

压电陶瓷锁焦性能对光刻曝光均匀性的影响

郑金轮^{1,2}, 魏劲松^{1*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光电子功能材料实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049

摘要 在激光直写光刻系统中, 锁焦性能是影响光刻系统曝光均匀性的关键因素之一。研究了压电陶瓷作为光刻系统中的锁焦执行器时的动态响应特性, 并对其在极坐标光刻系统中对曝光均匀性的影响作了探索。在探索过程中, 发现了压电陶瓷对一般非简谐信号的动态响应结果和其对特征简谐信号的动态响应结果之间的非线性关系, 并通过样品曝光实验验证了这个非线性关系的正确性。利用该非线性关系量化计算出了使用该压电陶瓷能够满足锁焦要求的旋转台最高的工作转速, 同时指导压电陶瓷生产商针对性地优化了适合本极坐标光刻系统的压电陶瓷的动态响应特性, 优化后的压电陶瓷的锁焦能力提高了 125.2%。

关键词 激光光学; 激光直写; 像散法; 压电陶瓷; 离焦量检测

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1914001

Effect of Focus Locking Performance of Piezoelectric Ceramics on Exposure Uniformity of Lithography System

Zheng Jinlun^{1,2}, Wei Jingsong^{1*}¹Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center for Materials Science and Optoelectronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the laser direct writing lithography system, the focus locking performance is one of the key factors affecting the exposure uniformity of the system. The dynamic response characteristics of a piezoelectric ceramic as the focus locking actuator of the lithography system are studied, and their influences on the exposure uniformity of the polar coordinate lithography system are explored. In the process of exploration, the nonlinear relationship between the dynamic response of piezoelectric ceramics to general anharmonic signals and that to characteristic harmonic signals is found, and the correctness of the relationship is verified by sample exposure experiments. Based on the relationship, the fastest working speed of the rotary table that can meet the focus locking requirements is quantitatively calculated. At the same time, the guidance for the piezoelectric ceramic manufacturers to optimize the dynamic response characteristics of the piezoelectric ceramics suitable for the polar coordinate lithography system is provided. The focus locking ability of the optimized piezoelectric ceramics is increased by 125.2%.

Key words laser optics; laser direct writing; astigmatism method; piezoelectric ceramics; defocus detection

1 引言

激光直写技术在微纳结构加工领域中有着广泛的应用^[1-10], 锁焦是激光直写技术中的难点。由于机械加工精度的限制, 故工件台表面并非完美的平面, 其表面可能有微小的凹坑或凸起, 甚至整个表面还存在倾斜。

另外, 样品本身同样也并非完美的平面, 其表面也可能存在凹坑或凸起, 甚至整个表面存在倾斜。这些因素导致在使用激光直写光刻系统曝光样品时, 刻写物镜与样品表面的距离并非始终处于满足加工条件的焦深范围内, 故需要在激光直写光刻系统中加入锁焦模块用于控制刻写物镜与样品间的距离。压电陶瓷(PZT)

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-03-22; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(51672292, 61627826)、上海市集成电路重大科技项目(20501110600)

通信作者: *weijingsong@siom.ac.cn

定位精度高,这是得益于逆压电效应^[11-14],其定位分辨率可以达到纳米级别,故本文选用压电陶瓷作为锁焦执行机构,并研究其对光刻曝光均匀性的影响。

目前,关于压电陶瓷在激光直写光刻领域中的应用的研究较少,通常以单独研究压电陶瓷自身的静态或动态响应特性为主,很少有将这一特性与其在激光直写光刻系统中的应用相结合的研究。压电陶瓷在原子力显微镜、共聚焦显微镜和生物医学显微镜中有较为广泛的应用,这些应用中压电陶瓷的快速响应特性并不是特别重要,重点在静态响应特性的精确性上。然而,当激光直写光刻系统工作时,刻写物镜的运动速度较快,从而产生快速变化的离焦量,这对压电陶瓷的动态响应特性要求较高。本研究能够帮助相关领域的研究者认识到压电陶瓷的动态响应特性对激光直写光刻曝光均匀性的影响,进而建立起两者之间的量化关系。同时,也能为进一步改进压电陶瓷的锁焦能力提供方向。

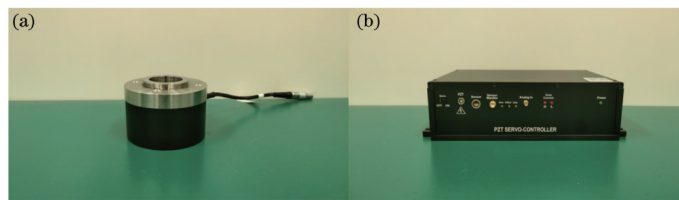


图 1 压电陶瓷物镜定位器和压电陶瓷控制器实物图。(a)压电陶瓷物镜定位器;(b)压电陶瓷控制器

Fig. 1 Physical drawings of piezoelectric ceramic objective locator and piezoelectric ceramic controller. (a) Piezoelectric ceramic objective locator; (b) piezoelectric ceramic controller

考虑到本文后续要在一套极坐标激光直写光刻系统中验证压电陶瓷的锁焦能力,故需要选择一种合适的位移检测手段。常用的微位移检测方法有裂像镜法^[15]、刀口法^[16]、激光三角法^[17]、激光干涉法^[18]和图像视觉测量法^[19]等。这些方法都有各自的缺点:裂像镜法的测量精度不够高,本文搭建的极坐标激光直写光刻系统的曝光焦深约为 600 nm,超出了传统裂像镜法的测量精度;刀口法需要在激光束腰位置处放置探测器,无法实现实时的动态离焦量检测,故也不适合本系统;本光刻系统中的刻写物镜工作距离短,故激光三角法、激光干涉法这些需要较大安装空间的方法都不适合本系统;图像视觉测量法需要消耗算力进行图像处理才能获得离焦信息,进而也无法实现实

首先,本文使用双柱面镜像散法检测压电陶瓷物镜定位器对正弦输入信号的动态响应特性。然后,在一套极坐标激光直写光刻系统中研究压电陶瓷动态响应特性对曝光均匀性的影响。在分析原因的过程中,发现了压电陶瓷物镜定位器对一般信号的响应结果和其对特征分信号的响应结果之间的关系,并通过样品曝光实验验证了这个关系的正确性。

2 压电陶瓷的动态响应特性测试

本文使用的压电陶瓷物镜定位器如图 1(a)所示,为哈尔滨芯明天科技有限公司的 P76.Z 系列产品。向图 1(b)所示的压电陶瓷控制器输入特定的电压,压电陶瓷物镜定位器就会携带物镜移动至对应的位置。压电陶瓷控制器 0~10 V 的输入信号对应压电陶瓷物镜定位器 0~100 μm 的输出位移,该关系属于压电陶瓷的静态响应特性。

时的离焦量检测。综合考虑后选择使用双柱面镜像散法^[20-22]作为离焦检测的手段。该方法具有系统结构紧凑、检测精度较高的优点,检测精度可达到 50 nm 级别,能够满足 600 nm 焦深的检测需求。构建了一个基于双柱面镜像散法的微位移检测光路,如图 2 所示,其中 CL 为柱面镜。波长 658 nm 的激光穿过 1/2 波片(WP)、偏振分光棱镜(PBS)和 1/4 波片后被物镜聚焦至样品表面上。然后,样品表面反射该激光,反射光依次通过物镜、1/4 波片、PBS、反射镜和双柱面镜。最后,该反射光在四象限探测器(FQD)表面形成形状随离焦量变化的特征光斑。因此,压电陶瓷的微小输出位移就可以利用 FQD 检测到的强度信号来表示。

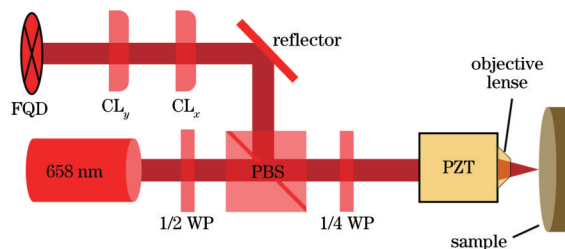


图 2 微位移检测光路

Fig. 2 Microdisplacement detection optical path

2.1 双柱面镜像散法理论

本节更具体地介绍微位移检测光路的原理,基于

双柱面镜的像散法^[20]的光路原理图如图 3(a)所示。其中, L_o 为焦距为 f_o 的物镜, P_i 为 L_o 的准焦平面, P_s

和 P_p 分别为远焦平面和近焦平面。两个柱面镜 CL_x 和 CL_y 的焦距分别为 f_x 和 f_y , 安装时两者互相垂直。 CL_x 可以改变 FQD 上的光斑在 x 方向上的长度, CL_y 可以改变 FQD 上的光斑在 y 方向上的长度。当样品处于平面 P_i 时, FQD 上的光斑为圆形, 如图 3(b) 中中间的

图所示。当样品处于远焦平面 P_a 上时, FQD 上的光斑为纵向的椭圆, 如图 3(b) 中右图所示。当样品处于近焦平面 P_p 上时, FQD 上的光斑为横向的椭圆, 如图 3(b) 中左图所示。

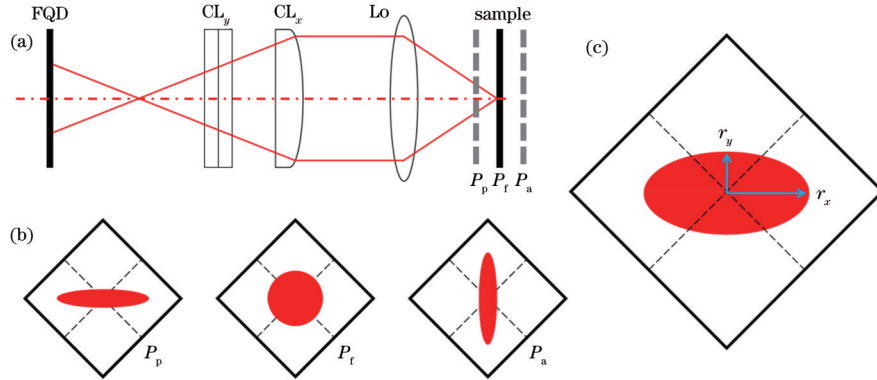


图 3 双柱面镜像散法光学元件位置关系图。(a) 光路原理图; (b) 不同形状的特征光斑; (c) FQD 表面的光斑

Fig. 3 Position relation diagram of optical elements in astigmatism method based on double cylindrical lens. (a) Schematic diagram of optical path; (b) characteristic spots with different shapes; (c) spot on surface of FQD

不同的光斑形状会使得 FQD 的 4 个象限输出不同特征的电压信号, 定义聚焦误差信号 (FES, V_{FES})。假设 FQD 上 4 个象限产生的电压信号分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 , 则有

$$V_{FES} = \frac{-V_1 + V_2 - V_3 + V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}, \quad (1)$$

令椭圆光斑在 4 个象限中的面积分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 , 由于光斑的光强是均匀分布的, 即 $V_i \propto A_i$, $i = 1, 2, 3, 4$, 故有

$$V_{FES} = \frac{-S_1 + S_2 - S_3 + S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}. \quad (2)$$

如图 3(c) 所示, r_x 和 r_y 分别是 FQD 上的光斑在 x 方向和 y 方向上的半径。根据椭圆相关的几何知识, 结合微积分工具可以将 FES 的表达式^[20]写为

$$V_{FES} = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{|r_x|}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} - \arcsin \frac{|r_y|}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right). \quad (3)$$

r_x 和 r_y 可以通过光学成像原理计算出来, 原理图如图 4 所示, 其中: a_0 是物镜到样品表面的距离; l_x 和 l_y 分别是 CL_x 和 CL_y 到物镜的距离; m_x 和 m_y 分别是 CL_x 和 CL_y 到 FQD 表面的距离; r_0 是进入物镜 Lo 的光斑的

孔径。从样品中反射出的激光经过物镜和双柱面镜后到达 FQD 表面上。根据几何光学的理论, r_x 和 r_y 关于上述这些参数的关系^[20]可表示为

$$r_x = r_0 \left[\frac{m_x}{f_x} + \frac{m_x(a_0 - f_0)}{a_0 f_0 - l_x a_0 + l_x f_0} - 1 \right] \left[1 - \frac{l_x(a_0 - f_0)}{a_0 f_0} \right], \quad (4)$$

$$r_y = r_0 \left[\frac{m_y}{f_y} + \frac{m_y(a_0 - f_0)}{a_0 f_0 - l_y a_0 + l_y f_0} - 1 \right] \left[1 - \frac{l_y(a_0 - f_0)}{a_0 f_0} \right]. \quad (5)$$

至此, 根据式(3)~(5)就可以获得 FES 和离焦量 Δa_0 的关系, 这里的 Δa_0 为 a_0 的变化量。如图 5(a) 所示, FES 和 Δa_0 的关系曲线呈现一个“S”形, 曲线上存在一个极大值点 A 和极小值点 B, 两者之间的 FES 值单调递增, 呈现出线性特征。靠近 FES 值零点的区域斜率基本一致, 进而该区域被称为线性区域。在线性区域中, 每一个离焦量都唯一对应一个 FES 值。利用这个特征, 任意时刻的离焦量就可以利用检测到的 FES 值来表征, FES 值可以利用式(1)计算出来。

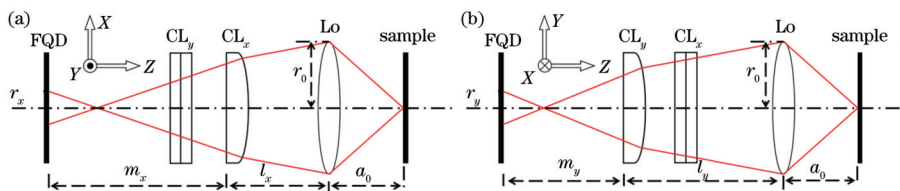


图 4 双柱面镜像散法原理图。(a) 光束经过柱面镜 CL_x 前后的成像关系示意图; (b) 光束经过柱面镜 CL_y 前后的成像关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of astigmatism method based on double cylindrical lens. (a) Schematic diagram of imaging relationship before and after beam passing through cylindrical lens CL_x ; (b) schematic diagram of imaging relationship before and after beam passing through cylindrical lens CL_y

在了解了像散法的原理后,可以确定这个微位移检测光路的相关参数。相关光学元件的参数为 $a_0 = 2 \text{ mm}$, $r_0 = 2.5 \text{ mm}$, $l_x = 400 \text{ mm}$, $l_y = 430 \text{ mm}$, $m_x = 200 \text{ mm}$, $m_y = 170 \text{ mm}$, $f_x = 80 \text{ mm}$, $f_y = 150 \text{ mm}$ 。在这些参数下,实际检测到的 FES 和 Δa_0 的关系曲线如

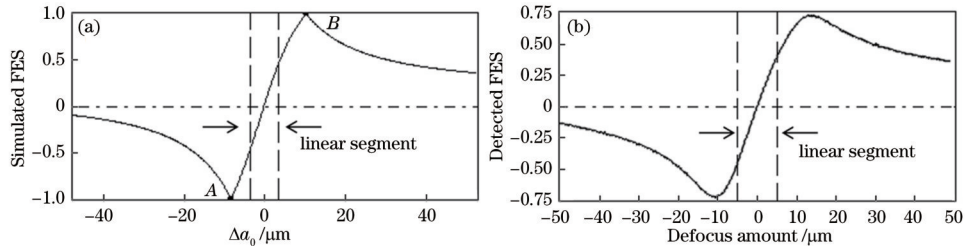


图 5 FES 值和离焦量 Δa_0 的仿真曲线和实际曲线。(a) FES 值和离焦量 Δa_0 的仿真曲线;(b) 特定参数下实际检测到的关系曲线
Fig. 5 Simulation curve and actual curve of FES value and defocus amount Δa_0 . (a) Simulation curve of FES value and defocus amount Δa_0 ; (b) relationship curve actually detected under specific parameters

2.2 压电陶瓷物镜定位器的动态响应性能

本节测试了压电陶瓷物镜定位器对不同幅度、不同频率的正弦信号的动态响应特性,包括幅频特性和相频特性。测试过程如下。

1) 把一个质量为 120 g、放大倍数为 50 倍、数值孔径 (NA) 为 0.8 的物镜安装在待测压电陶瓷物镜定位器上。

2) 将直径为 30 mm 的晶圆放置在样品台上。

3) 为充分利用压电陶瓷物镜定位器的行程,将压电陶瓷的控制电压设置为 5 V,从而使压电陶瓷伸长至行程一半的位置处。然后,调整物镜到样品表面的距离使得该距离处于“S”曲线的线性段中,并使检测到的 FES 值约为 0。

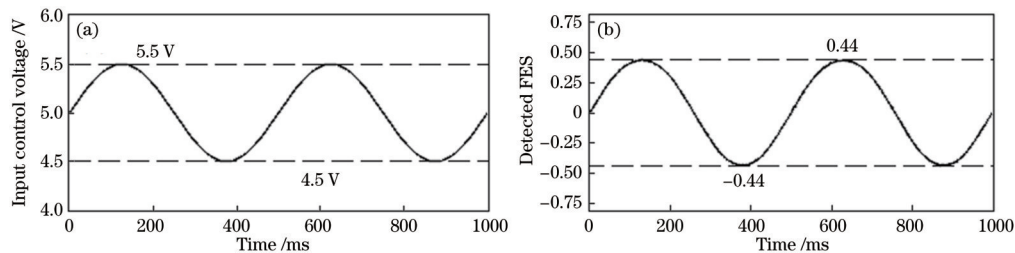


图 6 压电陶瓷控制器的输入电压信号和 FQD 检测到的 FES 值。(a) 压电陶瓷控制器的输入电压信号;(b) FQD 检测到的 FES 值
Fig. 6 Input voltage signal of piezoelectric ceramic controller and FES value detected by FQD. (a) Input voltage signal of piezoelectric ceramic controller; (b) FES value detected by FQD

5) 改变压电陶瓷控制器的输入正弦电压信号,信号频率从 10 Hz 变化到 250 Hz,重复步骤 4) 以获得幅度为 10 μm 的不同频率正弦电压信号下的 FES 值。之后,依次测试了幅度为 5, 2, 1 μm 的正弦电压信号的响应情况。4 种不同幅度信号下压电陶瓷物镜定位器的幅频响应曲线如图 7(a) 所示,横坐标为输入正弦信号的频率,纵坐标为反馈 FES 值的最大幅度。可以看出,压电陶瓷物镜定位器对输入信号的响应幅度随频率的增加而衰减,并且在大约 81 Hz 的位置处响应幅度突然增大,之后又恢复正常,故该频率为本款压电陶

瓷物镜定位器的谐振频率。图 7(b) 为每种幅度信号的衰减百分比,横坐标为输入正弦信号的频率,纵坐标为该频率的响应幅度与最大幅度的百分比。图中方框放大处为频率较低时的衰减百分比,可以看到,输入信号的幅度越大,响应幅度衰减得就越早。中间部分的曲线表明各个幅度的衰减速度都差不多。频率较高处圆框标示的位置表明响应幅度的衰减率随着幅度的增大而增大。综上所述,该款压电陶瓷物镜定位器的幅频响应特性为随着输入信号频率的增大,响应幅度逐渐衰减,并且输入信号的幅度越大,响应幅度衰减得越早。

继续改变输入正弦电压信号的幅度,范围扩展至 0~10 μm,记录下检测到的 FES 幅频响应曲线,从而获得了幅度为 0~10 μm、频率为 10~250 Hz 的正弦输入电压信号的幅频响应特性,结果如图 7(c)所示。图 7(c)中的频率轴代表正弦信号的频率,幅度轴代表正弦信号的幅度,ΔV_{FES} 轴为对应条件下检测到的 FES 变化量。

6)对步骤 5)中获得的 FES 值的相位频率响应特性也进行了研究。图 7(d)是幅度为 10 μm 的正弦输入电压信号和反馈 FES 值的相位差与信号频率之间的关系曲线。可以看出,相位差与输入信号的频率整体上呈现线性特征,但是在 81 Hz 附近出现了一个尖峰,结合步骤 5)的幅频响应特性可知,此频率应为该款压电陶瓷物镜定位器的谐振频率。令相位差为 φ,频率为 f,则整体上有 φ = kf,其中 k 为比例系数。反馈 FES 值的相位总是滞后于输入的正弦信号,令这个滞后时间为 τ(单位为 ms),则 τ 与 φ 的关系可表示为 τ =

φ/360 × T = φ/(360 × f),其中 T 为输入正弦信号的周期,将该式代入 φ = kf 中可获得 τ = k/360。从图 7(d)所示的相频曲线中可以看出,k 基本为常数,从而可以推断出这个滞后时间 τ 也基本为常数,其值大约为 1.1 ms。此外,图 7(d)上还存在一个谐振频率点,此处的滞后时间 τ 不是常数,但可以用相位差 φ(f)和频率 f 表示为 τ = φ(f)/(360 × f)。综上所述,滞后时间 τ 的表达式为

$$\tau = \begin{cases} 1.1, & f < 80 \text{ Hz or } f > 82 \text{ Hz} \\ \frac{\varphi(f)}{360 \times f}, & 80 \text{ Hz} \leq f \leq 82 \text{ Hz} \end{cases}, \quad (6)$$

滞后时间 τ 的曲线图如图 7(e)所示。之后,又对其他幅度的正弦输入信号和反馈 FES 值的相位差与频率之间的关系进行了研究,发现不同幅度下压电陶瓷物镜定位器的滞后时间的特性基本相同,说明相频响应特性与输入幅度之间是互相独立的。

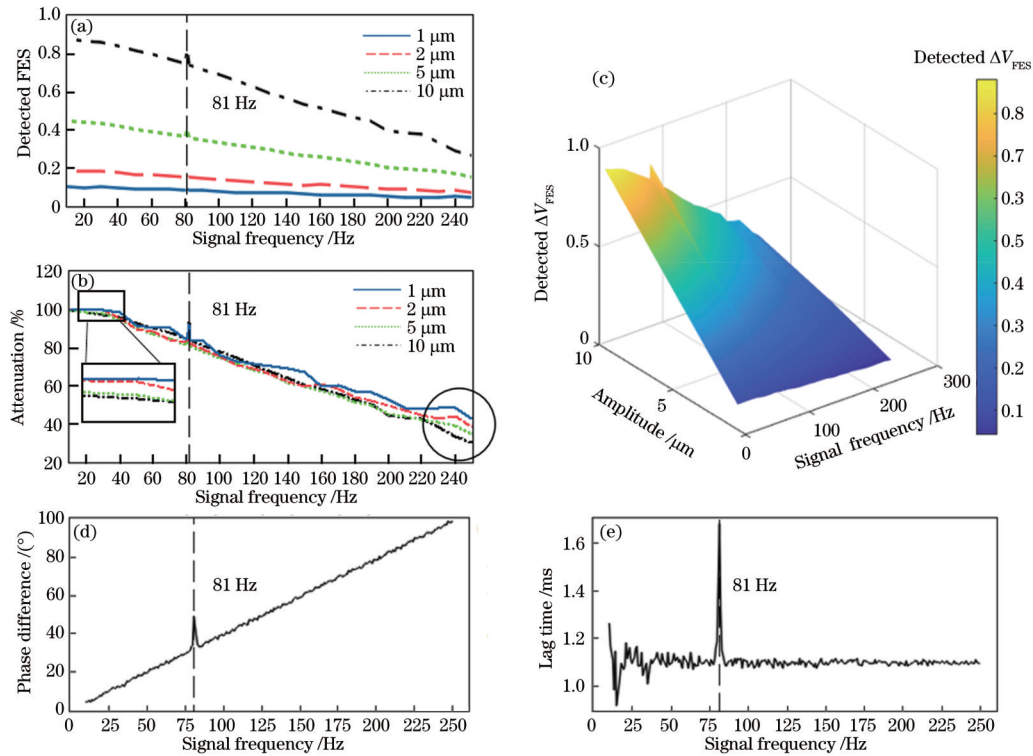


图 7 压电陶瓷物镜定位器在不同输入信号下的 FES 反馈值。(a) 4 种不同幅度的信号下压电陶瓷物镜定位器的幅频响应曲线; (b) FES 幅值衰减百分比; (c) 幅度为 0~10 μm、频率为 10~250 Hz 的正弦输入电压信号的幅频响应特性; (d) 幅度为 10 μm、频率为 10~250 Hz 的正弦输入电压信号的相频响应特性; (e) 相位差对应的滞后时间与频率的关系特性

Fig. 7 FES feedback value of piezoelectric ceramic objective locator under different input signals. (a) Amplitude-frequency response curves of piezoelectric ceramic objective locator under signals with four different amplitudes; (b) FES amplitude attenuation percentage; (c) amplitude-frequency response characteristic of sinusoidal input voltage signal with amplitude of 0~10 μm and frequency of 10~250 Hz; (d) phase-frequency response characteristic of sinusoidal input voltage signal with amplitude of 10 μm and frequency of 10~250 Hz; (e) relationship between lag time corresponding to phase difference and frequency

3 压电陶瓷的动态特性在极坐标激光直写系统中对曝光均匀性的影响
在获得压电陶瓷的动态响应特性后,需要进一步

研究拥有该特性的压电陶瓷在极坐标光刻系统中作为锁焦执行器时对最终曝光均匀性的影响。
极坐标直写光刻系统目前主要被用于光存储、圆对称光学元件的制作和掩模版的制作等领域中。光存

储领域中最典型的极坐标直写光刻系统就是光盘刻录机和光驱。近年来,大数据领域对存储介质的需求和全球节能减排的大趋势这两个因素为光盘市场增添了新的活力。数据中心要求存储介质满足大容量、长寿命和低能耗的特点,光盘的存储特性使得其非常适合用在数据中。另一个重要应用是圆对称光学元件和掩模版的制作。常见的圆对称光学元件为菲涅耳波带片,可用于远程通信、光测距和宇航技术中,普通民用领域中手机的照明模组、红外传感器也是其广泛使用的地方。一些亚微米精度的掩模版也可以使用极坐标直写光刻系统制作,这类掩模版可用于身份证、银行卡和手机用户身份识别模块(SIM)卡中的集成电路(IC)芯片的制造。

考虑到极坐标光刻系统本身的意义,故本文选择其作为压电陶瓷动态响应特性测试的载体。对于直角坐标光刻系统,本文的研究工作同样很有指导意义。由于直角光刻系统的工作特点,要想提高曝光的速度,工件台的运动速度就要尽可能得快,工件台运动速度越快,锁焦的及时性要求就越高,故本研究工作对直角光刻系统中的锁焦性能提升同样有一定的帮助。

3.1 用于测试压电陶瓷锁焦性能的极坐标激光直写光刻装置的构建

构建了一套极坐标激光直写光刻系统,并在系统中嵌入了第 2 章描述的微位移检测模块,部分系统原理图如图 8(a)所示。图 8(b)为装置的照片。

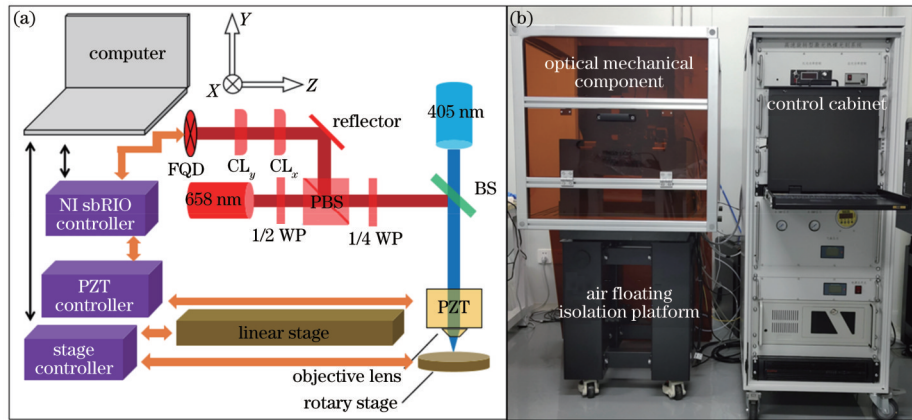


图 8 极坐标激光直写光刻装置的部分原理图和装置的照片。(a)部分原理图;(b)装置的照片

Fig. 8 Partial schematic diagram of polar coordinate laser direct writing lithography device and photo of device. (a) Partial schematic diagram; (b) photo of device

在该系统中,波长为 405 nm 的刻写光经过分束片(BS)后进入刻写物镜,从而被聚焦至样品表面上。刻写物镜固定在压电陶瓷物镜定位器上。图 8(a)中的微位移检测光路和压电陶瓷物镜定位器构成了锁焦模块。待刻写样品放置在旋转台上,并且上述提到的所有光学元件都固定在直线位移台上后,系统开始刻写。当系统开始刻写时,旋转台匀速转动,直线位移台也匀速运动,从而在样品表面扫描出螺旋状轨迹。通过对刻写光的调制就可以在样品表面刻写出任意图案。在这个刻写过程中,锁焦模块持续工作以保证样品表面始终处于刻写光的焦深范围内。

锁焦模块的执行过程如图 9 所示。先将目标位置的 FES 值设置为参考输入,再将任意时刻位置检测到

的 FES 值作为反馈信号。两者的差就是 FES 值的变化量 ΔV_{FES} 。由 2.1 节图 5 的结果可知 ΔV_{FES} 和 Δa_0 在线性区域中为线性关系。利用这个特征就可以将 ΔV_{FES} 转化为 Δa_0 , Δa_0 的单位为 μm 。离散 PID 控制算法根据 Δa_0 计算出当前控制循环应该输出的补偿量 $u(k)$, 输出补偿量的单位也为 μm 。根据压电陶瓷物镜定位器的输出位移和输入电压信号的静态响应关系,可将 $u(k)$ 转换为压电陶瓷控制器的输入电压 V_0 。压电陶瓷控制器将输入的电压 V_0 转换成压电陶瓷物镜定位器的驱动电压,从而控制其移动特定的距离以补偿离焦量。然后,双柱面镜像散光离焦检测模块检测当前的离焦量,输出反馈 FES 值。该循环持续运行,最终可保证物镜镜头到样品表面的距离始终处于设定

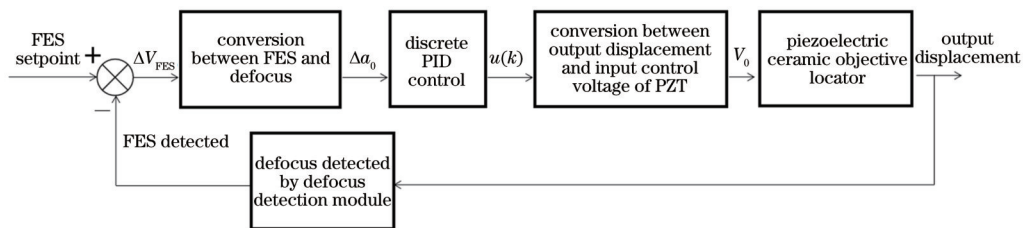


图 9 锁焦模块的控制原理图

Fig. 9 Control schematic diagram of focus locking module

的范围内。

图 10 展示了不同锁焦工况下的样品图,理想刻写结果为直径为 28 mm 的圆形区域均被曝光。图 10(a) 为没有锁焦时曝光的样品,图 10(b)、(c) 为有锁焦时曝光的样品,其中图 10(b) 的样品刻写时的旋转台转速为 4 r/s,图 10(c) 的样品刻写时的旋转台转速为 20 r/s,图上虚线中的区域为曝光区域。可以看出:完

全没有锁焦时,大部分图案没有刻上,只有靠近中心的区域被曝光;当旋转台速度为 4 r/s 时,样品被全部曝光;当旋转台速度为 20 r/s 时,曝光过程中虽然开启了锁焦,但是晶圆的外圈区域没有被成功曝光。从刻写结果可以看出,旋转台的转速能够影响样品的曝光效果,故有必要对锁焦模块的工作特点进行进一步研究。

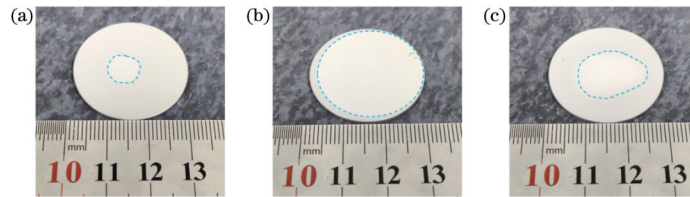


图 10 直径为 30 mm 的晶圆曝光样品。(a) 锁焦未工作时的曝光样品;(b) 锁焦开启后,旋转台转速为 4 r/s 时的曝光样品;(c) 锁焦开启后,旋转台转速为 20 r/s 时的曝光样品

Fig. 10 30 mm diameter wafer sample after exposure. (a) Exposure sample when focus locking is not working; (b) exposure sample with rotary table rotating speed of 4 r/s when focus locking is on; (c) exposure sample with rotary table rotating speed of 20 r/s when focus locking is on

3.2 压电陶瓷在锁焦过程中的工作状态分析

首先,检测了极坐标光刻系统工作时的离焦量分布。将直径为 30 mm 的晶圆放置在旋转台上,并保证晶圆的中心与旋转轴基本对准。然后,设置旋转台的转速为 4 r/s,同时移动直线位移台使光轴移动至晶圆的不同半径处,并记录这些不同半径处的 FES 值,以获得系统工作时的离焦量分布。

图 11(a) 为直径为 30 mm 的晶圆旋转时中心位置的 FES 值,图 11(b) 为晶圆半径 14 mm 处的 FES 值。由检测到的 FES 数据可知,晶圆上靠近旋转轴的区域离焦量很小,FES 值的波动范围为 $-0.01 \sim 0.01$ 。由图 5(b) 的转换关系可知,波动量为 $-114 \sim 114$ nm。

晶圆上距离旋转轴 14 mm 处的 FES 值的波动范围为 $-0.147 \sim 0.147$,对应的实际离焦量范围为 $-1.67 \sim 1.67 \mu\text{m}$ 。对晶圆上其他半径位置的 FES 值波动范围也进行了测量,测量结果如图 11(c) 所示,横轴为晶圆半径,纵轴为最大正离焦量和最小负离焦量之差,离焦量和半径呈正相关。结合不同半径处检测到的离焦量的正弦变化可以推测,光刻系统刻写时的离焦量主要来自于旋转台表面的倾斜或者晶圆上下表面平行度的误差过大。图 11(d) 为根据检测到的 FES 值绘制的整个晶圆表面的离焦量分布三维图。可以看出,随着晶圆表面半径的增大,晶圆的第三象限和第四象限的正负离焦量也越来越大,产生了两个主要的离焦区域。

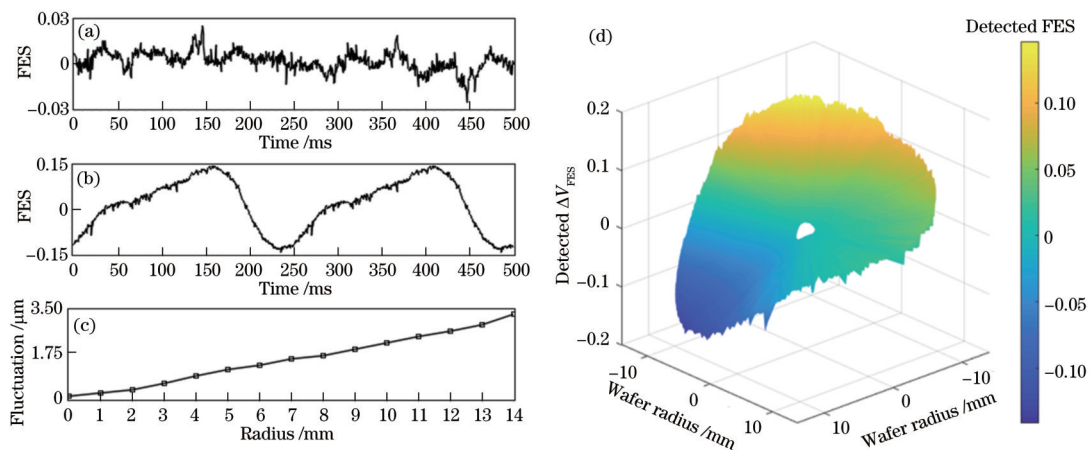


图 11 当旋转台转速为 4 r/s 时,光刻系统刻写时检测到的晶圆表面离焦量。(a) 晶圆中心处的 FES 值;(b) 14 mm 晶圆半径处的 FES 值;(c) 在晶圆不同半径处的最大离焦量分布图;(d) 晶圆表面离焦量分布的三维图

Fig. 11 Defocus of wafer surface detected during lithography when rotating speed of rotary table is 4 r/s. (a) FES value at center of wafer; (b) FES value at wafer radius of 14 mm; (c) distribution diagram of maximum defocus at different radii of wafer; (d) three-dimensional distribution diagram of defocus on wafer surface

在锁焦过程中,压电陶瓷物镜定位器的作用相当于对离焦量进行补偿。检测到的旋转台表面的离焦量

的相反数可以看作是向压电陶瓷控制器输入的控制信号,这与 2.2 节中向压电陶瓷控制器输入正弦控制信

号是类似的。锁焦的效果取决于压电陶瓷物镜定位器对输入信号的响应能力,该响应能力可以通过反馈的 FES 值来表征。

设置旋转台的转速为 10 r/s。图 12 为开启锁焦算法时检测到的 FES 值,图 12(a)为 1 mm 晶圆半径处的 FES 曲线,图 12(b)为 14 mm 晶圆半径处的 FES 曲线。可以发现:在 1 mm 晶圆半径情况下,由于半径小,离焦量较小,压电陶瓷物镜定位器能够对该频率下的离焦量及时响应,故 FES 值基本在 0 附近;14 mm 晶圆半

径处的离焦量大,压电陶瓷物镜定位器无法及时响应该幅度的离焦量变化,故 FES 值的波动范围较大。所用物镜的焦深为 600 nm,对应的 FES 值约为 ± 0.03 , FES 值超出这个范围的就属于没有达到锁焦要求,图 12(b)中的两条虚线分别代表 FES 值为 ± 0.03 。图 12(c)为根据检测到的不同半径处的 FES 值模拟的直径为 30 mm 的晶圆上的离焦量分布图,中间部分处于 600 nm 焦深范围内,三四象限各有一部分超出了焦深范围。

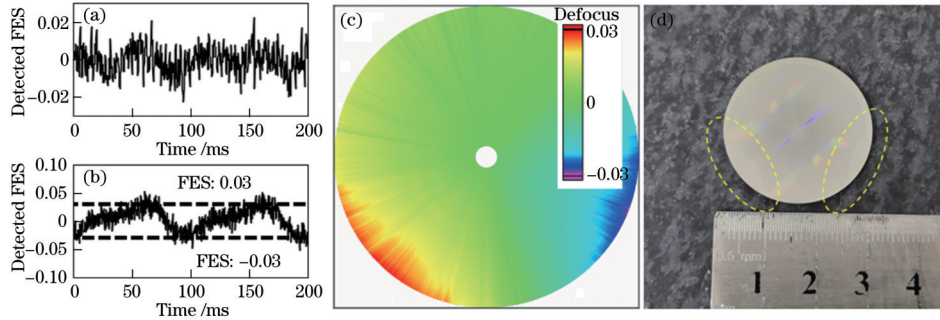


图 12 开启锁焦后检测到的晶圆表面 FES 值。(a) 1 mm 晶圆半径处的 FES 曲线;(b) 14 mm 晶圆半径处的 FES 曲线;(c) 晶圆表面离焦量分布二维图;(d) 相同刻写条件下实际刻写的晶圆样品

Fig. 12 FES value of wafer surface detected after turning on focus locking. (a) FES curve at 1 mm wafer radius; (b) FES curve at 14 mm wafer radius; (c) two-dimensional diagram of defocus distribution on wafer surface; (d) wafer sample engraved under same engraving conditions

获取了锁焦开启后的离焦量分布图后,在相同实验条件下开启激光器曝光了一个直径为 30 mm 的晶圆样品,图 12(d)为曝光样品的照片。照片上两个椭圆虚线框标记的部分是未能成功曝光的区域,这两个区域与图 12(c)的离焦区域基本吻合,其他区域均能正常曝光。这个结果说明通过检测样品表面的 FES 值能够较好地模拟样品的真实曝光情况。

4 压电陶瓷对非简谐信号的动态响应特点

4.1 压电陶瓷对一般信号的动态响应特性与其对正弦信号的动态响应特性间的关系

3.2 节的曝光结果表明该压电陶瓷物镜定位器对于晶圆上较大半径处的离焦量无法及时补偿,本节对此进行更深入的研究。

由 3.2 节的测试可知,旋转台表面的形貌特征信号如图 11(b)所示,将其记为 $G(n, t)$, n 表示旋转台工作时的转速, t 为时间。当锁焦算法执行时,锁焦控制器输出给压电陶瓷物镜定位器的信号为 $G(n, t)$ 的互补信号,记为 $F(t)$, $F(t)$ 的波形图如图 13(a)所示,图中仅展示了两个周期,当前转速为 4 r/s,纵坐标单位与 FES 相同,为无量纲单位。锁焦效果取决于压电陶瓷物镜定位器对这一信号的响应度,若锁焦开启后反馈的 FES 值处于焦深范围内,则可判断最终的曝光是比较均匀的。

首先,由于旋转台是匀速转动的,故 $F(t)$ 显然为周期信号,对其作傅里叶变换,幅频曲线和相频曲线分

别如图 13(b)和图 13(c)所示。从傅里叶变换的结果可以发现, $F(t)$ 主要由 5 个特征信号组成,记为 $f_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$, 5 个信号的幅度、频率和相位三者满足的关系为

$$\begin{bmatrix} A_1 & \omega_1 & \varphi_1 \\ A_2 & \omega_2 & \varphi_2 \\ A_3 & \omega_3 & \varphi_3 \\ A_4 & \omega_4 & \varphi_4 \\ A_5 & \omega_5 & \varphi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1 & 1 \\ 0.465 & 2 & 1 \\ 0.100 & 3 & 1 \\ 0.040 & 4 & 1 \\ 0.025 & 5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 63.33 \\ 0 & 0 & 110.27 \\ 0 & 0 & -55.39 \\ 0 & 0 & -90.42 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: A_1 表示第一分量 $f_1(t)$ 的幅度; φ_1 表示第一分量 $f_1(t)$ 的初始相位; ω_1 是第一分量 $f_1(t)$ 的圆频率,这是一个变量,与旋转台的转速有关。

根据测试到的压电陶瓷对这几个信号的响应情况,将该结果与压电陶瓷对 $F(t)$ 信号的响应结果作比较,得到两者之间的关系。根据 2.2 节的幅频响应特性和相频响应特性可将压电陶瓷物镜定位器对 $f_i(t)$ 的响应结果记为 $f_{i,R}(t)$, $f_{i,R}(t)$ 的表达式为

$$f_{i,R}(t) = A_R(A_i, \omega_i) \cos\{\omega_i [t + \tau(\omega_i)] + \varphi_i\}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (8)$$

式中: $A_R(A_i, \omega_i)$ 为压电陶瓷物镜定位器的幅度响应,

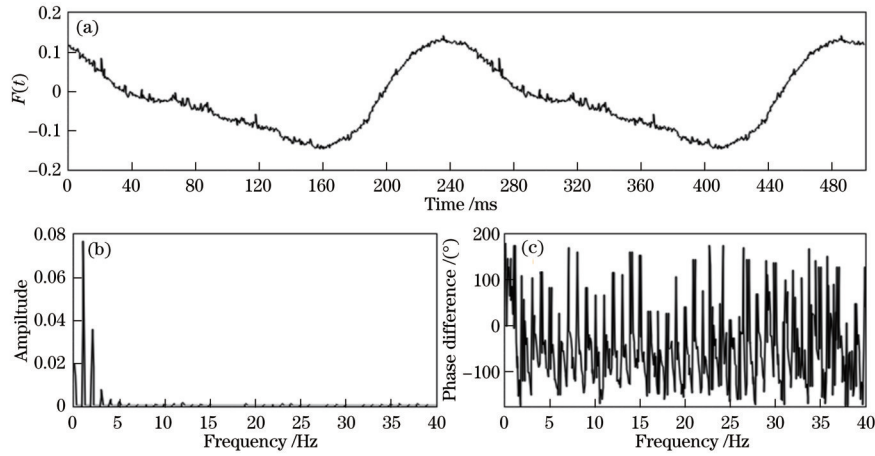


图 13 旋转台表面的形貌特征信号的互补信号及其幅频特性曲线和相频特性曲线。(a) 互补信号 $F(t)$; (b) $F(t)$ 的幅频特性曲线; (c) $F(t)$ 的相频特性曲线

Fig. 13 Complementary signal $F(t)$ of morphological characteristic signal of rotary table surface, and its amplitude-frequency characteristic curve and phase-frequency characteristic curve. (a) Complementary signal $F(t)$; (b) amplitude-frequency characteristic curve of $F(t)$; (c) phase-frequency characteristic curve of $F(t)$

由 2.2 节的结果可知, 压电陶瓷物镜定位器的动态输出位移幅度与输入信号的幅度和频率有关, 故将其表达为这样的形式, 图 7(c) 记录了该款压电陶瓷物镜定位器对不同幅度与频率的输入信号的幅度响应结果, $A_R(A_i, \omega_i)$ 的值可以通过搜索图 7(c) 构成的真值表来获得; $\tau(\omega_i)$ 代表压电陶瓷物镜定位器的相频响应特性, 由 2.2 节的测试可知, 该款压电陶瓷物镜定位器的相频响应特性表现为其对输入信号的滞后时间, $\tau(\omega_i)$ 的值与输入信号的频率有关, 可从图 7(e) 构成的真值表获得。

压电陶瓷物镜定位器对 $F(t)$ 信号的响应结果可以记为 $F_R(t)$, 锁焦算法执行后检测到的 FES 值可以记为 $V_{FES}(t)$, 显然 $V_{FES}(t) = F_R(t) + G(n, t)$ 。由 3.2 节的测试可知, $G(n, t)$ 为已知量, 而 $V_{FES}(t)$ 可以利用 FQD 检测出来, 故 $F_R(t)$ 可以通过 $V_{FES}(t) - G(n, t)$ 计算出来。

通过大量的测试, 本文找到了 $F_R(t)$ 与 $f_{i,R}(t)$ 之间的关系, 两者的关系表达式为

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^5 f_{i,R}(t), \quad \frac{5\omega_1}{2\pi} < 81 \text{ Hz}, \quad (9)$$

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^4 f_{i,R}(t) + \delta(t), \quad \frac{4\omega_1}{2\pi} < 81 \text{ Hz} < \frac{5\omega_1}{2\pi}, \quad (10)$$

其中: 式(9)表示当 $f_{i,R}(t)$ 中的最高频率分量的频率小于谐振频率时, $F_R(t)$ 基本等于 $f_{i,R}(t)$ 的各个分量之和; 式(10)表示当 $f_{i,R}(t)$ 中的谐振频率处于 ω_4 和 ω_5 之间时, $F_R(t)$ 的值可以表示为 $f_{i,R}(t)$ 的四个低频之和与一个误差量 $\delta(t)$ 的和, 这个误差量 $\delta(t)$ 是未知的, 该未知性体现在锁焦模块对高频的离焦量变化的响应是不确定的, 下面的刻写实验会展示这个不确定性。由于旋转台的最高转速有限, 故无法探索 $4\omega_1/(2\pi) < 81 \text{ Hz}$ 之外的 $F_R(t)$ 和 $f_{i,R}(t)$ 之间的关系。

4.2 压电陶瓷对一般信号的动态响应特性的均匀性曝光验证实验

下面通过样品的曝光结果对式(9)和式(10)进行验证。3.2 节中提到满足锁焦条件时的 FES 值处于 $-0.03 \sim 0.03$ 范围内, 结合式(9)可以求出满足锁焦要求的最大旋转台转速约为 6.35 r/s 。图 14(a) 展示了旋转台转速为 6 r/s 时的刻写情况, 刻写的图形为周期为 $1 \mu\text{m}$ 的螺旋线, 刻写区域为直径为 28 mm 的圆形区域, 样品表面呈现出了均匀的彩色衍射纹理。对样品上半径约为 14 mm 处的曝光区域进行光学显微镜标定分析, 其像素值均在 130 pixel 左右, 这个均匀度已经符合业内对曝光均匀性的要求, 也说明式(9)的理论计算结果与实际情况比较符合。图 14(b) 为旋转台转速为 17 r/s 时利用式(10)中的 $\sum_{i=1}^4 f_{i,R}(t)$ 与 $G(n, t)$ 的和来模拟的离焦量分布, 图上浅色区域表示满足条件 $|V_{FES}| \leq 0.03$, 深色区域表示超出焦深范围。之后, 按照旋转台转速为 17 r/s 的条件曝光了一片直径为 30 mm 的晶圆样品, 样品上刻写了周期为 $1 \mu\text{m}$ 的螺旋线图形, 刻写区域为直径为 28 mm 的圆形, 如图 14(c) 所示。虽然细节上有些差异, 但是图 14(c) 显示出的整体曝光情况与图 14(b) 模拟的结果比较接近, 说明利用 $f_{i,R}(t)$ 中的 4 个低频分量拟合的结果能够大体预测宏观上的曝光效果。然而, 图 14(c) 所示的样品中宏观上曝光均匀的区域在光学显微镜下却呈现出了如图 14(d) 所示的断断续续的线条。搜索该曝光均匀区域检测到的 FES 值, 发现 FES 值也呈现出随机变化的高频波动, 且波动量超出了焦深范围。由于这个现象的存在, 故在式(10)中加入了 $\delta(t)$ 这一未确定的误差量来表示这一现象。

在掌握了压电陶瓷物镜定位器的锁焦特性后, 在旋转台转速为 6 r/s 的条件下在直径为 30 mm 的晶圆上刻写了掩模版图形, 结果如图 15 所示。图 15(a) 为

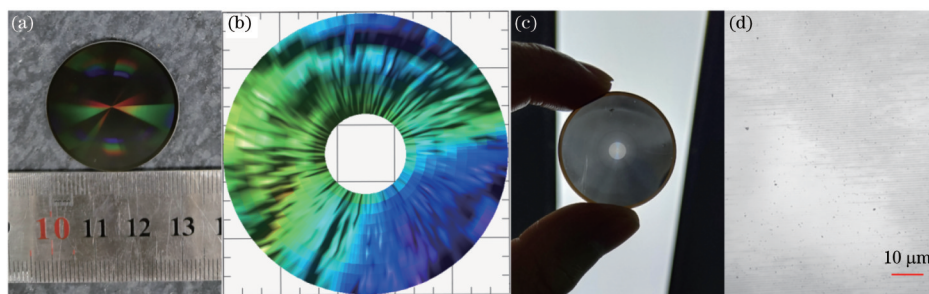


图 14 样品曝光均匀度测试。(a)旋转台转速为 6 r/s 时刻写的直径为 30 mm 的晶圆;(b)模拟的旋转台转速为 17 r/s 时刻写的离焦量分布;(c)旋转台转速为 17 r/s 时刻写的直径为 30 mm 晶圆;(d)图 14(c)中目测较均匀区域的显微镜照片

Fig. 14 Exposure uniformity test of sample. (a) 30 mm diameter wafer written at rotary table rotating speed of 6 r/s; (b) simulated defocus distribution during engraving when rotating speed of rotary table is 17 r/s; (c) 30 mm diameter wafer written at rotary table rotating speed of 17 r/s; (d) microscope photograph of uniform area in Fig. 14(c)

掩模版图形的原图,图 15(b)为刻有掩模版图形的直径为 30 mm 的样品的照片,图 15(c)为 50 倍放大倍率的显微镜拍摄的样品照片,图 15(d)为 100 倍放大倍率的显微镜拍摄的样品照片。从结果来看:在旋转台转速为 6 r/s 的条件下刻写的样品宏观上看起来比较均匀,没有明显的缺陷;在显微镜下的图形特征清晰可

辨,随机测试了部分直线的直线度,其直线度误差均在 0.1% 左右;通过显微镜图像标定法对掩模版上的“十”字标记点进行位置标定,标定位置与理论位置的误差均在 1 μm 以内。这一曝光实验也更进一步表明了本研究的意义。

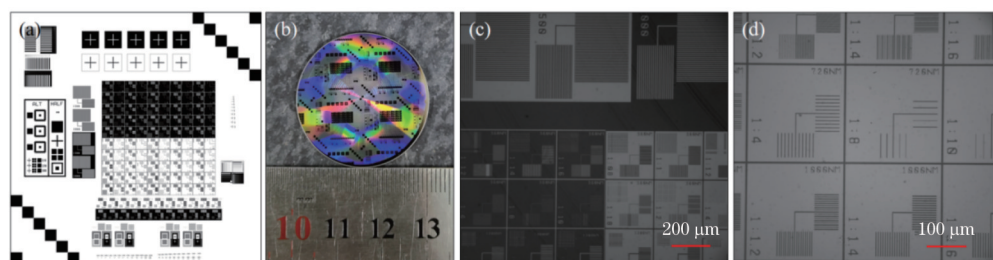


图 15 掩模版图形的刻写结果。(a)掩模版原图;(b)直径为 30 mm 的晶圆样品的照片;(c)用 50 倍放大倍率的显微镜拍摄的样品照片;(d)用 100 倍放大倍率的显微镜拍摄的样品照片

Fig. 15 Engraving results of mask graphics. (a) Original mask; (b) photo of 30 mm diameter wafer sample; (c) photograph of sample taken with microscope at 50 \times magnification; (d) photograph of sample taken with microscope at 100 \times magnification

4.3 压电陶瓷对非简谐信号的响应特性的应用

本文的研究结果有助于量化压电陶瓷的动态响应特性在极坐标光刻系统中的锁焦性能,也有助于针对性地改善压电陶瓷的动态响应特性。

在本文的研究结果出来之前,压电陶瓷的动态响应特性对光刻系统曝光均匀性的影响是模糊的。在使用极坐标光刻系统曝光时,只知道受到压电陶瓷动态响应性能的限制,旋转台的转速不能设置得太高。既能充分发挥压电陶瓷的锁焦能力,又能尽可能提高系统曝光效率的具体转速参数(在过去只能通过工艺研发测试出来)。工艺研发过程的成本较大,并且不同的极坐标光刻系统的具体参数不尽相同。本文的研究将旋转台转速这个参数量化到了 6.35 r/s,将抽象的压电陶瓷动态响应特性转换成了具体的极坐标光刻系统中的一个参数。这对于设计极坐标光刻系统的数据转换和数据传输有一定的帮助。

另一个重要的应用在于为改善压电陶瓷的动态响应性能指明了方向。在发现本文使用的压电陶瓷的锁焦能力不足之后,曾向压电陶瓷的生产商定制了动态

响应性能更好的压电陶瓷,使用改进后的压电陶瓷确实能在一定程度上改善锁焦性能,可以在满足曝光均匀性要求的前提下将旋转台的转速指标提高到约 9.2 r/s。通过本文的研究,认识到了本极坐标光刻系统中压电陶瓷的工作特点,向压电陶瓷厂商提供了更为精确的指标改进方向,令其针对离焦量补偿信号 $F(t)$ 中的特征简谐信号作优化,从而获得了更适合本光刻系统的压电陶瓷。使用该特殊优化的压电陶瓷能够满足旋转台转速约为 14.3 r/s 时的锁焦需求,大大提高了压电陶瓷的锁焦能力。

4.4 进一步提高压电陶瓷锁焦能力的展望

由本文的研究可知,压电陶瓷的锁焦性能主要受限于其对输入信号的幅度响应不充分。另外,通过对极坐标光刻系统旋转台的离焦量检测实验可以发现,在曝光过程中,离焦量的变化是比较固定的。这两个特点为进一步提高锁焦性能指明了探索方向。首先是压电陶瓷的幅度响应不充分问题,压电陶瓷的幅度响应与负载间是负相关的关系,负载越大,幅度响应性能越差。本文使用的物镜质量约为 120 g,比较简单的方

案是去除物镜外壳或选择更轻的物镜来减轻压电陶瓷的负载。相对复杂一点的方案为物镜本身是透镜组,其中一个或若干个透镜可以影响整个透镜组的焦距,将个别透镜固定在压电陶瓷上就可以通过压电陶瓷带动透镜的运动实现整个透镜焦点位置的变化,这也会大大降低压电陶瓷的负载。除了降低负载以外,也可以从压电陶瓷本身的特性来研究提高响应性能的方法。本文使用的压电陶瓷属于多层叠堆结构,可以通过改变相关机械参数(陶瓷片的直径、厚度等)来提高动态响应性能。

另一种提高锁焦性能的方法是对控制算法进行进一步优化。目前采用的 PID 反馈控制算法的修正量是滞后于探测到的离焦量的,控制器输出修正量的时间虽然可以忽略不计,但是压电陶瓷接收到的输出信号总是滞后于当前已经产生的离焦量,结合压电陶瓷本身幅度响应性能的不足,就会导致锁焦性能受限。通过本文的实验发现,曝光过程中产生的离焦量呈现出规律的周期性,利用这个特点可以研究对应的前馈控制方案,通过预测即将产生的离焦量提前向压电陶瓷控制器输入对应的修正量以实现锁焦性能的提高。

5 结 论

使用双柱面镜像法检测了压电陶瓷物镜定位器对不同幅度、不同频率的正弦输入信号的动态响应特性,包括幅频响应特性和相频响应特性。之后,在一套极坐标激光直写光刻系统中研究了压电陶瓷的动态响应特性对曝光均匀度的影响。在分析曝光不均匀原因的过程中,发现离焦量补偿信号呈现出规律的周期性。接着,探索了压电陶瓷对一般信号的动态响应特点,摸索出了压电陶瓷对一般信号 $F(t)$ 的动态响应特性和压电陶瓷对 $F(t)$ 中的特征信号 $f(A_i, \omega_i)$ 的动态响应特性这两者间的非线性关系,并通过样品曝光实验验证了该关系的正确性。利用该关系将压电陶瓷的动态特性对曝光均匀性的影响量化成了满足锁焦条件时的旋转台最高转速,所使用的压电陶瓷能够达到的最高转速约为 6.35 r/s。同时,利用该关系指导了压电陶瓷动态特性的针对性优化,优化过的压电陶瓷能够达到的最高转速为 14.3 r/s,相比 6.35 r/s 的指标性能提高了 125.2%。然而,在没有本研究作理论指导的情况下优化出的压电陶瓷能够满足锁焦条件的最高转速仅有 9.2 r/s,相比原结果只提高了 44.9%。因此,本研究在提高压电陶瓷在极坐标激光直写光刻中的锁焦能力方面有一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Wang Z W, Zheng J L, Chen G D, et al. Laser-assisted thermal exposure lithography: arbitrary feature sizes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(5): 2001468.
- [2] Zhang K, Wang Z W, Chen G D, et al. Laser heat-mode patterning with improved aspect-ratio[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 134: 106018.

- [3] Chen G D, Zheng J L, Wang Z W, et al. Fabrication of micro/nano multifunctional patterns on optical glass through chalcogenide heat-mode resist AgInSbTe[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867: 158988.
- [4] Meng Y, Behera J K, Wang Z W, et al. Nanostructure patterning of C-Sb₂Te₃ by maskless thermal lithography using femtosecond laser pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 508: 145228.
- [5] Stoica I, Barzic A I, Hulubei C. Fabrication of nanochannels on polyimide films using dynamic plowing lithography[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 426: 307-314.
- [6] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823018.
Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823018.
- [7] Chen X W, Chen L, Wang Y, et al. AgGeSbTe thin film as a negative heat-mode resist for dry lithography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 031601.
- [8] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2100001.
Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2100001.
- [9] Wang R, Wei J S, Fan Y T. Chalcogenide phase-change thin films used as grayscale photolithography materials[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4973-4984.
- [10] 莫之畅, 魏劲松, 曹清. 多层微图案成像特性的研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2011001.
Mo Z C, Wei J S, Cao Q. Study on imaging characteristics of multilayer micropatterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2011001.
- [11] Xia X, Jiang X G, Zeng J T, et al. Critical state to achieve a giant electric field-induced strain with a low hysteresis in relaxor piezoelectric ceramics[J]. *Journal of Materiomics*, 2021, 7(5): 1143-1152.
- [12] 胡志钢, 尹钦, 许姝菡. 压电陶瓷换能器收发系统幅频特性建模与分析验证[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 641-647.
Hu Z G, Yin Q, Xu S H. Analysis of an equivalent circuit model for the transducer transceiver system of piezoelectric ceramic transducer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(5): 641-647.
- [13] 王涛, 王晓东, 王立鼎. 压电陶瓷快速响应特性与应用研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(6): 785-789.
Wang T, Wang X D, Wang L D. Study on fast response characteristic and application of piezoceramics[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6): 785-789.
- [14] 崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(3): 270-275.
Cui Y G, Sun B Y, Dong W J, et al. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11

- (3): 270-275.
- [15] 秦铭泽, 胡源, 贺文俊, 等. 裂像镜在激光测距机离焦检测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 20200454.
Qin M Z, Hu Y, He W J, et al. Application of split-image mirror in defocus detection of laser rangefinder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 20200454.
- [16] 杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 829-832.
Yang X D, Shao J X, Liao S H, et al. Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 829-832.
- [17] 吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. 机电工程, 2003, 20(5): 89-91.
Wu J F, Wang W, Chen Z C. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2003, 20(5): 89-91.
- [18] 马磊, 钟兴旺, 刘玄, 等. 星间激光干涉仪测距技术发展现状与趋势[J]. 空间电子技术, 2018, 15(6): 1-6.
Ma L, Zhong X W, Liu X, et al. Development state of art and trends of inter-satellite laser interferometer ranging technology[J]. Space Electronic Technology, 2018, 15(6): 1-6.
- [19] 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804003.
Shan B H, Huo X Y, Liu Y. A stereovision measurement method using epipolar constraint to correct digital image correlation matching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804003.
- [20] Bai Z, Wei J S. Focusing error detection based on astigmatic method with a double cylindrical lens group[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 145-151.
- [21] Liu X, Chen G D, Zheng J L, et al. Auto-focusing of ultra-clean sample based on projection view method[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12057: 1205738.
- [22] Zheng J L, Liu X, Chen G D, et al. Defocusing detection based on asymmetric placement of dual-quadrant detector[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12057: 120572E.