

基于复合光栅的大范围高精度对准方法

司新春^{1,2} 唐 燕¹ 胡 松¹ 刘俊伯^{1,2} 程依光^{1,2} 胡 淘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 100039

摘要 提出一种基于复合光栅的对准方法, 满足接近式光刻高精度、大范围对准需要。该复合光栅由周期具有微小差异的小周期光栅以及与之相正交的大周期小范围光栅组成。对准过程中, 通过对叠栅条纹进行高精度相位解析, 实现精对准; 通过直接求取大周期光栅位置实现粗对准。由于两个方向上的光栅相互正交, 傅里叶变换提取频谱时将不受影响。分别分析小周期光栅的叠栅条纹相位分布, 以及大周期光栅的强度分布, 实现大范围、高精度对准。推导了基片、掩模相对移动量与复合光栅变化之间的关系。通过计算机模拟对该对准方法进行了仿真分析, 考虑噪声的基础上, 对准精度可以达到 16.5 nm; 通过实验系统对该对准方法进行了验证与分析, 对准精度可以达到 30.19 nm。

关键词 光栅; 傅里叶光学; 光刻对准; 复合光栅; 叠栅条纹; 相位解析

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0105003

High-Precision Alignment Technique with Large Measurement Range Based on Composite Gratings

Si Xinchun^{1,2} Tang Yan¹ Hu Song¹ Liu Junbo^{1,2} Cheng Yiguang^{1,2}

Hu Tao¹ Zhou Yi^{1,2} Deng Qinyuan^{1,2}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In order to meet the demands of high-accuracy alignment with large measurement range in proximity lithography, a method based on composite gratings is introduced. The composite gratings consist of small-period gratings with slightly different periods and large-period gratings with small range which are orthogonal to the small-period ones. Fine alignment is realized by high-precision phase analysis on moiré fringes while coarse alignment is achieved by obtaining the position of large-period gratings directly. Since the different-direction gratings are orthogonal to each other, there will be no influence on extracting frequency spectrum by applying Fourier transform. By analyzing the phase variations of small gratings' moiré fringes and the intensity of large-period gratings, substrate and mask can be aligned with high accuracy and large measurement range. Furthermore, the relation between the offsets of substrate and mask and the position changes of the two composite gratings are derived. An analysis of the built model is performed via simulation to show that the accuracy can reach 16.5nm while considering the noises; and an experiment is also conducted to verify the effectiveness of the proposed method and the accuracy can reach 30.19 nm.

Key words gratings; Fourier optics; lithography alignment; composite grating; moiré fringe; phase resolution

OCIS codes 050.2770; 070.2615; 220.1140; 120.4120

收稿日期: 2015-07-16; 收到修改稿日期: 2015-09-04

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, 副研究员, 主要从事微纳加工以及分辨力增强等方面的研究。

E-mail: ty0513@163.com(通信联系人)

1 引 言

随着微纳技术的不断发展,其特征尺寸逐渐由微米量级向亚微米甚至纳米量级延伸,对光刻技术的要求也变得越来越苛刻。如今,193 nm 浸没式光刻技术已经突破 32 nm 线宽并有可能延伸到下一技术节点。但是,依靠缩短波长及增大数值孔径的光学光刻方法面临着技术上的极大难点和成本的剧增,尤其是 32 nm 以下节点光刻设备所需的巨额成本已经成为该领域的巨大难题。目前,接近接触式光刻中的纳米压印光刻的最高分辨力据报道已经达到 5~10 nm^[1];实验表明表面等离子体光刻的分辨力已经可达到 30 nm^[2];因此,下一代低成本、高性能的纳米光刻技术已成为业界的关注热点。但当下接近接触式光刻对准技术发展缓慢,基于此,进一步研究接近接触式光刻对准技术十分必要^[3-4]。

现有的接近式光刻对准技术主要包括以下几种:基于几何图案的视频图像对准方法,它是通过采集并处理掩模硅片上的几何标记计算出两幅图像的轮廓或中心,由计算机控制实现自动对准;基于波带片的强度探测对准方法,它是利用激光经过波带片的焦平面汇聚成条形光束。当标记光栅经过条形光束中心时,返回衍射光经过波带片汇聚被光电探测器接收,此时接收光强度达到最大,表示点列光栅与波带片中心对准即掩模硅片对准;基于光栅衍射的激光干涉对准方法,先提取两光栅衍射后对称衍射级次的干涉光强。当掩模硅片完全对准时,两组干涉信号相等,差信号为零^[5]。这三种方法对准精度有限,只能实现几十甚至几百纳米的对准精度。基于此,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^[6-8]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;Di 等^[9]对提高叠栅条纹对准测量范围进行了深入探索。尽管这些研究提高了叠栅条纹对准精度,但受测量原理限制,其检测范围仅在一个周期以内。要实现大范围对准需要采用如“十字叉”等粗对准标记,不仅无法在同一视场内完成对准操作,而且还增加了操作的复杂性。

本文提出了一种基于复合光栅的高精度近场光刻对准方法,该方法是在原有的精对准光栅的垂直方向上加载一低频调制光栅,通过处理光栅叠栅条纹实现精对准,通过分析低频光栅的透过率强度分布实现粗对准。两组条纹的正交特性使得两者频谱分布相互独立从而实现粗、精同步对准。通过理论分析和实验验证表明,该方法检测精度在达到纳米量级的基础上加快了对准速度,能够满足纳米压印等近场光刻对快速高精度对准的需要。

2 原理与对准模型

基于双复合光栅的对准模型如图 1 所示,精对准标记由周期相近的 P_1 、 P_2 一维光栅拼接而成并沿着 y 轴方向排列,在其垂直方向上载入低频调制光栅即是最终的复合光栅^[10-11]。实际对准过程中,光线首先投影到如图 1(a)所示的掩模标记上,其衍射光场经图 1(b)所示的基片标记后再次反射到掩模表面,电荷耦合元件 (CCD) 透过高放大倍率镜头观察采集到的图像。受镜头数值孔径的影响,仅有低级次的衍射光进入镜头。根据傅里叶光学理论,平面波垂直入射下发生多次衍射,在栅后的衍射波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频率丰富的场分布,如图 1 所示,以上半部分为例,掩模硅片对准,即上下两组光栅均位于初始坐标位置时,叠栅复振幅分布可表示为^[12-14]:

$$E(x,y) = \begin{cases} \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{m_1} b_{m_2} A_n \exp[i2\pi(nF_1x + m_1f_1y + m_2f_2y)] & y \in B \\ \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} a_{m_1} b_{m_2} \exp[i2\pi(m_1f_1y + m_2f_2y)] & y \notin B \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $B = \{y|t/2 < |y| < (t/2 + e)\} \cup \{y||y| < e/2\}$, a_{m_1} 、 b_{m_2} 、 A_n 为对应级次傅里叶系数, $f_1 = 1/P_1$ 、 $f_2 = 1/P_2$ 、 $F_1 = 1/P_3$ 表示谐波基频, m_1 、 m_2 、 n 为衍射级次, t 为粗对准光栅间隔, e 为单个粗对准光栅在 y 方向上的宽度。

精对准时,采用透射模型分析,如图 2 所示,通过对得到的叠栅条纹进行傅里叶变换、滤波、逆傅里叶变换等一系列操作得到相位变化量,继而求出相对移动量,记录最易分辨的 (1, -1) 级叠栅条纹,对应的上下两组 (1, -1) 级叠栅条纹复振幅分布可表示为:

$$E_{(1,-1)}(y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m b_{-m} \exp[i2\pi m(f_1 - f_2)y], \quad (2)$$

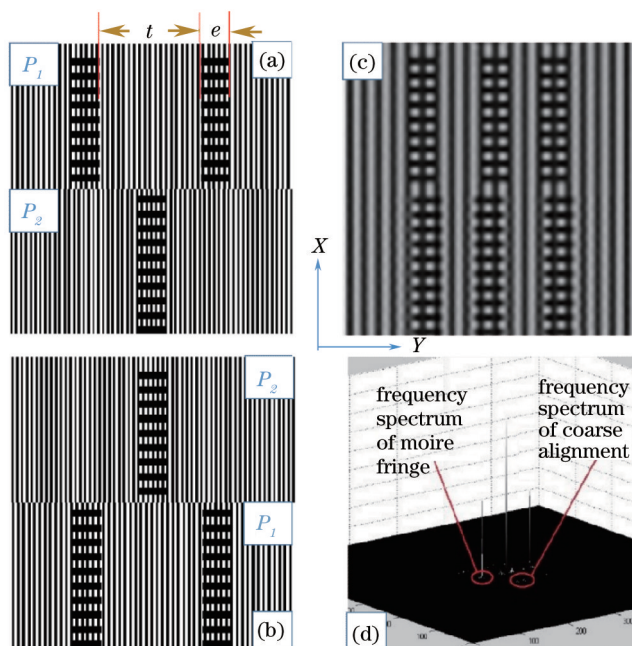


图1 对准过程中的两个光栅标记。(a) 基片光栅标记;(b) 掩模光栅标记;(c) 双光栅叠加条纹;(d) 条纹频谱图
 Fig.1 Two grating marks for alignment. (a) Grating mark of substrate; (b) grating mark of mask; (c) moiré fringes generated by overlapping two marks; (d) image of frequency spectrum on fringes

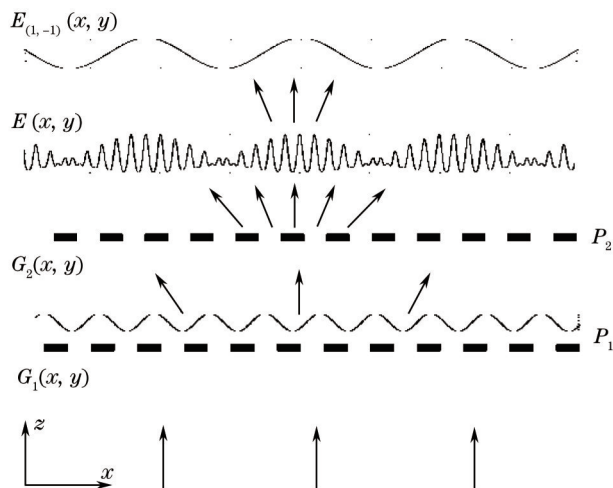


图2 双复合光栅对准原理图
 Fig.2 Schematic diagram of alignment based on dual-composite gratings

此时,条纹周期为 $P_f = P_1 P_2 / (P_1 - P_2)$, 即硅片的微位移放大为对应叠栅条纹的明显移动,且周期越接近,放大率越大。当基片相对于掩模偏移 Δy , 上下两组条纹相移之差为:

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_1 + f_2)\Delta y, \quad (3)$$

假设硅片的偏移 Δy 导致上下两组条纹分别反向移动 ΔY_{up} 、 ΔY_{down} , 两者的相对移动量 ΔY 不难得出:

$$\Delta Y = \Delta Y_{up} + \Delta Y_{down} = \frac{P_1 + P_2}{P_1 - P_2} \cdot \Delta y. \quad (4)$$

传统方法中,对准测量范围由精对准标记决定且十分有限,以图1的精对准光栅为例,假设 P_1 、 P_2 分别为 $4 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$, 则两光栅的半平均周期 $P_1 P_2 / (P_1 + P_2) = 2.4 \mu\text{m}$, 即测量范围约为 $2.4 \mu\text{m}$, 而采用该种复合光栅作为光栅标记时,测量范围由光栅实际尺寸决定,可以达到几十甚至上百微米。

图3即是粗对准过程中,基片相对掩模板运动到某一个位置时透过率强度相对位置关系,比较运动前后上下两组光栅的透过率分布图样的三个最大波峰值即能得出基片实际偏移量,假定三组光栅的偏移量分别

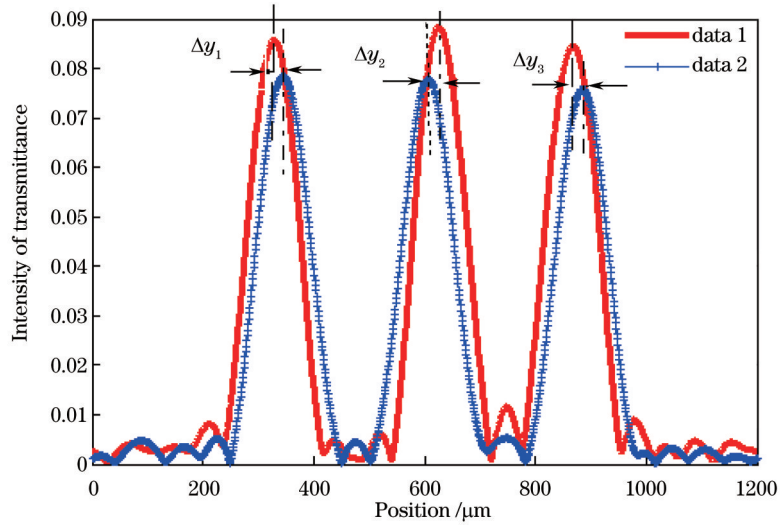


图3 基片相对掩模板运动时,透过强度相对位置关系

Fig.3 Relation between transmittance intensity and position when substrate moves to mask

为 Δy_1 、 Δy_2 、 Δy_3 , 则实际偏移量可记作三者的平均值:

$$\Delta y = (\Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3) / 3 . \quad (5)$$

3 仿真分析

如图1,基片、掩模光栅依此排列放置于 XOY 平面内。精对准光栅的周期分别为 $P_1=6 \mu\text{m}$, $P_2=4 \mu\text{m}$, 在其正交方向上载有周期为 $24 \mu\text{m}$ 的调制光栅。粗对准是在提取纵向频谱信息进行逆傅里叶变换后分析光栅透过率强度分布的基础上得到基片、掩模光栅中对应粗对准标记的位置并进行比较得到。精对准则是在得到短周

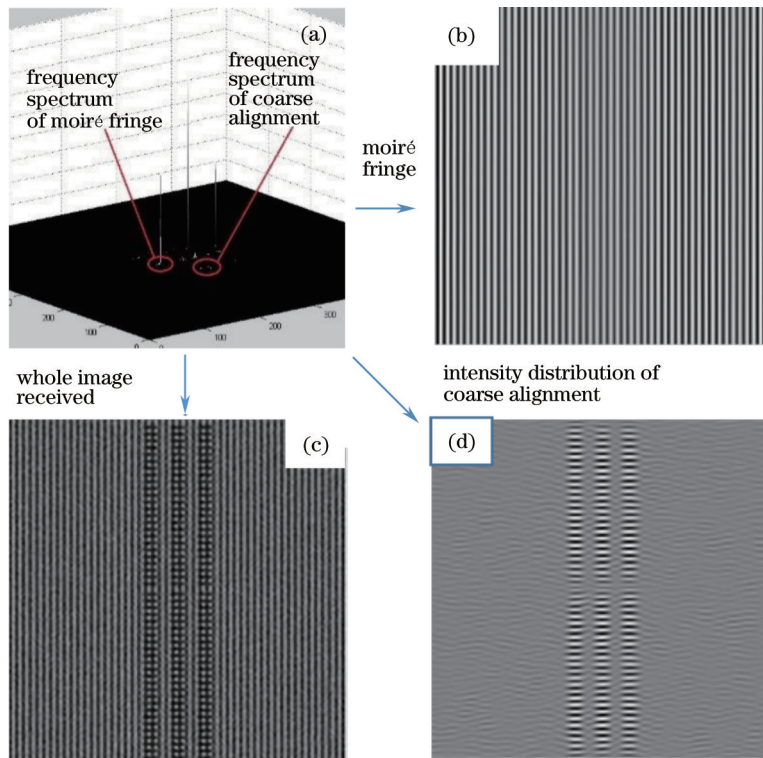


图4 采集到的图像与经过处理后的图像。(a) 采集到的频谱图像;(b) 还原出的完全精对准时的条纹图像;

(c) 还原出的完全对准时的精对准条纹图像;(d) 还原出的完全对准时的精对准透过率强度图像。

Fig.4 Images after being collected and processed. (a) Collected image of frequency spectrum; (b) restored fringe image when extremely fine aligned; (c) restored alignment image when extremely fine aligned; (d) transmittance intensity image when extremely fine aligned

期光栅叠栅条纹的基础上通过滤波,逆傅里叶变换,解相位实现。图4为对采集到的加入平均值为0.1,方差为0.04噪声后的图像进行相应处理得到的信息。其中图4(a)为采集到的图像频谱,此时粗、精对准条纹频谱可以被完全分离;图4(b)是还原出的完全对准时的条纹图像;图4(c)为还原出的完全对准时候的精对准条纹图像;图4(d)是还原出的完全对准时的粗对准透过率强度图像。

粗对准过程中,通过对采集到的复合条纹图像进行滤波与逆傅里叶变换得到如图4(d)的强度响应,该强度响应如图5所示,三条粗对准光栅对应三个波峰,通过比较所测波峰与对准时的波峰相对位置可以准确地得到偏移量,进而实现大范围的实时对准。

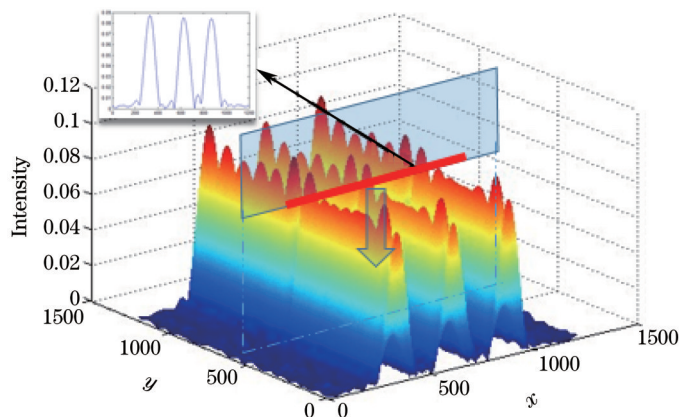


图5 粗对准时的透过率强度图像

Fig.5 Image of transmittance intensity on coarse alignment

基片相对掩模运动过程中会产生三组不同位置的测量结果,取该三组数据的平均值作为最后结果。如图6(a)所示为基片相对掩模运动示意图,在实际运动过程中当出现光栅重叠的情况时,只需要向运动方向移动一个光栅宽度即可。在某个方向以40 μm步进量移动基片后得到的运动过程误差如图6(b)(超出测量范围则向相反方向移动),误差较小,完全可以满足粗对准的要求。

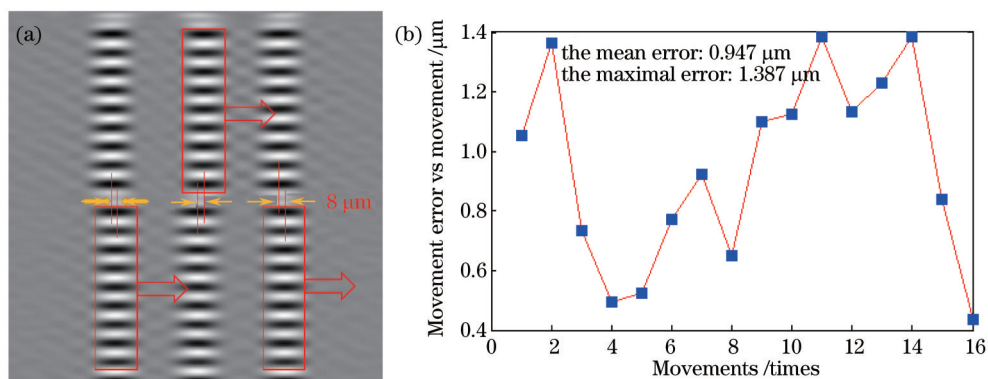


图6 (a) 粗对准运动示意图; (b)运动过程误差图

Fig.6 (a) Diagram of shifting on coarse alignment; (b) image of shifting errors

精对准过程将两组拼接光栅作为硅片掩模上的对准标记运动时,上下两组条纹相移相反。其中, $f_1 = 1/P_1$, $f_2 = 1/P_2$, Δy 为基片相对掩模的偏移量。精对准实际运动过程如图7(a)所示,上下两组叠栅条纹朝相反的方向运动,基片的微位移将放大为对应叠栅条纹的明显移动,而且周期越接近,放大率越大,图7(a)所示的差动条纹使对准灵敏度加倍。提取上下两组条纹的相对移动量 ΔY , 从而得出硅片相对于掩模板的对准位移偏差 Δy 。即:

$$\Delta y = \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_1 + f_2} = \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \cdot \frac{P_{av}}{2}, \quad (6)$$

$$\Delta y = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \cdot \Delta Y = \frac{\Delta Y}{P_F} \cdot P_{av}, \quad (7)$$

式中 $P_{av} = 2P_1P_2/(P_1 + P_2)$ 为两光栅的平均周期, $P_F = P_1P_2/(P_1 - P_2)$ 为叠栅条纹的分布周期, $\Delta\varphi$ 为叠栅条纹相位移动量。当硅片相对于掩模运动半个光栅平均周期时,上下两组条纹相对运动一个条纹周期,相对相移为 2π 。当硅片掩模完全准时,上下两组条纹完全吻合,相位分布一致。只有满足 $\Delta y = P_{av} \cdot m/2$, $m=0,1,2,\dots$,即两标记光栅的偏移量为二者平均周期的半整数倍时,上下两组条纹完全重合^[8,15]。

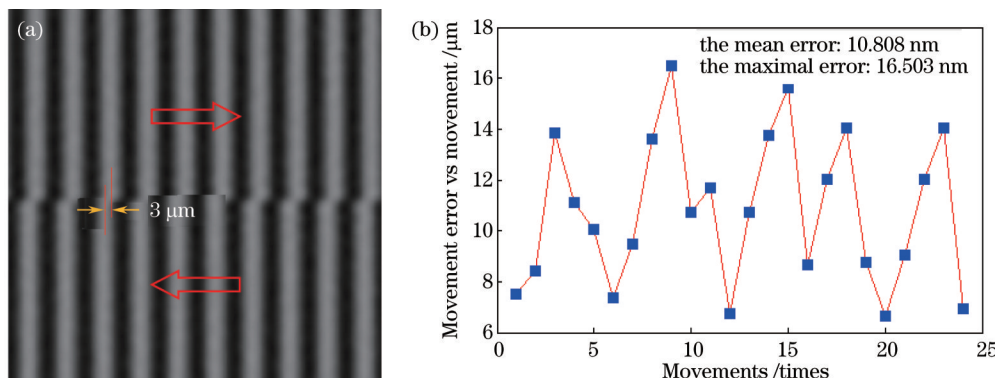


图7 (a) 精对准运动示意图(b)运动过程误差图

Fig.7 (a) Diagram of shifting on fine alignment; (b) image of shifting errors

该精对准方法的测量半周期为 $2.4\mu\text{m}$,在仿真过程中不妨以 $0.1\mu\text{m}$ 为步进量让基片相对掩模步进。如图7(b)为每次步进的步进误差,不难看出使用该方法对准精度可以控制在 17 nm 以内。

4 实验及精度分析

为进一步验证该复合光栅的对准性能,设计了如图8所示的透射式对准实验装置。采用蓝色发光二极管(LED)作为光源,光栅结构仍旧采用如图1所示的复合结构;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;掩模、基片分别用两个三维台支撑,光栅标记采用中国科学院光电技术研究所自主开发的数字微镜芯片(DMD)无掩模光刻机制备,基片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板的微小位移。

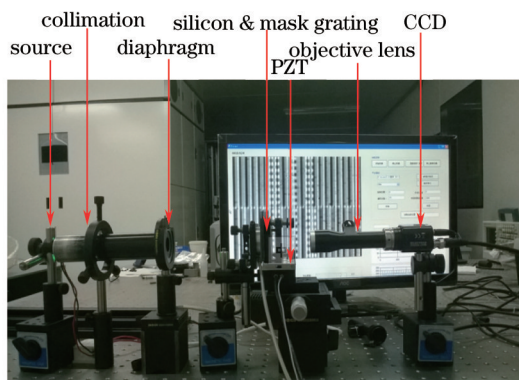


图8 光刻对准实验装置图

Fig.8 Diagram of experimental devices for lithography alignment

实际对准过程分为粗对准与精对准两部分组成,粗对准过程通过跟踪上下两组光栅叠加之后的透过率强度分布,计算波峰差值得到。实验中,精对准的光栅周期分别为 $P_1=6\mu\text{m}$, $P_2=4\mu\text{m}$,粗对准光栅周期为 $P_3=24\mu\text{m}$ 。

如图9为还原后的粗对准光栅图样与透过率分布图,不难看出光栅透过率分布较合理,峰值分布与仿真部分基本一致。为了验证方法的可行性,使用 PZT 在某个方向以固定量 $40\mu\text{m}$ 移动(超过测量范围后则改变方向继续运动),通过比较上下两组光栅的图样信息,滤波、分割、提取峰值从而得到相对移动量。图10(a)为实际误差相对移动量变化曲线。粗对准精度可以稳定保持在 $2\mu\text{m}$ 以内,与仿真结果基本相符,完全可以满足粗对准的对准要求。

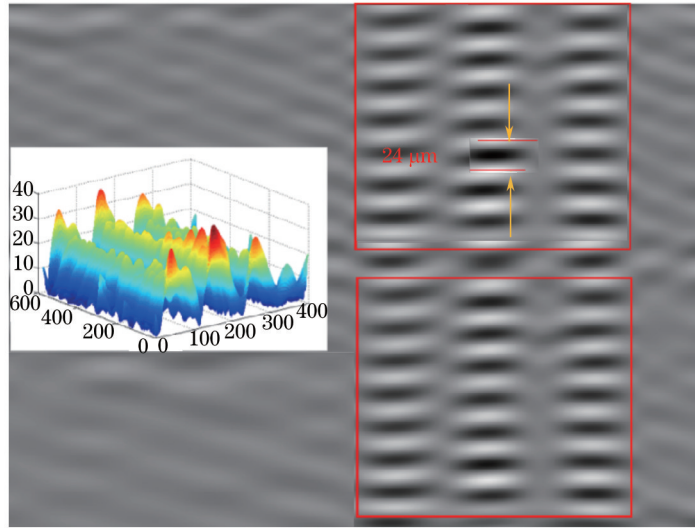


图9 还原后的粗对准光栅图样与透过率分布图

Fig.9 Image of gratings restored from frequency spectrum on coarse alignment and its transmittance distribution

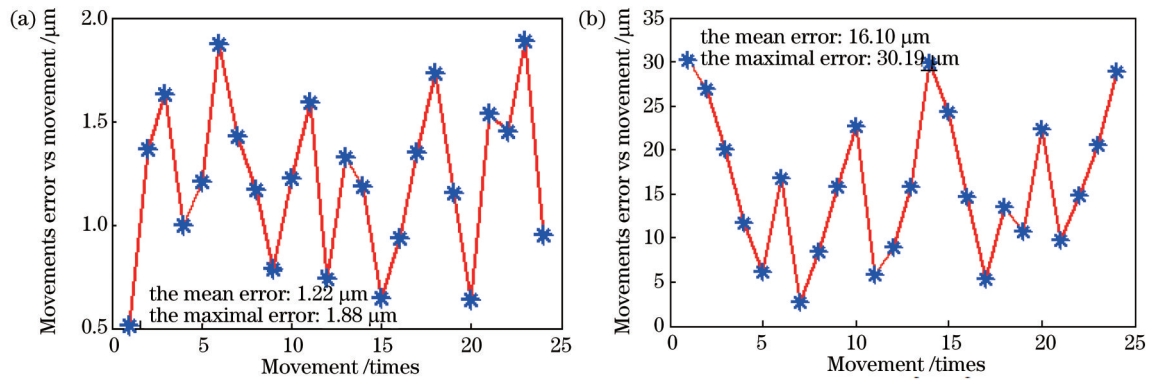


图10 (a) 粗对准:在y方向以固定量40 μm移动误差图; (b) 精对准:在y方向以固定步进量(0.1 μm)运动误差图

Fig.10 (a) Coarse alignment: image of shifting errors when substrate moves to mask at the step of 40 μm in y-direction; (b) fine alignment: image of shifting errors when substrate moves to mask at the step of 0.1 μm in y-direction

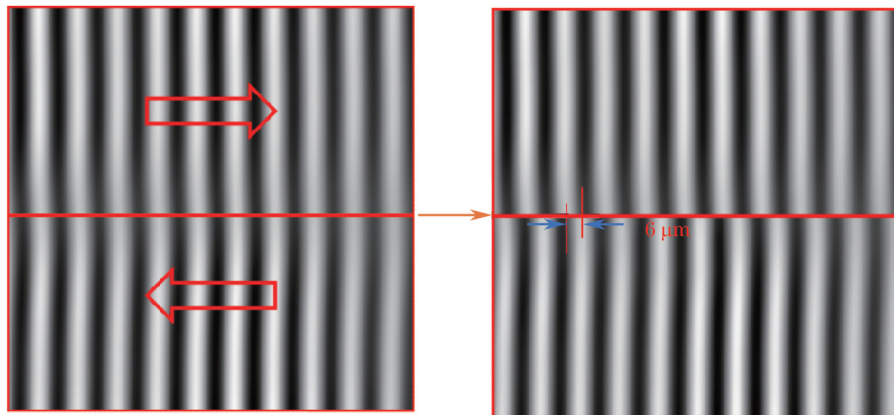


图11 精对准光栅运动叠栅条纹图

Fig.11 Images of moiré fringe when substrate moves to mask

精对准过程如图11所示,精对准叠栅条纹由上下两部分组成,基片移动时,上下两组叠栅条纹朝相反方向移动。提取上下两组条纹的相对相移 $\Delta\varphi$ 或者移动量 ΔY , 则可得硅片相对于掩模的对准位移偏差 Δy , 即:

$$\Delta y = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_1 + f_2}, \quad (8)$$

$$\Delta y = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \cdot \Delta Y. \quad (9)$$

如图 10(b), 实验中基片以 $0.1 \mu\text{m}$ 为步进量相对掩模运动, 依据(6)式算出每次移动后基片相对掩模偏移量, 从而得出每次移动的误差值, 图 10(b)为步进 24 次实际测量的误差值(假定 PI 台稳定、可靠)。该方法用于精对准时精度可以达到 30 nm 左右, 且变化相对稳定。

在该实验中, 受制于 PI 台一维特性, 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, 另一个正交方向依然可以使用类似的光栅进行测量从而达到二维同步对准。实验中使用的光栅标记周期较大, 降低光栅标记周期可以使对准精度下降到 10 nm 以下甚至更低。同时, 影响精度的因素有很多, 如光栅加工工艺、基片相对掩模的相对微小位移、PI 台侧倾微小角度、CCD 采集时的角度偏移、粗对准时时候的光栅图像重叠等等。关于这些因素对测量结果的影响, 在后续的工作中会进一步研究。

5 结 论

提出了一种新型的复合光栅近场光刻大范围对准方法。在掩模与基片上分别使用周期具有微小差距的差动一维光栅和与之正交的低频光栅作为精对准与粗对准标记, 利用其产生放大的叠栅条纹以及提取出来的粗对准光栅透过率强度分布实现掩模与基片的实时同步对准。通过仿真分析该方法具有较好的可行性, 仿真精度可以完全满足近场光刻的要求。在此基础上又进行了实验研究, 改变基片相对掩模的位置并对提取到的图像进行一系列的处理, 实验结果与仿真结果相吻合, 系统测量范围大幅度提高, 精度可以达到 30 nm 左右。由此, 在近场光刻系统中, 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 Chou S Y, Krauss P R, Zhang W, *et al.*. Sub-10 nm imprint lithography and applications[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1997, 15(6): 2897-2904.
- 2 Fang N, Lee H, Sun C, *et al.*. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- 3 Yao Hanming. Optical Projection Micro-Nano Processing Technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
姚汉民. 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.
- 4 Xie Changling, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.*. Micro-and nano-metal structures fabrication technology and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 5 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.
- 6 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.
- 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 Zhu Jiangping, Hu Song, Yu Junsheng, *et al.*. Calibration method for mask 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.
- 9 Di Chengliang, Yan Wei, Hu Song, *et al.*. Moiré-based absolute interferometry with large measurement range in wafer-mask alignment [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 27(4): 435-438.
- 10 Yue Huimin, Su Xianyu, Li Zeren. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 767-771.
岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 767-771.
- 11 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. Improved FTP based on Bi-color fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1153-1157.

- 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1153-1157.
- 12 Shaolin Zhou, Yongqi Fu, Xiaoping 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.
- 13 Zhang Xiangchun, Song Yaozu. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Fourier 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.
- 14 Chen Chen, Liu Ke, Li Yanqiu, *et al.*. Two-dimensional virtual grating phase shifting moiré fringe method of phase extraction[J]. Chinese J Laser, 2015, 42(2): 0208004.
陈 晨, 刘 克, 李艳秋, 等. 二维虚光栅移相叠栅条纹相位提取算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0208004.
- 15 Shaolin Zhou, Yong Yang, Lixin Zhao, *et al.*. Tilt-modulated spatial phase imaging method for wafer-mask leveling in proximity lithography [J]. Opt Lett, 2010, 35(18): 3132-3134.

栏目编辑: 刘丰瑞