varphi_x = 2\pi f_1 \Delta x, \quad (7)$$

当仅存在 y 方向偏差时, 在 y 轴上的相移关系为:

$$\Delta\varphi_y = 2\pi f_1 \Delta y. \quad (8)$$

3 仿真分析

仿真实验中, 为了验证该方法的可行性, 两光栅的周期分别为基片光栅 $P_1 = 1 \mu\text{m}$ 、掩模光栅 $P_2 = 1.2 \mu\text{m}$, 如图 2 所示(每个光栅的横纵两个方向的周期都相等)。

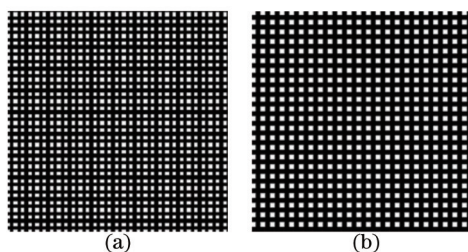


图 2 (a) 基片光栅标记; (b) 掩模光栅标记

Fig.2 (a) Substrate grating mark; (b) mask grating mark

此时, 通过探测系统得到的叠栅条纹图像如图 3(a)、3(b) 所示。当基片、掩模存在偏离时, 叠栅条纹图像也将出现相应的变化[图 3(c) 为基片、掩模存在偏离时的叠栅条纹图像]。

在理想叠栅条纹图像上加入平均值为 0.1, 方差为 0.02 的高斯白噪声, 如图 3(b) 所示; 利用二维傅里叶变换对叠栅条纹图像进行分析。从频谱图 4 不难看出, 由于光栅的正交性, 频谱图可以完全分开, 纵横方向频谱相互独立, 可以通过分别提取纵横两个方向频谱所携带的相位信息, 实现两个方向上的对准。

模拟过程中, 为了实现二维同步对准, 不妨设定基片相对于掩模分别在 x, y 方向步进 $0.1 \mu\text{m}$ (如图 5 所示, 合运动为基片相对于掩模移动了 45°)。通过求解其叠栅条纹, 分别求取 x, y 方向的步进量, 如图 6 所示。从图中可以看出, 提出的基于二维光栅的对准方法在 x, y 方向均具有较好的线性度, 在高斯噪声的影响下,

x 、 y 方向上的对准精度分别为:1.6 nm、0.6 nm。

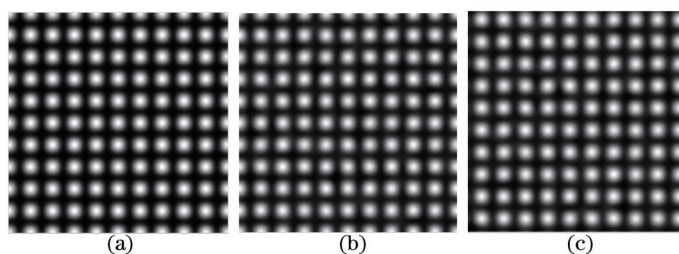


图3 双光栅对准叠栅条纹图像。(a) 理想叠栅条纹图像; (b) 加噪声后叠栅条纹图像; (c) 基片、掩模存在偏离时的叠栅条纹图像
Fig.3 Moiré fringe images of dual-grating alignment. (a) Moiré fringe image in ideal situation; (b) moiré fringe image after adding noise; (c) moiré fringe image after substrate shifting to mask

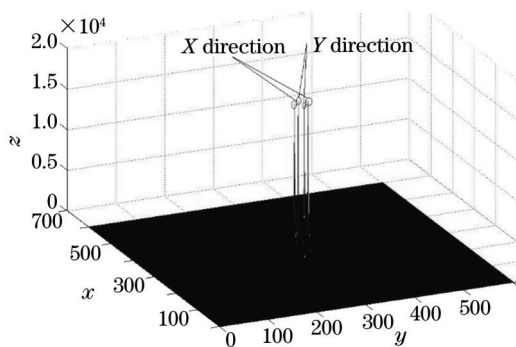


图4 二维光栅频谱图

Fig.4 Frequency spectrum of two-dimensional grating

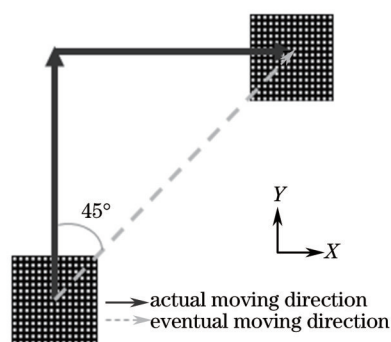


图5 基片实际运动方向与最终合运动方向

Fig.5 Actual moving direction and eventual moving direction of substrate

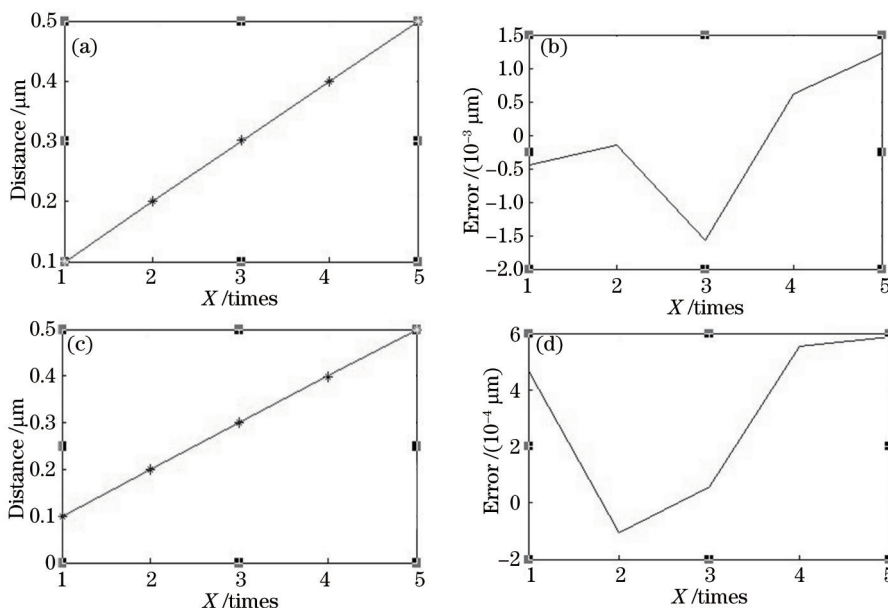


图6 实际位移量与理论位移量对比图。(a)、(c) 分别是纵、横方向的实际位移量与理论位移量对比图; (b)、(d) 分别是纵、横方向的位移误差图

Fig.6 Comparisons of practical offsets to the theoretical offsets. (a) and (c) are the comparisons of vertical, lateral offsets to theoretical offsets, respectively; (b) and (d) are the error images of vertical, lateral direction to theoretical direction

为了进一步验证该方法的对准精度,针对同一移动距离进行多次测量。

图7所示的为基片相对于掩模在 x 、 y 方向上来回重复步进 $0.4 \mu\text{m}$ 所得到的 x 、 y 方向的实际偏移量。这些值反映了系统的重复定位精度,不难看出,该系统在该噪声影响的基础上重复定位精度可以达到3 nm以下。

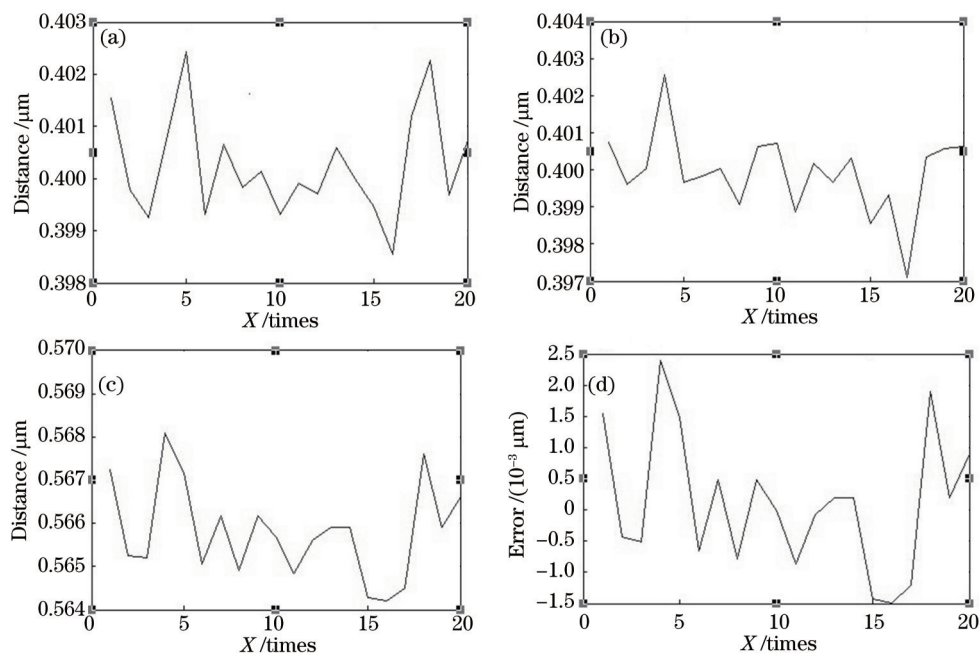


图7 基片相对于掩模在 x, y 方向上重复偏移 $0.4 \mu\text{m}$ 时测得的 x, y 方向偏移量 (图 a-c) 和实际偏移量相对理论偏移量的误差 (图 d)

Fig.7 Offsets of x and y directions to theoretical direction when the substrate shifting $0.4 \mu\text{m}$ relative to mask (a)~(c) and Errors of practical offsets to theoretical offsets at the same time (d)

4 实验及精度分析

为研究这种二维 Ronchi 光栅的对准性能, 设计了如图 8 所示的透射式对准实验装置。采用发光二极管(LED) 蓝光取代激光器作为光源, 光栅结构依旧采用如图 2 所示的周期结构; 采用型号为 WAT-902H2 的低感 CCD 作为信号接收器, 配合图形采集卡进行图样采集。在 CCD 的前端放置了一个八倍显微物镜; 掩模、基片分别用两个三维台支撑, 掩模、基片光栅标记刻制在掩模板上用真空泵吸附并垂直以微小距离 ($100\sim 300 \mu\text{m}$) 相对放置。基片标记的底座固定着一个精度 10 nm 的压电陶瓷 (PZT) PI 台以实现基片相对于掩模的微小位移。

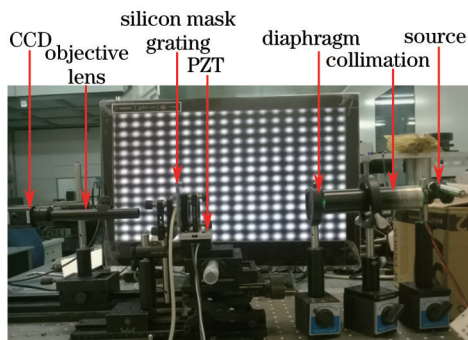


图 8 光刻对准实验装置图

Fig.8 Experiment devices of lithography alignment

对准过程分为粗对准和精对准两个部分进行, 粗对准使用十字形与方形标记, 两标记分别置于基片、掩模上。当十字形标记恰好落在方形框标记的中间即实现粗对准^[4]。

精对准采用的光栅结构如图 2 所示。实际使用的两光栅的周期分别为基片光栅 $P_1=4 \mu\text{m}$ 、掩模光栅 $P_2=4.4 \mu\text{m}$ 。这时叠栅条纹的周期(两个方向的条纹周期是一样的) $P_m = P_1 P_2 / (|P_1 - P_2|) = 44 \mu\text{m}$ 。精对准是在粗对准完成的前提下进行的。图 9 所示的是两光栅标记完全对准以及未对准时的条纹图像, 在对准过程中, 掩模光栅保持不动, 基片光栅伴随 PZT 的微小偏移而偏移, 两标记的相对位移直接引起纵横两组条纹的相对位移。以横向 (x 方向) 为例, 条纹位移量 $\Delta X = \Delta x \cdot P_2 / (|P_1 - P_2|)$, 式中 Δx 为两标记位移量。条纹位移量通过滤

波、傅里叶逆变换解相位得到,利用条纹位移量与基片偏移量之间的关系得到光栅在 x 、 y 方向的偏移量。图9是在粗对准之后基片光栅相对掩模光栅在纵轴(y)方向以 $0.2\ \mu\text{m}$ 为步进量移动后的条纹图像。

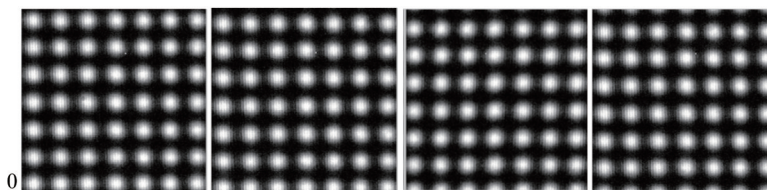


图9 基片光栅相对掩模光栅在纵向方向移动后的条纹图像,分别是移动 0 、 0.6 、 1.2 、 $1.8\ \mu\text{m}$
Fig.9 Fringe images when the substrate gratings shift to mask grating in longitudinal direction
(the offsets are 0 , 0.6 , 1.2 , $1.8\ \mu\text{m}$, respectively)

基于图9的实验结果,实际偏移距离与理论偏移距离图像如图10(a)所示。图中,实线部分表示的是理论上的偏移量,点表示实测偏移量,显然,两者基本吻合,因此可以验证该方法的可行性;依据10(a)的实验数据可以求出实测量与理论值的相对误差,如图10(b)所示,最大误差 $22\ \text{nm}$ 左右,即该方法的精度可以达到 $22\ \text{nm}$ 以下。

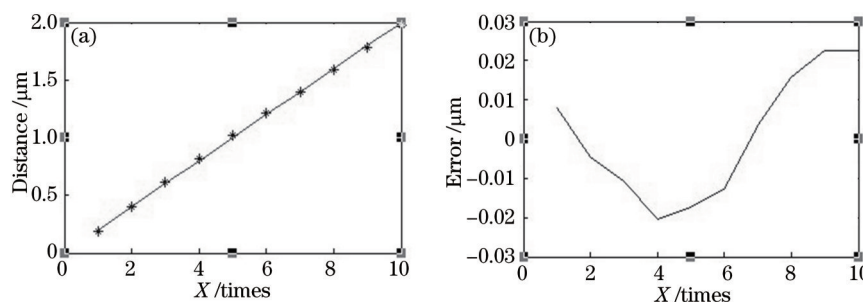


图10 实际位移量与理论位移量对比图。(a)实际位移量与理论位移量对比图;(b)实际位移量与理论位移量的误差图
Fig.10 Comparisons of practical offsets to theoretical offsets. (a) Comparison of practical offsets to theoretical offsets, respectively;
(b) errors between practical offsets and theoretical offsets

在该实验中,受制于PI台只能在一个方向精确移动,实验结果是建立在某个固定方向上的数据,基于光栅栅线的正交性,在横向方向依然可以达到同样的精度,故不再赘述。实际对准结果与仿真结果仍旧有比较大的差距,主要有以下几个方面的原因:CCD、基片、掩模版不能保证完全平行(存在角度偏差),PI台的位置可能存在角度偏移,PZT的移动误差(精度 $10\ \text{nm}$),光栅标记的加工误差等等,都会对实验结果造成影响,这些因素对于该方法的影响将在后续的研究中继续进行。

5 结 论

提出了一种基于二维 Ronchi 光栅的近场光刻对准方法。在掩模与基片上分别使用周期具有微细差距的二维光栅作为标记,利用其产生的放大的叠栅条纹,通过二维傅里叶变换分别提取其 x 、 y 方向上携带有偏移量的相位信息,实现掩模与基片的对准。通过仿真分析该方法较其他方法而言可以实现纵横两个方向的同时对准且结构较为简单,在仿真中加入适当的高斯白噪声,仿真精度可以达到 $2\ \text{nm}$ 以下。在此基础上又进行了实验研究,通过改变基片光栅相对掩模光栅的位置观测叠栅条纹的变化,实验结果与仿真结果相吻合,系统精度可以达到 $22\ \text{nm}$ 甚至更小,与仿真结果基本吻合,验证了该方法的可行性。由此,在接近接触式光刻对准系统中,这种方法有着独特的优越性,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 Ye Xibiao, Zhou Chenggang, Zhang Yang, *et al.*. Lithography alignment technology based on two-dimensional zero reference grating by transmission-reflection[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(3): 64-265.
叶锡标,周成刚,张 阳,等.基于透反式二维绝对零位光栅的光刻对准技术[J].中国科学技术大学学报,2007,37(3): 264-265.
2 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Lithography Micromachining Technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006.
姚汉民,胡 松,邢廷文.光学投影曝光微纳加工技术[M].北京:北京工业大学出版社,2006.

- 3 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu, *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 702-706.
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): 702-706.
- 4 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.
- 5 Zhu Jiangping, Hu song, Yu Junsheng, *et al.*. Calibration method for mask grating mark imaging in lithography alignment[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0108002.
朱江平, 胡 松, 于军胜, 等. 光刻对准中掩模光栅标记成像标定方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0108002.
- 6 Tong Junmin, Zhou Shaolin, Zhao Lixin, *et al.*. Angular measurement using moiré interferometry for alignment of proximity lithography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208001.
佟军民, 周邵林, 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.
- 7 Jiangping Zhu, Song Hu, Junsheng Yu, *et al.*. Four-quadrant grating moiré fringe alignment measurement in proximity lithography [J]. *Opt Express*, 2013, 21(3): 3463-3473.
- 8 Liang Quanting. *Physical Optics*[M]. Beijing: Publishing Aouse of Electronics Indnstry, 1986.
梁铨廷. *物理光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986.
- 9 Zhang Xiangchun, Song Yaozu. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Flourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1445-1450.
张香春, 宋耀祖. 傅里叶变换求取叠栅条纹微小位移的精度分析[J]. *光学学报*, 2003, 23(12): 1445-1450.
- 10 Jiangping Zhu, Song Hu, Pei Zhou, *et al.*. Experimental study of Talbot imaging moiré-based lithography alignment method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 58: 54-59.

栏目编辑: 刘丰瑞