

文章编号 1004-924X(2017)01-0001-07

干涉条纹相位锁定系统

鲁 森, 杨开明*, 朱 煜, 王磊杰, 张 鸣

(清华大学 机械工程系 摩擦学国家重点实验室 &
精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要:干涉曝光系统中干涉条纹的相位漂移会导致曝光对比度降低, 为了有效抑制相位漂移, 利用声光调制器对干涉光频率进行实时调制。分析了条纹漂移的特点, 指出了主要干扰源是 0~5 Hz 的空气扰动。应用数值分析法得到了条纹漂移量与曝光对比度的关系曲线, 并以此为依据提出了条纹锁定精度的目标值。针对所要达到的锁定精度, 给出了系统硬件的选型方法, 搭建了基于 RTX 的干涉条纹相位锁定系统。利用闭环辨识的方法得到了系统的参数模型, 完成了反馈控制器的设计, 最终实现了实时锁定条纹相位的功能。实验结果表明, 在 400 Hz 的控制频率下, 干涉锁定系统能够有效抑制 0~5 Hz 的低频扰动, 干涉条纹相位漂移的 3σ 值可以控制在 ± 0.04 个条纹周期内, 满足干涉光刻的曝光对比度要求。

关键词:干涉曝光; 相位锁定; 曝光对比度; 声光调制器; RTX

中图分类号: O436.1; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0001

Interference fringe phase locking system

LU Sen, YANG Kai-ming*, ZHU Yu, WANG Lei-jie, ZHANG Ming

(State Key Laboratory of Tribology & Beijing Key Lab of Precision/
Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control,
Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
* Corresponding author, E-mail: yangkm@tsinghua.edu.cn

Abstract: The phase drift leads to low exposure contrast in interference lithography system. In order to effectively suppress the phase drift of interference fringe, an Acousto-Optic Modulator (AOM) was employed to modulate the frequency of interference beam in real time. The characteristic of phase drift was analyzed, indicating that the main disturbance came from air turbulence with frequency within 0~5 Hz. The relationship between phase drift and exposure contrast was deduced by numerical analysis, and the target phase accuracy of fringe locking system was submitted. In terms of the target accuracy, the experiment devices were picked and the experiment system based on RTX was prepared. Finally the parameter model of system was established by closed-loop identification and a feedback controller was designed, thus realizing the fringe locking function. The experiment results indicated that the low-frequency disturbance ranging from 0 to 5 Hz is suppressed efficiently by the proposed fringe locking system under the control frequency of 400 Hz. The 3σ value of phase drift is within ± 0.04 period, which satisfies the exposure contrast requirements of interference lithography.

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-11-01.

基金项目: 清华大学摩擦学国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLT12C01)

Key words: interference lithography; phase lock; exposure contrast; Acousto-Optic Modulator (AOM); RTX

1 引言

在干涉曝光系统中,由于地面振动、空气扰动等外界环境扰动,干涉条纹的相位会发生漂移,造成曝光对比度降低,进而影响最终的曝光效果^[1]。通过提高光学平台的隔振性能和减少空气扰动等方法可以减少干涉条纹的相位漂移^[2],但这类方法的成本较高。通过对条纹相位进行实时反馈控制,同样可以达到条纹相位锁定的效果^[3-4]。

常见的条纹锁定系统采用压电陶瓷作为执行器件,但压电陶瓷存在响应慢、调节范围有限等问题。声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)具有 100 ns 的响应时间和无限大的调节范围,是理想的条纹锁定执行器。Heilmann 等首次提出使用 AOM 调整干涉条纹相位的方法,并得到很高的相位控制精度^[5]。但其所使用的外差测量方法存在光路复杂、激光能量利用率低等问题^[6]。

为实现所需的条纹相位锁定精度,锁定系统必须在实时环境下运行。Konkola 等基于 VME (Versa Module Eurocard)开发了扫描干涉光刻系统,其锁定精度达到纳米级^[7]。宋莹等基于 PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)实时系统开发了全息曝光系统,其锁定精度达到 ± 0.02 个条纹周期^[8]。以上系统均使用上位机与下位机分离的系统架构,存在结构复杂、开发周期长等问题。RTX (Real-Time eXtension)是基于 Windows 平台的实时扩展系统,可以在一台硬件上同时实现实时和非实时的功能,并且利用 Windows 丰富的程序接口,可以大大提高开发效率。

本文在实时环境下建造了干涉条纹的相位锁定控制系统,使用 AOM 作为执行器件,同时采用零差测量方案,有效解决了光路和能量利用率低的问题。对 RTX 的工作原理进行了介绍,并完成了 RTX 下实时任务的程序设计。利用闭环辨识的方法得到了条纹锁定控制系统被控对象的参数模型,并针对该模型完成了反馈控制器的设计。最后通过实验验证了该系统抑制干涉条纹相位漂移的有效性。

2 工作原理

图 1 为本文研究的干涉曝光系统。激光器射出束紫外激光,经过一块非偏振分束镜后分成两束。两束激光分别通过两个声光调制器 AOM₁ 和 AOM₂,在布拉格衍射条件下,出射的两束-1 级衍射光光强达到最大值。用挡光板挡住出射的 0 级光,两路-1 级衍射光经过反光镜反射后,分别被两个非偏振分光镜分为两路。两束透射光在基底上形成干涉条纹图案,同时两束反射光合光后在光电探测元件表面形成干涉。光电探测器检测到的干涉信号的光强变化对应基底上干涉条纹的相位漂移。光电探测器将干涉光强转化为电压信号送入数据采集卡中,相位锁定控制器对采集的电压信号与参考电压信号进行比较,并将计算生成的频率值通过高速串口输入到频率合成器中,在 RTX 实时系统下将电压值锁定为一个固定值,从而实现对干涉条纹相位的锁定功能。

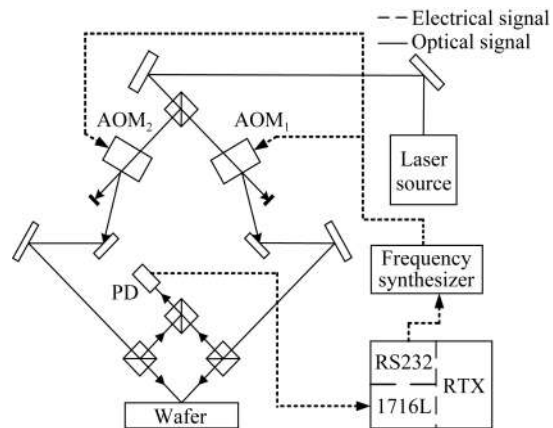


图 1 干涉曝光及相位锁定系统

Fig. 1 Interference lithography and phase locking system

3 条纹漂移对曝光对比度的影响

3.1 条纹漂移信号特性分析

光电探测器测量到的电压信号可表示为:

$$U(t) = U_d + U_a \sin \varphi(t), \quad (1)$$

式中 $\varphi(t)$ 表示两路干涉光的相位差,它随外界环

境的干扰变化。图 2 为 50 s 内系统采集的电压信号 $U(t)$, 采样周期为 200 ms。从图 2 可以看出: 开环情形下, 条纹相位呈漂移状态, 电压信号在 3.5~5 V 变化, 对应的条纹漂移 3σ 值为 0.3529λ , λ 为干涉条纹周期。

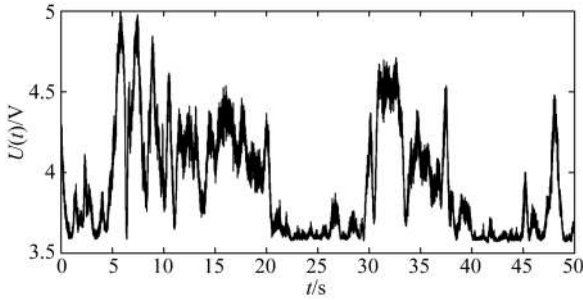


图 2 条纹漂移时 $U(t)$ 的变化

Fig. 2 Variation of $U(t)$ with fringe drift

为得到条纹漂移规律, 对上述电压信号做幅值谱密度 (Amplitude Spectral Density, ASD) 分析, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 80~150 Hz 仅存在幅值很小的高频扰动, 其影响在当前需求下可以忽略, 本文主要研究 0~5 Hz 的低频扰动对干涉曝光的影响以及如何消除这些影响。本文在配置主动隔振的光学平台上进行实验, 可有效避免地面振动带来的干扰, 因此可以推断条纹漂移的主要原因是空气扰动。

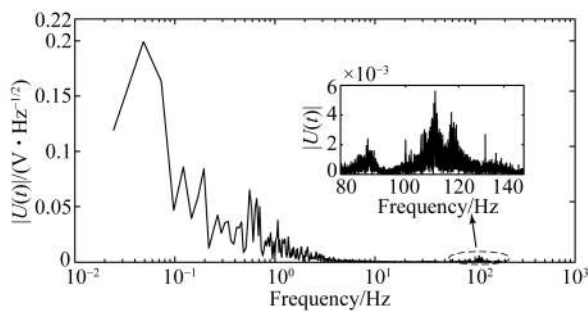


图 3 条纹漂移时 $U(t)$ 的幅值谱密度

Fig. 3 Amplitude spectral density of $U(t)$ with fringe drift

3.2 条纹漂移与曝光对比度的关系

假定在 x - y 平面的干涉曝光场中, 垂直于条纹方向为 x 轴, 条纹方向为 y 轴, 那么沿 x 轴方向的光强分布可表示为:

$$I(x, t) = B + A \sin\left(\frac{2\pi}{p}x + \varphi_e(t)\right), \quad (2)$$

式中: B 为背景光强, A 为光强振幅, $\varphi_e(t)$ 为由外界扰动引起的相位变化。

曝光量 $D(x)$ 为光强对时间的积分:

$$D(x) = \int_0^T I(x, t) dt = B_D + A_D \sin\left(\frac{2\pi}{p}x + \Phi(x)\right), \quad (3)$$

其中:

$$B_D = B \cdot T,$$

$$A_D = A \cdot \sqrt{\left(\int_0^T \cos \varphi_e(t) dt\right)^2 + \left(\int_0^T \sin \varphi_e(t) dt\right)^2},$$

$$\tan \Phi(x) = \frac{\int_0^T \sin \varphi_e(t) dt}{\int_0^T \cos \varphi_e(t) dt},$$

式中: T 为曝光时间, B_D 为平均曝光量, A_D 为曝光量振幅, $\Phi(x)$ 为曝光量的相位误差。

曝光对比度定义为 A_D 与 B_D 的比值, 即:

$$\gamma = \frac{A_D}{B_D} =$$

$$\frac{A}{B} \cdot \frac{\sqrt{\left(\int_0^T \cos \varphi_e(t) dt\right)^2 + \left(\int_0^T \sin \varphi_e(t) dt\right)^2}}{T}, \quad (4)$$

式中: A/B 为光强对比度, 其理想值为 1。文献 [9] 给出了 $\varphi_e(t)$ 为某个特定频率的正弦漂移时, 光强对比度与曝光对比度的关系, 但没有研究包含多个频率成分的 $\varphi_e(t)$ 对曝光对比度的影响。

包含 0~5 Hz 多种频率的正弦漂移, 即 $\varphi_e(t) = \Phi \times [\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) + \dots + \sin(2\pi f_n t)]$, 其中 Φ 为偏移幅值, $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ 为漂移频率。本文使用 Matlab 中 idinput 函数生成的 0~5 Hz 组合正弦信号作为 $\varphi_e(t)$, 将 $\varphi_e(t)$ 代入式 (4) 中, 在曝光时间 $t=10$ s 的情况下得到 $\varphi_e(t)$ 与曝光对比度 γ 的关系, 如图 4 所示。从图 4 中的关系曲线得到, 当 $\varphi_e(t)$ 的 σ 值小于 0.05λ 时, 曝光对比度大于 95%。

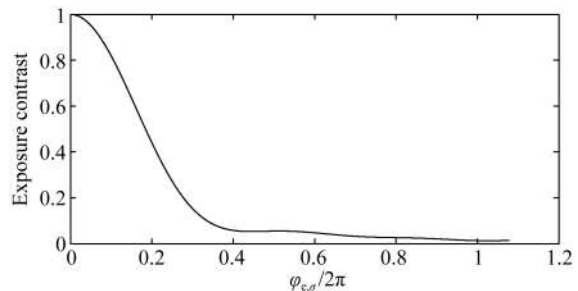


图 4 条纹漂移相位与曝光对比度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between drifted phase and exposure contrast

4 相位锁定系统设计与实现

4.1 系统硬件架构

根据上节得到的条纹漂移指标,本节对条纹锁定系统中的器件进行选型,完成了系统硬件架构的搭建。

为了得到光栅周期为 200 nm 的光栅,干涉光波长必须小于等于 400 nm。干涉曝光得到的光栅周期与干涉光波长和入射角度的数学关系为:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,最小光栅周期为干涉光波长的 1/2。本文选用 Cobolt 公司的 Zouk 型激光器,其出射光波长为 355 nm,出射光功率达 20 mW。在温度变化 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,8 h 内激光功率的变化不超过 2%,长期稳定性较好,满足干涉曝光系统的要求。

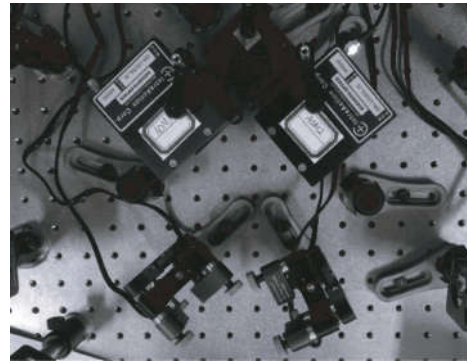
AOM 具有极快的响应速度和无限大的相位调节范围,选用 AOM 作为执行器件,可以满足条纹锁定的快速性和高带宽需求。本文采用 IntraAction 公司的 AOM(型号为 SDM-1052B8.35),其中心频率为 105 MHz;采用与 AOM 配套的频率合成器(型号为 MFE-1054C32-2),其调频为 75~125 MHz,射频信号功率为 0~4 W,频率分辨率为 10 Hz。

根据相位与频率的对应关系:

$$\Phi = 2\pi \int f dt. \quad (6)$$

当控制周期为 2.5 ms 时,系统的相位调整分辨率可达到 0.157 rad。频率合成器共有 3 个输出端,输出端共用一个晶振信号,避免了两路干涉光初始频率不一致的问题。通过频率合成器提供的 RS232 接口实时改变频率值,从而实现干涉条纹相位锁定功能。

根据文献[10]的分析,要达到 $\pm 0.05 \lambda$ 的相位锁定精度,数据采集卡的 A/D 转换位数必须 ≥ 12 bit。为了尽量减小量化误差的影响,本文选用研华 1716L 板卡实现数据采集功能,其测量电压为 0~5 V, A/D 转换位数为 16 bit,理论上相位读取分辨率可以达到 0.000 025 rad。



(a) 声光调制器

(a) Acousto-Optic Modulator(AOM)



(b) 频率合成器

(b) Frequency synthesizer

图 5 相位调节装置

Fig. 5 Phase shift devices

为了得到足够的响应带宽和良好的干涉测量信号,光电探测器需要在激光波长处同时具有较高的响应度和超高的信噪比。本文选用 Thorlab 公司的 PDB440A 型光电探测器作为光强检测器件,它在 355 nm 波长处具有较高的响应度,测量带宽能够达到 15 MHz,同时具有较高的放大倍数和极低的电路噪声。

4.2 系统软件架构

Windows 系统作为一款通用操作系统,具备丰富的 Win32 应用程序接口,支持多种开发工具,但其定时精度低,实时性不足。RTX 是 Ardence 公司开发的一种基于 Windows 平台的实时扩展系统,它用于增强 Windows 系统的实时性能,具有很强的可扩展性和稳定性。

RTX 对 Windows 硬件抽象层(Hardware Abstraction Layer, HAL)进行了扩展和修改,并在 Windows 平台上提供一个实时子系统(Real Time Sub-System, RTSS),同时提供了

RtWinAPI 接口函数,可以被 Win32 环境和 RTSS 环境调用,其工作原理如图 6 所示。

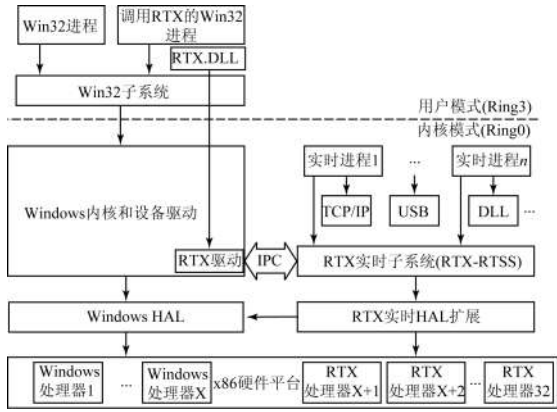


图 6 RTX 工作原理
Fig. 6 Working principle of RTX

根据条纹相位锁定系统中任务的性质,将所有任务分为实时任务和非实时任务。其中,实时任务包括数据采集、A/D 转换、控制量的计算和输出;非实时任务包括数据显示、PID 控制器参数设置以及各种开关量的设置。

实时任务和非实时任务之间的同步和数据交换通过 IPC(Inter Process Communication)实现,其原理如图 7 所示。

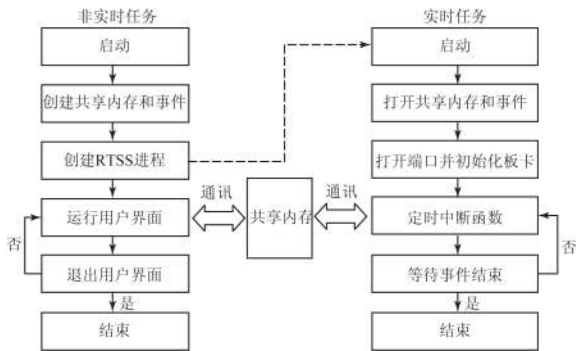


图 7 实时任务和非实时任务的程序运行流程图
Fig. 7 Flowchart of program execution of real-time and non-real time tasks

为了能够在条纹锁定程序运行过程中观察条纹的漂移情况,以及在线修改控制参数,使用 Labview 软件完成了人机交互界面的设计,如图 8 所示。

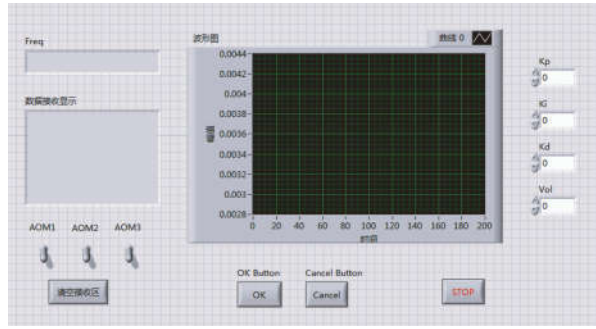


图 8 人机交互界面
Fig. 8 Human-computer interface

4.3 系统建模及控制器设计

本文建立的条纹锁定系统框图如图 9 所示。其中, $C(s)$ 表示 PID 控制器, $A(s)$ 表示频率与相位的关 系, $N(s)$ 表示电压与相位差的关系。由式 (6) 可知:

$$A(s) = \frac{2\pi}{s} \tag{7}$$

在 2.1 节中式(1)给出了光电探测器测量到的电压 $U(t)$ 与相位差 $\varphi(t) = \varphi_r(t) - \varphi_e(t)$ 之间的关系,在闭环控制的条件下, $\varphi(t)$ 在小范围内变化,此时可以认为 $\varphi(t)$ 与 $U(t)$ 呈线性关系,如图 10 所示。

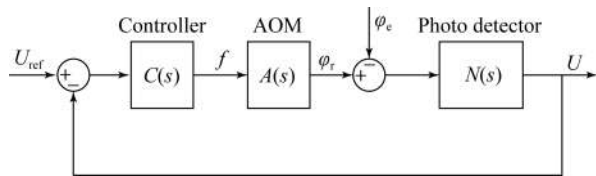


图 9 闭环控制系统框图
Fig. 9 Block diagram of closed-loop control system

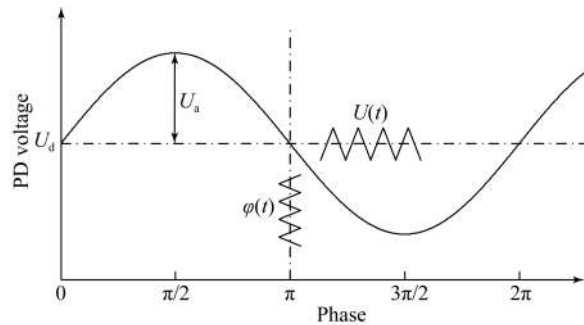


图 10 光电探测器电压与条纹相位的关系曲线
Fig. 10 Relationship between fringe phase and PD voltage

在闭环条件下对被控对象进行辨识,被控对象为:

$$P(s) = A(s) \cdot N(s), \quad (8)$$

从而得到可用于控制器设计的传递函数形式。图 11 为闭环辨识过程的原理框图^[11],利用控制器 $C(s)$ 对被控对象 $P(s)$ 进行闭环控制,外加激励信号 r 施加于系统输入端,同时记录系统的输入信号 f 和输出信号 U ,通过频谱估计获得两个开环中间模型,分别为:

$$\hat{P}_{Ur}(e^{j\omega}) = \frac{\hat{\Phi}_{Ur}}{\hat{\Phi}_r}, \quad (9)$$

$$\hat{P}_{fr}(e^{j\omega}) = \frac{\hat{\Phi}_{fr}}{\hat{\Phi}_r}. \quad (10)$$

从而被控对象 $P(s)$ 的开环模型的无偏估计为:

$$\hat{P}(e^{j\omega}) = \frac{\hat{P}_{Ur}(e^{j\omega})}{\hat{P}_{fr}(e^{j\omega})}. \quad (11)$$

由此获得被控对象的非参数频响模型,最终通过参数拟合法将该模型转化为参数模型,得到:

$$P(s) = \frac{0.00512s^2 - 9.784s + 4.550}{s^2 + 800s}. \quad (12)$$

应用经典的反馈控制器设计方法,根据 Ziegler-Nichols 设计准则^[12],得到一组 PID 控制器参数,并在实际锁定过程中对所得到的 PID 参数进行适当调整,从而得到最优的锁定结果。

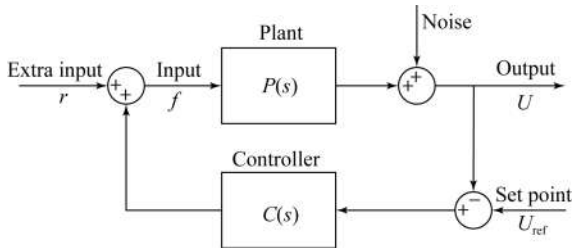


图 11 闭环模型辨识原理框图

Fig. 11 Block diagram of closed-loop identification

5 实验分析

设定控制频率为 400 Hz,参考电压为 4.436 V,目标相位为 π 。以光电探测器采集到的电压值为反馈信号,与参考电压进行比较,根据差值 PID 控制器计算出所需的移频值,输出到频率合成器中。通过频率合成器实时调整声光调制器的移频量,使光电探测器采集到的电压保持恒定。

图 12 为闭环条件下 50 s 内锁定的数据。从图中可以看出,电压在均值 4.4 V 附近小范围波

动,条纹相位被锁定。通过计算可知,闭环情形下,电压误差的 σ 值为 0.076 4 V,对应条纹漂移的 σ 值为 0.007 λ ;电压误差的 3σ 值为 0.229 3 V,所对应的相位变化为 0.256 2 rad,约为 0.04 λ ,满足 3.2 节中给出的曝光对比度要求。

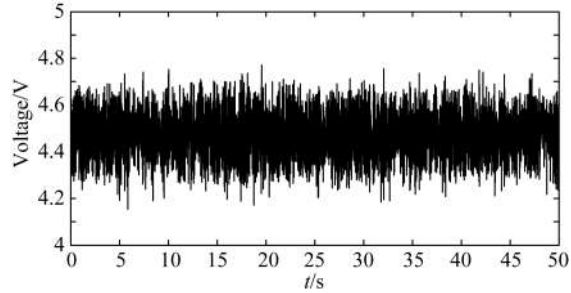


图 12 闭环情形下条纹的锁定情况

Fig. 12 Fringe locking with feedback control

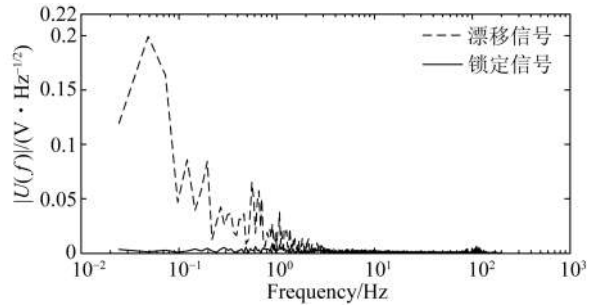


图 13 开环和闭环条件下 $U(t)$ 幅值谱密度的比较

Fig. 13 ASD of $U(t)$ with feedback control on and off

在图 13 中对条纹漂移数据和条纹锁定数据的 ASD 幅值谱密度曲线进行对比。从图中可以看出,条纹锁定系统对 0~5 Hz 的低频扰动有很好的抑制效果,然而受限于当前有限的系统带宽,条纹锁定系统对 80~150 Hz 的扰动没有明显效果。通过提高频率合成器的频率分辨率和减小控制周期等方法,可以得到更好的锁定效果。

6 结论

本文设计了一种实时锁定干涉条纹的反馈控制系统,用于满足干涉光刻系统对曝光对比度的需求。通过 AOM 对干涉光的实时移频作用,实现了锁定干涉条纹相位的目标。实验结果表明,在 400 Hz 的控制频率下,干涉条纹相位漂移的 3σ 值在 0.04 个条纹周期内,满足干涉光刻的曝光对比度需求。未来可采用带有高速数字接口的频率合成器实现更高的频率分辨率和更快的数据传递速率,从而进一步提高锁定精度。

参考文献:

- [1] SCHATTENBURG M L, CHANG C H, HEILMANN R K, *et al.*. Advanced interference lithography for nanomanufacturing [C]. *Proceedings of the International Symposium on Nanomanufacturing (ISNM 2006)*, 2006(Paper# 44).
- [2] WOLFEREN H V, ABELMANN L. *Laser Interference Lithography*, in *Lithography: Principles, Processes and Materials* [M]. New York: Nova Science Publishers, 2011.
- [3] YOUNG P P, PRIAMBODO P S, MALDONADO T A, *et al.*. Simple interferometric fringe stabilization by charge-coupled-device-based feedback control [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (19): 4563-4566.
- [4] HAEFNER M, PRUSS C, OSTEN W. Laser direct writing of rotationally symmetric high-resolution structures [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (31): 5983-5989.
- [5] HEILMANN R K, KONKOLA P T, CHEN C G, *et al.*. Digital heterodyne interference fringe control system [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2001, 19(6): 2342-2346.
- [6] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 扫描干涉光刻机相位锁定系统设计[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2015 (7): 722-727.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Design of phase locking system for an interference lithography scanner [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2015, 55(7):722-727. (in Chinese)
- [7] KONKOLA P T. *Design and Analysis of a Scanning Beam Interference Lithography System for Patterning Gratings with Nanometer-level Distortions* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [8] 宋莹. 全息光栅曝光系统干涉条纹静态及动态相位锁定技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
SONG Y. *Research on the Interference Fringe Static and Dynamic Phase-locking Technology in the Lithography System of the Holographic Grating* [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Science, 2005. (in Chinese)
- [9] 钱国林, 李朝明, 殷庆琰, 等. 全息曝光条纹锁定系统特性研究[J]. *激光技术*, 2008, 32 (6): 648-650.
QIAN G L, LI CH M, YIN Q Y, *et al.*. Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (6):648-654. (in Chinese)
- [10] 宋莹, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 移频式全息光栅曝光条纹干涉锁定系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2):318-324.
SONG Y, BAYANHESHIG, QI X D, *et al.*. Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 318-324. (in Chinese)
- [11] FORSSELL U. *Closed-loop Identification: Methods, Theory, and Applications* [D]. Sweden: Linköping University, 1999.
- [12] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *Trans. ASME*, 1942, 64(11): 759-768.

作者简介:



鲁森(1987—),男,江苏泰州人,博士研究生,2010年、2013年于东南大学分别获得学士和硕士学位,主要研究方向为扫描干涉光刻系统设计等。E-mail: lus13@mails. tsinghua. edu. cn

通讯作者:



杨开明(1970—),男,云南楚雄人,助理研究员,1992年、1998年于郑州大学分别获得学士和硕士学位,2005年于清华大学获得博士学位,主要研究方向为超精密工件台的运动控制技术。E-mail: yangkm@tsinghua. edu. cn

导师简介:



朱煜(1965—),男,江苏兴化人,教授,博士生导师,1983年于北京师范大学获得学士学位,1993年、2001年于中国矿业大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为面向IC制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量、超精密运动控制等。E-mail: zhuyu@tsinghua. edu. cn