

基于超精密激光直写系统制作二维光栅

李民康^{1,2}, 向显嵩^{1,2}, 周常河^{1,2*}, 韦春龙¹, 贾伟³, 项长铖³, 鲁云开^{1,2}, 朱世曜^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511443

摘要 二维光栅是光刻机光栅尺系统的核心元件。搭建了超精密激光直写系统, 基于二维超精密工件台, 通过旋转基片 90° 进行两次曝光, 制作出栅线密度为 1200 line/mm 的二维光栅掩模。原子力显微镜和扫描电镜结果表明, 所制作的掩模轮廓清晰, 空间分布均匀。实验结果证明了超精密激光直写系统能够制作出二维光栅掩模, 在制作大尺寸、高精度二维计量光栅方面有着广阔的应用前景。

关键词 光栅; 超精密系统; 激光直写; 栅距测量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0905001

Two-Dimensional Grating Fabrication Based on Ultra-Precision Laser Direct Writing System

Li Minkang^{1,2}, Xiang Xiansong^{1,2}, Zhou Changhe^{1,2*},

Wei Chunlong¹, Jia Wei³, Xiang Changcheng³, Lu Yunkai^{1,2}, Zhu Shiyao^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronics Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China

Abstract Two-dimensional (2D) gratings are the key elements of optical encoders in lithography machines. Herein, an ultra-precision laser direct writing system is proposed. Based on the ultra-precision platform, we obtain a 2D grating mask with grid line density of 1200 line/mm after double exposure by rotating the substrate by 90°. The atomic force microscopy and scanning electron microscopy images indicate that the profile of the 2D grating mask is clear and its spatial uniformity is excellent. These results demonstrate that the proposed ultra-precision laser direct writing system effectively fabricates a 2D grating mask, showing promise in the fabrication of large, high-precision 2D metrological gratings.

Key words gratings; ultra-precision system; laser direct writing system; period measurement

OCIS codes 050.1950; 220.4000; 120.3930

1 引 言

集成电路工艺已进入 7/5 nm 节点, 这就对光刻机的定位精度提出了更高的要求^[1]。目前在光刻机中广泛使用的是激光干涉仪测量系统^[2]。激光干涉仪安装方便, 能够从多个侧面灵活测量光刻机工件台。但是干涉仪以空气中的激光波长作为测量基准。光刻机的运动行程超过了 500 mm, 导致干涉

仪的测量光路很长。光刻机内的温度变化, 以及运动中产生的气流、振动等均会改变激光波长, 进而影响激光干涉仪的测量精度^[3]。以光栅栅距作为测量基准的光栅尺系统, 测量光路长度为数十毫米, 对环境扰动不敏感, 因此测量结果比激光干涉仪更稳定, 有望应用于新一代光刻机中^[4]。

光栅尺系统的核心是大尺寸、栅距均匀、高效率的二维光栅。目前主要使用全息光刻方法制作光

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-09; 录用日期: 2019-05-20

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC014)

* E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

栅。Lin 等^[5]使用全息装置,经两次曝光刻蚀后得到周期为 $2\ \mu\text{m}$ 、正负一级衍射效率约为 20% 的镀金光栅。Chen 等^[6]利用全息装置,通过旋转基片两次曝光后得到光栅掩模,刻蚀得到衍射效率约为 70% 的偏振无关光栅。全息光刻的优点是光栅制作周期短;缺点是全息系统中的像差会被记录到光栅中,导致栅距不均匀^[7]。麻省理工学院的 Chen 等^[8]提出了扫描干涉场曝光(SBIL)技术,使用两束高斯光束干涉形成小口径的干涉场,经二维运动台步进扫描曝光制作纳米级相位精度光栅^[9]。SBIL 是一维激光直写系统^[10-11],只采用 SBIL 并不能直接制作二维光栅,需要通过旋转光栅基片或光学头才有可能制出二维光栅。但如何旋转光学头或光栅基片来写出高质量的二维光栅,仍然是个有待研究的课题。

随着光刻技术的进步,具有长行程和纳米级定位精度的二维超精密工件台被广泛应用于光刻机中^[12-13]。该类型的工件台可满足扫描干涉曝光

中运动台的需求。激光直写系统中使用超精密工件台,不必主动调制干涉场的相位。但超精密工件台必须与光学头匹配,并需要具有栅距测量和扫描角度测量的功能,以减小扫描拼接误差,提高对比度。本文搭建了基于超精密工件台的激光直写系统,分析了栅距误差对曝光对比度和相位的影响,并进行了二维光栅曝光实验,实验结果表明,采用超精密激光直写系统能够写出高质量的二维光栅掩模。

2 超精密激光直写系统

图 1 所示为超精密激光直写系统,包括 5 个子系统:光学头、超精密运动台、双频激光干涉仪位置测量系统、大理石机架、隔振系统。光学头由两束高斯光束组成,可产生像光栅。由于本实验使用的是具有纳米量级定位精度的二维超精密运动台,不需要对像光栅的相位进行调制^[9]。大面积的潜像光栅由二维超精密运动台步进扫描像光栅组成。

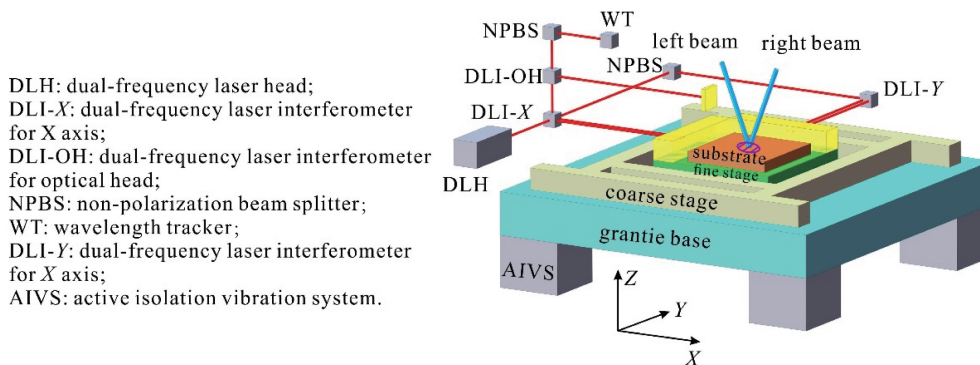


图 1 超精密激光直写系统

Fig. 1 Ultra-precision laser direct writing system

为实现大面积的扫描曝光,要求超精密运动台具有长行程,同时可实现纳米级定位。本系统运动台采用在微电子装备中广泛使用的粗微叠层结构,以实现 $\pm 15\ \text{nm}$ 的运动驱动。粗动台由 4 个直线电机和导轨组成;用于位置定位的光栅尺的测量分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。微动台由 4 个音圈电机驱动,并采用 3 个电涡流传感器测量微动台与粗动台的相对位置。微动台的运动精度决定了系统的定位精度。在微动台上安装了两块长条镜,采用激光干涉仪实现 $0.15\ \text{nm}$ 的测量定位。通过粗动台驱动微动台的方式,以实现粗动台的大行程高速运动,以及微动台的超精密运动和定位。通过双频激光干涉仪测量系统闭环,获得纳米量级的运动精度。

双频激光干涉仪位置测量系统由六轴干涉仪组

成,可对超精密工件台的三自由度进行测量以及锁定光学头。如图 1 所示,干涉仪 DLI-X 为三轴干涉仪,其中:两轴用于测量微动台沿 X 方向的位移和微动台偏摆;DLI-Y 为三轴干涉仪,其中一轴用于测量沿 Y 方向的位移。为减小阿贝误差,DLI-X 的测量轴线与 DLI-Y 的测量轴线交叉点与像光栅重合。DLI-OH 为单轴干涉仪,用于测量光学头的振动,并与 DLI-X 测量轴形成差动测量,以保持像光栅与工件台相对静止。波长跟踪器用于补偿由气流、温度变化导致的干涉仪激光头($\lambda = 632.8\ \text{nm}$)波长漂移引起的误差。如图 2 所示,当扫描速度为 $40\ \text{mm/s}$ 时,工件台在步进方向 X 上的误差 X_{error} 分布在 $\pm 15\ \text{nm}$ 以内,偏摆误差 Yaw 锁定在 $\pm 1\ \mu\text{rad}$ 以内,满足扫描曝光的要求。

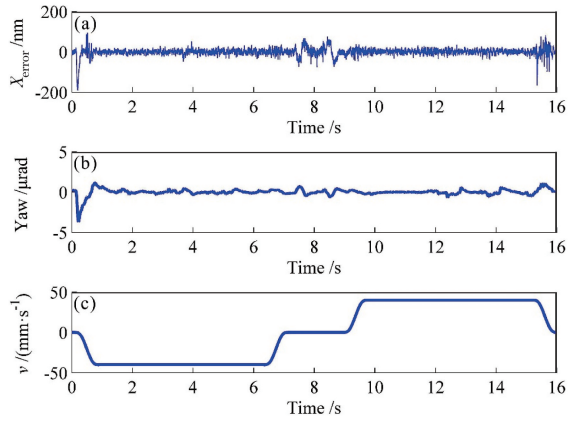


图 2 扫描速度为 $v=40$ mm/s 时的工件台误差。(a) X 步进方向误差; (b) 工件台偏摆误差; (c) 工件台对应的扫描速度

Fig. 2 Platform error when scanning velocity is 40 mm/s. (a) Error in X direction; (b) deflection error of platform; (c) corresponding scanning velocity of platform

3 栅距误差对曝光对比度和相位的影响

如图 3 所示, 基于激光直写系统扫描曝光制作光栅时, 双光束产生的干涉场首先在 Y 方向匀速扫描单次曝光, 然后在 X 方向步进整数个光栅周期, 再反方向匀速扫描, 直至基板全部曝光。拼接曝光时, 步进距离应为像光栅周期的整数倍, 如果存在栅距测量误差, 曝光对比度及光栅相位分布就会受到影响。因此, 需要分析栅距误差对曝光对比度和相位的影响。

左右两束高斯光束以相同的角度入射, 在基板上相干叠加形成干涉条纹, 即像光栅。像光栅的光强分布为

$$I(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega^2}\right) \left\{ I_L + I_R + 2\sqrt{I_L I_R} \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \Phi(x, y)\right] \right\}, \quad (1)$$

式中: ω 为光束在基片 Y 方向的光斑半径; $\omega_x = \omega / \cos \theta$ 为 X 方向的光斑半径; θ 为光束的入射角; I_L 为左光束的光强; I_R 为右光束的光强; $\Phi(x, y)$ 为像光栅相对理想相位分布的相位畸变; $p = \lambda / (2 \sin \theta)$ 为像光栅周期, 目标光栅的栅线密度为 1200 line/mm; $\lambda = 405$ nm 为入射激光波长。(1)式可写成

$$I(x, y) = I_{\text{avg}} \left[1 + \gamma \cos \Phi(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) - \gamma \sin \Phi(x, y) \sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right) \right], \quad (2)$$

式中: $I_{\text{avg}} = (I_L + I_R) \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega^2}\right)$ 为背景光强;

$\gamma = \frac{2\sqrt{I_L I_R}}{I_L + I_R}$ 为光强对比度。

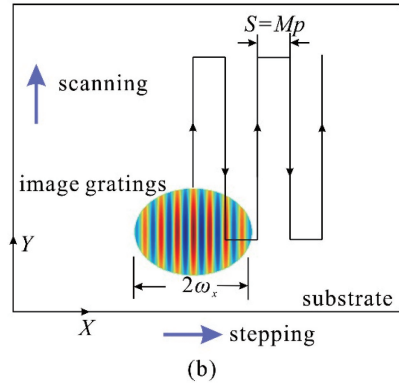
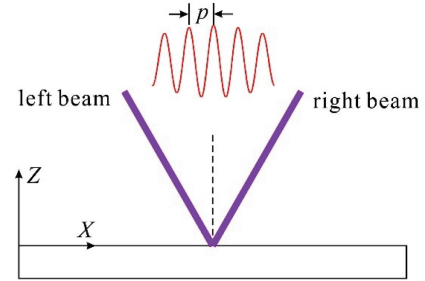


图 3 步进扫描曝光示意图。(a) 正视图; (b) 俯视图

Fig. 3 Schematics of step-scanning exposure.

(a) Front view; (b) top view

当扫描像光栅中形成单次曝光时, 光刻胶中的曝光量为光强在扫描方向上的积分, 即

$$D(x) = \int I(x, y) dt = \frac{1}{v} \int I(x, y) dy. \quad (3)$$

为方便计算, 单次曝光量 $D(x)$ 表示为

$$D(x) = D_{\text{avg}} \left[1 + \Gamma_s(x) \cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \Phi_s\right) \right], \quad (4)$$

式中: D_{avg} 为单次曝光的背景曝光量; $\Gamma_s(x)$ 为单次曝光的对比度分布; Φ_s 为单次曝光的相位分布。

$$D_{\text{avg}} = \frac{1}{v} \int I_{\text{avg}} dy, \quad (5)$$

$$\Gamma_s(x) = \frac{\sqrt{\left[\int \cos \Phi(x, y) I_{\text{avg}} dy \right]^2 + \left[\int \sin \Phi(x, y) I_{\text{avg}} dy \right]^2}}{I_{\text{avg}}}, \quad (6)$$

$$\Phi_s = a \tan \left[\frac{\int \sin \Phi(x, y) I_{\text{avg}} dy}{\int \cos \Phi(x, y) I_{\text{avg}} dy} \right]. \quad (7)$$

由于像光栅光强分布为高斯分布, 为在光刻胶

中得到均匀的曝光量,需将多个单次曝光拼接在一起。假设相邻两次曝光的步进距离 $S = Mp$, 其中 M 为步进栅距总数, p 为像光栅的栅距, 那么第 N 次扫描的曝光量分布为

$$D^{(N)}(x - NS) = D_{\text{avg}} \left\{ 1 + \Gamma_s(x - NS) \cos \left[\frac{2\pi}{p}(x - NS) + \Phi_s \right] \right\}. \quad (8)$$

经过 N 次扫描后, 光刻胶的总曝光量为

$$D^{\text{tot}}(x) = \sum_{n=0}^N D^{(n)}(x). \quad (9)$$

将(5)~(8)式代入到(9)式, 可得

$$D^{\text{tot}}(x) = D_B(x) + P(x) \cos \left(\frac{2\pi}{p}x \right) - Q(x) \sin \left(\frac{2\pi}{p}x \right), \quad (10)$$

$$D_B(x) = \sum_{n=0}^N D_{\text{avg}}(x - nS), \quad (11)$$

$$P(x) = \sum_{n=0}^N \cos \Phi_s D_{\text{avg}}(x - nS) \Gamma_s(x - nS), \quad (12)$$

$$Q(x) = \sum_{n=0}^N \sin \Phi_s D_{\text{avg}}(x - nS) \Gamma_s(x - nS), \quad (13)$$

式中: $D_B(x)$ 为背景曝光量。因此, (10)式可写为

$$D^{\text{tot}}(x) = D_B(x) \left[1 + \Gamma(x) \cos \left(\frac{2\pi}{p}x + \Phi_e \right) \right], \quad (14)$$

式中: $\Gamma(x)$ 为曝光对比度; Φ_e 为曝光光栅的相位误差。

$$\Gamma(x) = \frac{\sqrt{P(x)^2 + Q(x)^2}}{D_B(x)}, \quad (15)$$

$$\Phi_e = a \tan \left[\frac{Q(x)}{P(x)} \right]. \quad (16)$$

图 4 为拼接曝光中栅距误差示意图。像光栅的栅距为 p , 测量得到的像光栅栅距为 p_m 。当在步进方向拼接曝光量时, 步进距离为测量栅距的整数倍。只考虑栅距误差的影响时, (2)式的相位项为^[14]

$$\frac{2\pi}{p}x = \frac{2\pi}{p_m}x + 2\pi \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p_m} \right)x. \quad (17)$$

以测量栅距为基准, (17)式的相位畸变可表示为

$$\Phi(x, y) = 2\pi \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p_m} \right)x = 2\pi \frac{\Delta p}{p_m}x, \quad (18)$$

式中: Δp 为栅距测量相对误差, $\Delta p = (p_m - p)/p$ 。

将(18)式代入到(6)~(7)式以及(11)~(13)式

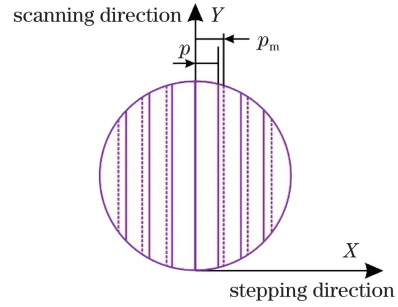


图 4 拼接曝光中栅距误差示意图

Fig. 4 Schematic of grating period error in stitching exposure 中, 根据(15)式和(16)式, 可得到存在栅距测量误差时多次拼接曝光的对比度和相位误差在拼接方向上的分布。当栅距测量误差 Δp 为 5×10^{-6} , 5×10^{-5} , 1×10^{-4} , 2×10^{-4} 时, 对应的拼接曝光对比度的数值模拟结果如图 5 所示。对应的模拟参数为: 栅距 $p = 830.325 \text{ nm}$, 步进距离为 $S = 420p = 0.348736 \text{ mm}$ 。可以看到: 当栅距测量误差为 $5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 时, 曝光对比度优于 99%; 当栅距误差为 5×10^{-5} 时, 曝光对比度仍大于 95%; 当测量误差为 1×10^{-4} 甚至更大时, 曝光对比度低于 95% 甚至更差。要保证栅距误差对曝光对比度的影响小于 1%, 栅距测量误差应小于 5×10^{-6} 。

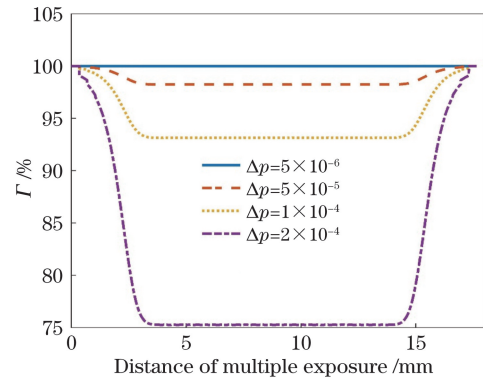


图 5 制作栅线密度为 1200 line/mm 的光栅时, 栅距测量误差对拼接曝光对比度的影响

Fig. 5 Effect of grating period error on stitching exposure contrast when fabricating gratings with grid line density of 1200 line/mm

当存在栅距误差时, (14)式中曝光光栅的相位误差 Φ_e 的数值模拟结果如图 6 所示。可以看出, 除了开始和结束曝光阶段由于拼接次数少导致相位畸变外, 中间部分的光栅曝光相位误差在零相位附近。说明经过多次拼接曝光, 栅距误差导致的相位畸变被平均, 曝光光栅的相位为线性相位, 测量得到的光栅栅距为所设定的光栅栅距。因此, 采用步进扫描曝光能够制作出栅线分布极为均匀的光栅^[7]。

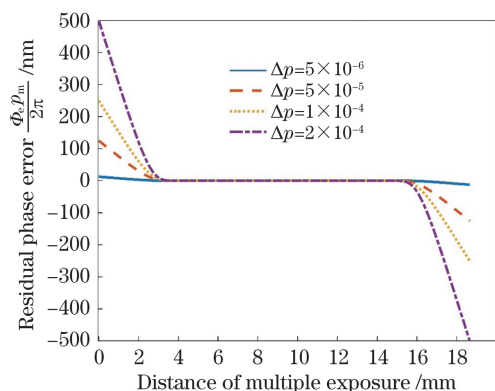


图 6 曝光光栅相位误差分布

Fig. 6 Phase error distribution of exposed grating

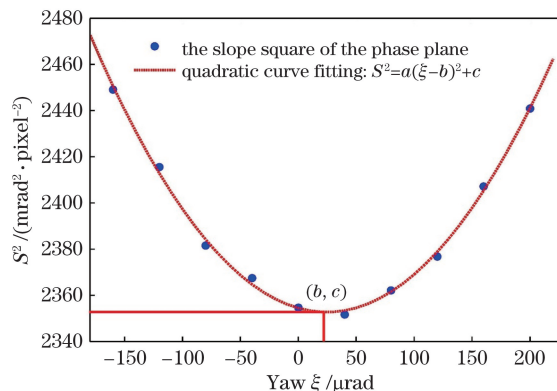


图 7 转角测量结果

Fig. 7 Measurement result of corner

4 实验结果及讨论

由于每次系统启动时,运动台的坐标系都略有不同。因此,在每次光栅曝光之前,都需要调整二维运动台的扫描角度^[15]。首先,沿参考光栅的栅线方向匀速移动光栅,调整倍周期光栅的栅线方向与扫描方向平行。然后,转动工件台,改变 Yaw 值使条纹数目较少,以此时的 Yaw 为起点,以 40 μrad 为间隔,逐步增加 Yaw 值。每一次调节 Yaw 时,计算当前角度下的干涉条纹相位并计算出线性相位项和相位斜率平方和 S^2 , Yaw 的调节次数为 10 次。将 10 次计算的结果进行二次曲线拟合,相位斜率平方和最小的位置对应的转角 b ,即像光栅和参考光栅的栅线重合时,工件台的扫描角度为 Yaw。如图 7 所示,当拟合的扫描角度 $b = 24.6 \mu\text{rad}$ 时,相位斜率平方和 S^2 最小,对应最小值为 c 。将工件台 Yaw

设定为 24.6 μrad ,并在此后的实验中保持偏摆方向不变。

在确定完扫描方向后,将二维运动台移动到分束棱镜处,测量像光栅的栅距。图 8 为栅距测量示意图。梯形分束棱镜安装在运动台上,左右两束光从棱镜的上表面入射,从下表面出射,出射后被光电探测器接收^[16]。当两束光相对分束面对称入射时,两束出射光在光电探测器上完全重合。当在步进方向匀速移动分束棱镜时,出射的两束光之间存在光程差,在光电探测器上形成干涉。干涉信号随移动距离的变化关系为具有高斯包络的周期信号。干涉信号的周期与两束光干涉形成的条纹周期相同。图 9 所示为光电探测器探测到的随工件台移动的干涉信号,利用文献[16]中提出的最小二乘拟合方法,得到光栅的栅距 $p = 830.325 \text{ nm}$ 。

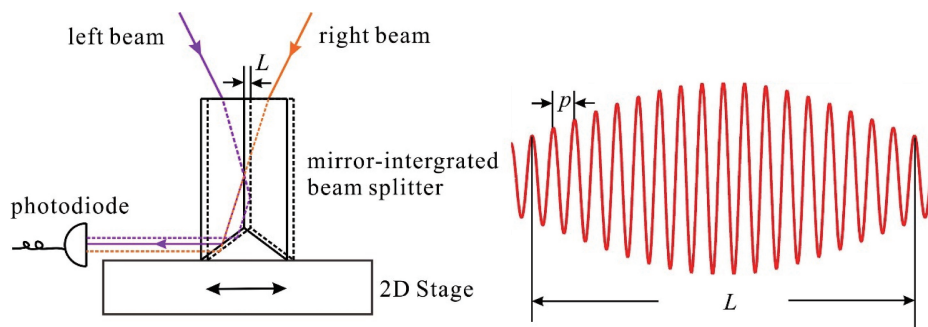


图 8 像光栅栅距测量示意图

Fig. 8 Schematic of measurement for image grating period

在扫描角度和栅距测量完成后,进行二维光栅的制作实验。图 10 所示为二维光栅掩模的制作流程。首先,将尺寸为 25 mm \times 25 mm 的基片超声清洗干净,在 100 $^\circ\text{C}$ 的条件下烘烤,使其表面水分蒸发。待基片冷却后,将 Shipley S1805 光刻胶旋涂在基片上,放入烘箱中于 110 $^\circ\text{C}$ 下烘烤 2 min。使用椭圆偏仪测量

膜厚,实验膜厚为 270 nm。调整好超精密激光直写系统后,设置单束激光能量为 0.7 mW,运动台的扫描速度 $v = 40 \text{ mm/s}$,步进距离 $S = 420p = 0.348736 \text{ mm}$ 。步进扫描工件台,在一个维度上曝光,曝光完成后,将基片旋转 90 $^\circ$,进行二次曝光。最后,显影、烘干后即可得到二维光栅光刻胶掩模。

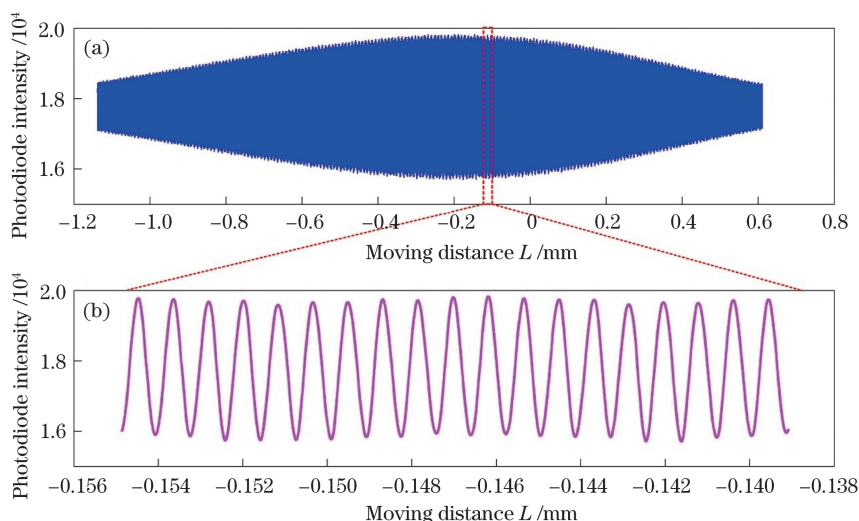


图 9 光栅栅距测量数据

Fig. 9 Grating period measurement data

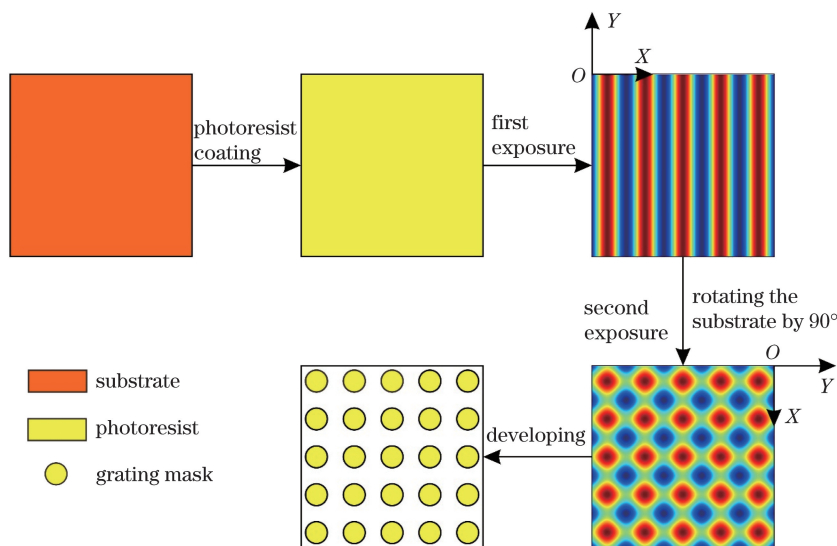


图 10 二维光栅掩模制作流程示意图

Fig. 10 Schematic of 2D grating mask fabrication

图 11 为得到的二维光栅掩模的原子力显微镜图。二维光栅掩模为孤岛形,高度约为 250 nm。图 12 为对应的扫描电镜图,可以看出,光刻胶轮廓清晰,空间分布均匀,说明光刻胶掩模质量较高。本实验制作的 25 mm × 25 mm 二维高密度 (1200 line/mm) 光栅如图 13 所示。

在制作计量用高精度的二维光栅方面,清华大学提出使用劳埃镜系统制作二维光栅^[17]。虽然劳埃镜系统可以一次曝光制作小口径光栅,但在大尺寸二维光栅的制作过程中,需要大口径的劳埃镜系统,因此这个技术难以拓展到制作几百毫米以上的大尺寸光栅。苏州大学^[18]和中国科学院上海光学精密机械研究所^[6]使用全息系统,通过

旋转基片 90°两次曝光制作二维光栅。但是全息曝光系统存在像差,如离焦、球差、彗差等^[19-21],导致光栅的栅线弯曲,很难制作出大尺寸的高质量计量光栅。本文提出基于超精密直写系统制作二维光栅,利用扫描技术,结合步进超精密二维运动台,将基片旋转 90°两次曝光制作二维光栅掩模,可以确保制作出栅线均匀分布的光栅。从原理来看,本文提出的技术可保证光栅栅线边缘和中心的一致性,避免全息系统制作二维光栅过程中存在的问题,为制作高精度二维光栅提供了一条有前景的技术路线。

与全息光刻制作二维光栅^[5-6]相比,基于超精密激光直写系统制作的光栅具有更均匀的栅线分布。

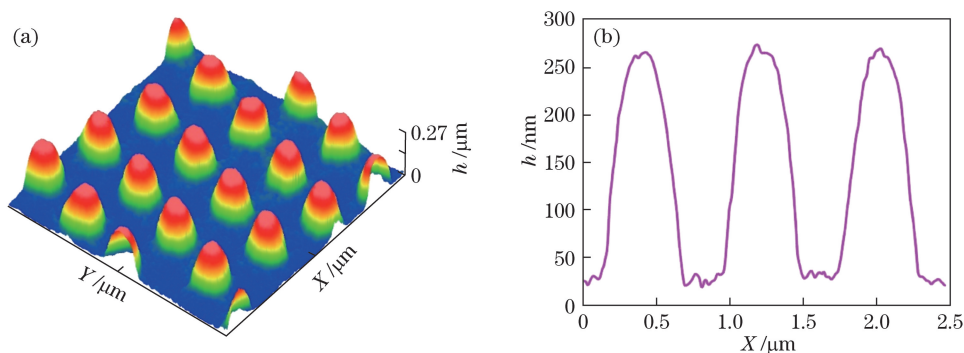


图 11 二维光栅掩模原子力显微镜图。(a)三维轮廓图;(b)截面图

Fig. 11 AFM of 2D grating mask. (a) 3D profile; (b) cross section

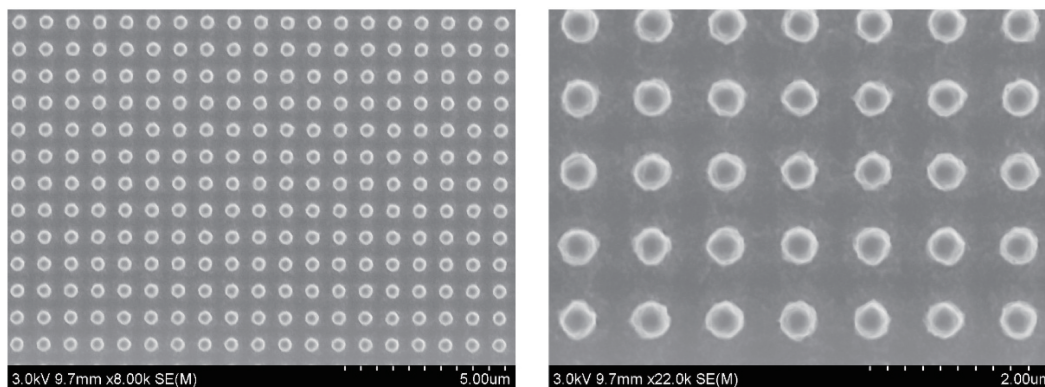


图 12 光栅掩模扫描电镜图

Fig. 12 Scanning electron microscopes of grating mask

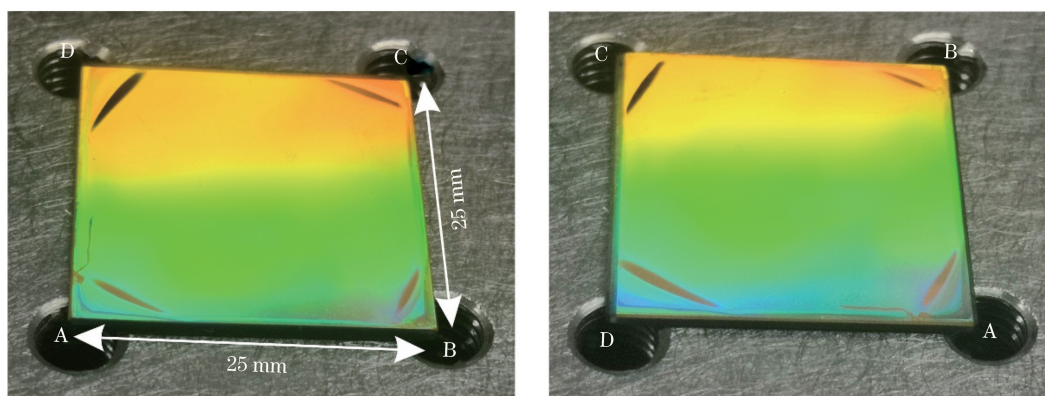


图 13 栅线密度为 1200 line/mm 的二维光栅掩模图

Fig. 13 2D grating mask (1200 line/mm)

利用分束棱镜测量栅距,重复性可达 2.6×10^{-6} ^[16],使得多次曝光能精确拼接,对曝光对比度的影响小于 1%。这些技术保证了使用超精密工件台可以直写出二维光栅,同时保证了栅距均匀。而在使用全息光刻制造二维光栅时,透镜像差的影响、中心光强和边缘光强的一致、透镜材料不均匀、表面加工缺陷以及空气气流的影响均会导致干涉场畸变,从而影响大尺寸光栅的质量。而光刻机中所需的二维光栅要求光栅栅距在整个测量范围内均匀一致。本系

统位置由激光干涉仪全程锁定,栅距测量精度可达到皮米量级^[16],这就保证了二维光栅具有全场均匀一致的栅线密度,非常适合于制作光刻机中光栅尺系统所需的大尺寸、栅距均匀、高效率的二维基准光栅。

5 结 论

构建了二维超精密激光直写系统,其步进方向定位精度为 $\pm 15 \text{ nm}$,偏摆精度为 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 。此系统

的栅距测量误差小于 5×10^{-6} , 对曝光对比度的影响小于 1%。实验中得到工件台的扫描角度为 $24.6 \mu\text{rad}$, 栅距为 830.325 nm 。90° 旋转基片, 两次曝光后得到二维光栅掩模, 制作出栅线密度为 1200 line/mm 的二维光栅。原子力显微镜和扫描电镜结果表明, 所制作的掩模轮廓清晰, 空间均匀。与全息光刻相比, 基于超精密激光直写系统制作的二维光栅栅距更均匀。上述结果证明了超精密激光直写系统能够有效制作二维光栅掩模, 该掩模可应用于制作大尺寸的高精度二维计量光栅。

参 考 文 献

- [1] Gao W, Kim S W, Bosse H, *et al.* Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 773-796.
- [2] Shibazaki Y, Kohno H, Hamatani M. An innovative platform for high-throughput high-accuracy lithography using a single wafer stage[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72741I.
- [3] Lu Y C, Wei C L, Jia W, *et al.* Two-degree-freedom displacement measurement based on a short period grating in symmetric Littrow configuration[J]. Optics Communications, 2016, 380: 382-386.
- [4] Castenmiller T, van de Mast F, de Kort T, *et al.* Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401N.
- [5] Lin C B, Yan S H, You F S. Fabrication and characterization of short-period double-layer cross-grating with holographic lithography[J]. Optics Communications, 2017, 383: 17-25.
- [6] Chen J M, Zhang Y B, Wang Y L, *et al.* Polarization-independent two-dimensional diffraction metal-dielectric grating[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(4): 041905.
- [7] Chen C G. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [8] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2001, 19(6): 2335-2341.
- [9] Zhu Y, Wang L J, Zhang M, *et al.* Novel homodyne frequency-shifting interference pattern locking system [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(6): 061201.
- [10] Lu S, Yang K M, Zhu Y, *et al.* Design and analysis of scanning beam interference lithography optical system based on far-field interference[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0605001.
鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 基于远场干涉的扫描干涉场曝光光学系统设计与分析[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0605001.
- [11] Wang W, Bayanheshig, Pan M Z, *et al.* Beam alignment error and its control in scanning beam interference lithography system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0722003.
王玮, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中光束对准误差及其控制[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722003.
- [12] Lu S, Yang K M, Zhu Y, *et al.* Yaw error correction of ultra-precision stage for scanning beam interference lithography systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2018, 232(7): 869-878.
- [13] Liu Y, Zhang M, Zhu Y, *et al.* Optimization of voice coil motor to enhance dynamic response based on an improved magnetic equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(9): 2247-2251.
- [14] Chang C H. Multilevel interference lithography-fabricating sub-wavelength periodic nanostructures [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [15] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, *et al.* Scan angle error measurement based on phase-stepping algorithms in scanning beam interference lithography [J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2641-2649.
- [16] Xiang X S, Li M K, Wei C L, *et al.* Precision fringe period metrology using an LSQ sine fit algorithm[J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4777-4784.
- [17] Zhou H Y, Zeng L J. Method to fabricate orthogonal crossed gratings based on a dual Lloyd's mirror interferometer[J]. Optics Communications, 2016, 360: 68-72.
- [18] Tang Y, Chen X R, Li C M, *et al.* Design of crossed planar phase grating for metrology [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10621: 106211D.
- [19] Zhang W, Wu J H, Li C M. Effect of wavefront aberration of grating on pulse compression[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 399-402.
张伟, 吴建宏, 李朝明. 光栅波像差对脉冲压缩的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 399-402.
- [20] Wang S W, Zeng L J. Analysis and minimization of spacing error of holographic gratings recorded with

- spherical collimation lenses[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5532-5546.
- [21] Han J, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Wavefront aberration analysis of the interference image according to different axis alignment errors in the grating exposure system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705002.
- 韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息曝光系统轴向调节误差对光栅衍射波像差的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705002.