

文章编号 1004-924X(2014)02-0318-07

# 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计

宋莹<sup>1,2\*</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 齐向东<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 唐玉国<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**建立了移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统以提高全息光栅槽型对比度并降低由外部环境造成的曝光干涉条纹相位移动。根据系统的组成原理,分析了相位测量系统中莫尔条纹的产生条件及其与干涉条纹相位变化的关系,给出了探测器的选择方法。根据系统精度要求计算了 A/D 转换位数,自行设计了数字控制系统。提出采用光束移频方法来调整条纹相位,应用声光调制器对干涉条纹移动进行实时校正。实验结果表明,该系统采样频率可以达到 5 kHz,对干涉条纹漂移和 10 Hz 以下的低频振动都有较好的抑制作用,相位变化  $3\sigma$  值小于 0.12 rad,即相位变化小于  $\pm 0.02$  个干涉条纹周期。该系统可以实时有效地锁定曝光干涉条纹,较好地满足全息曝光的要求。

**关键词:**全息光栅;曝光;莫尔条纹;相位锁定;声光调制器

**中图分类号:** O436.1; O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0318

## Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure

SONG Ying<sup>1,2\*</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, QI Xiang-dong<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, TANG Yu-guo<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: songyingtec@126.com*

**Abstract:** A frequency-shift interference fringe locking system was established to enhance the contrast of holographic grating profile and to decrease the phase shift of exposure interference fringe caused by the external environment. According to the composition and the working principle of the system, the moiré pattern occurrence condition in the measuring system and its dependence on the phase change of interference fringe were analyzed and the selection method for photodetectors was given. On the basis of the system accuracy, the digital control system was self-designed including A/D conversion digit. A optical frequency shifting method was used to regulate the fringe phase, and an acousto-optic modulator was taken to correct the frequency shifter of the interference fringe movement in real time. The experimental results illustrate that the system can offer a sampling frequency of 5 kHz and can restrain the interference fringe drift and low-frequency moving below 10 Hz. The  $3\sigma$  value of the phase shift is

收稿日期:2013-10-10;修订日期:2013-11-21.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AA1221091001);国家重大科研装备研制资助项目(No. ZBYZ2008-1);中国科学院知识创新工程资助项目(No. 100132H100);国家重大科学仪器设备开发专项资金资助(No. 2011YQ120023)

below 0.12 rad, which means its phase is within  $\pm 0.02$  interference fringe period. The system can lock the phase of the exposure interference fringe effectively in real time, and can satisfy the requirements of the holographic grating lithography better.

**Key words:** holographic grating; exposure; Moiré pattern; phase lock; Acoustic Optical Modulator (AOM)

## 1 引言

全息光栅的曝光过程是全息光栅制作过程中重要的工艺环节之一。在全息光栅的曝光过程中,通过两束相干光干涉获取曝光干涉条纹,将此干涉条纹照射在涂有光刻胶的光栅基底上,光刻胶记录干涉条纹即可获得全息光栅掩模,合格的全息光栅掩模是后续工艺的基础,直接决定能否获得合格的全息光栅<sup>[1-3]</sup>。

在全息光栅的曝光过程中,光学平台和光学器件的振动、空气流动、温度波动等因素会导致干涉条纹相对于光栅基底发生相位移动,造成光栅槽型的对比度下降,若相位漂移量过大,光刻胶上将不会得到任何光栅槽型<sup>[4]</sup>。为克服全息光栅曝光过程中由于外界环境等引起的条纹移动,通常采取被动和主动方法进行抑制。被动方法是指保证全息曝光光路具有良好的外部环境,包括采用隔振光学平台、封闭曝光光路减少气流流动、保持温度恒定等<sup>[5]</sup>。随着自动控制技术的发展,逐步引入了主动控制方式。主动控制方式通常是指通过光电探测元件(如 CCD)探测干涉条纹的相位移动,通过放置在光路中的压电陶瓷反射镜控制两束干涉光中的一束相干光束的光程,使干涉条纹相对光栅基底的相位恒定<sup>[6-8]</sup>。该方法具有对原曝光光路改动小、成本低等优点,但同时具有以下两点局限:(1)压电陶瓷调节速度相对较慢;(2)调节的相位范围有限<sup>[9]</sup>。鉴于此,本文设计了一种应用于全息曝光光路的移频式干涉条纹锁定系统,具体分析了采用测量光栅产生莫尔条纹的条件及其与干涉条纹的相位关系,给出了光电探测器的选择方法;完成了数字控制系统构建;提出了采用声光调制器件,通过调整曝光光束频率的移频方式来校正干涉条纹的移动,获得更快的调整速度和无限周期的相位调整范围。实验证明系统可以实时、有效、高精度地实现全息曝光干涉条纹的锁定。

## 2 系统构成与工作原理

该全息曝光干涉条纹锁定系统由基于莫尔条纹的相位测量系统、控制器、基于声光调制器(Acousto-optic Modulator, AOM)的移频式条纹相位调整系统几部分组成,系统组成如图1所示。

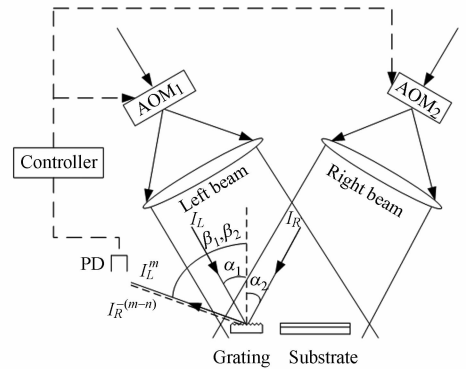


图1 干涉条纹锁定系统

Fig. 1 Interference fringe locking system

### 2.1 基于莫尔条纹的相位测量原理

在全息曝光光路中,左右两束曝光光束交汇处会形成干涉条纹,干涉条纹的周期较小,难以通过光电探测器直接探测其相位变化,这里采用间接测量的方法。在干涉曝光场的区域放置一块测量光栅,在满足一定条件下,两束曝光光束经过测量光栅衍射后会形成莫尔条纹<sup>[10]</sup>。

设测量光栅的光栅周期为  $d_0$ , 曝光干涉条纹的周期为  $d_1$ 。左右两束相干光束分别为  $I_L$  和  $I_R$ ,  $I_L$  传播方向与光栅法线的夹角为  $\alpha_1$ ,  $I_R$  传播方向与光栅法线的夹角为  $\alpha_2$ ,  $I_L$  和  $I_R$  的衍射角分别为  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ , 如图1所示, 图中  $\beta_1 < 0$ 。

根据光栅方程, 左侧光束的  $m$  级衍射角为:

$$\sin \beta_1 = \sin \alpha_1 + \frac{m\lambda}{d_0}. \quad (1)$$

右侧光束的  $-(m-n)$  级衍射角为:

$$\sin \beta_2 = \sin \alpha_2 + \frac{-(m-n)\lambda}{d_0}. \quad (2)$$

当左右两束衍射光重合时, 满足:

$$\sin \beta_1 = -\sin \beta_2. \quad (3)$$

曝光干涉条纹的周期为:

$$d_1 = \frac{\lambda}{(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)}. \quad (4)$$

根据式(1)~(4)可得, 若要获得莫尔条纹, 需要满足:

$$d_0 = |n|d_1. \quad (5)$$

即基准光栅的周期应为干涉条纹周期的整数倍。

在光栅  $x$  方向, 莫尔条纹具有与干涉条纹相同的相位变化, 左侧光束  $m$  级衍射光波矢在  $x$  方向的投影为:

$$k_{xl}^m = k \sin \alpha_1 + \frac{2m\pi}{d_0}. \quad (6)$$

右侧光束  $-(m-n)$  级衍射光波矢在  $x$  方向的投影为:

$$k_{xr}^{-(m-n)} = k \sin \alpha_2 - \frac{2(m-n)\pi}{d_0}. \quad (7)$$

根据式(4)、(6)和(7), 莫尔条纹的相位为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= (k_{xl}^m + k_{xr}^{-(m-n)})x = \frac{2\pi x}{d_1} + \frac{2\pi x n}{d_0} = \\ &\theta(x) + \frac{2\pi x n}{d_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $\theta(x)$  为曝光干涉条纹的相位, 可见莫尔条纹与干涉条纹的相位具有相同的变化关系, 而莫尔条纹周期远大于干涉条纹周期, 并可根据需要进行调整, 因此可以通过探测莫尔条纹的相位变化来获取干涉条纹的相位变化。

## 2.2 探测器选择方法

为了提高系统的响应带宽, 光电探测器 (Photodetector, PD) 采用 PIN 二极管或雪崩二极管 APD, 光电二极管的响应波段应在激光器波长处具有较高的响应度。

建立 X-Y 坐标系, X 轴方向与莫尔条纹垂直, 设光电二极管有效感光区域为矩形,  $x$  方向宽度为  $a$ ,  $y$  方向长度为  $b$ , 如图 2 所示。则莫尔条纹的光强为:

$$I(x, y) = I_1 + I_2 \cos \varphi(x) = I_1 + I_2 \cos\left(\frac{2\pi x}{D}\right), \quad (9)$$

式中:  $I(x, y)$  为莫尔条纹在  $(x, y)$  处的光强,  $I_1$  为莫尔条纹光强平均值,  $I_2$  为光强空间变化的幅值,  $D$  为莫尔条纹的周期。

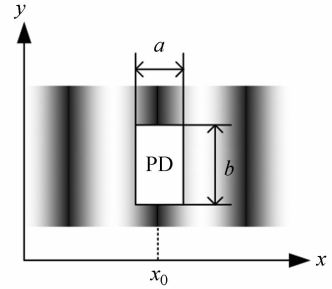


图 2 光电二极管与莫尔条纹参考坐标系

Fig. 2 Photodiode and reference frame of moiré fringe

光电二极管输出电信号与有效探测面积内的光功率成正比, 当  $a = D/2$  时, 灵敏值最高, 应尽量满足此条件。当条纹相位移动时, 输出电信号将随之变化。为了保证光功率与电信号成线性关系, 光电二极管输出电流信号, 通过后端信号处理电路完成二极管电流电压转换和电压信号放大。

## 2.3 控制器设计

控制器硬件主要包括 A/D 转换器件, 数字控制器和 I/O 输出器件。

A/D 转换器件将模拟电压转换为数字量送入控制器计算, 输入 A/D 转换器件的电压信号可以表示为:

$$U(\phi) = U_1 + U_2 \cos \phi. \quad (10)$$

设 A/D 转换板卡的转换范围为  $\pm A$ , 转换位数为  $N$ , 条纹相位锁定目标精度为  $D/20$ 。选择相位测量分辨率为控制精度的  $1/10$ , 即  $D/200$ , 相当于相位分辨率为  $\pi/100$ 。

当  $\phi = 0$  时, 相同相位变化引起的幅值变化最小。因此, 为保证测量分辨率, A/D 转换器件的分辨率应高于相位分辨率, 满足:

$$\frac{2A}{2^N} \leq U_2 [\cos(0) - \cos(\frac{\pi}{100})], \quad (11)$$

即:

$$N \geq \log_2^{2026.59A/U_2} + 1. \quad (12)$$

为提高控制精度, 将  $U_2$  调整至 A/D 转换范围的  $4/5$  左右, 即  $A/U_2 = 1.25$ 。由式(12)可得  $N \geq 12$ 。这里 A/D 的转换位数选择 12 bit。

数字控制器通过电压变化获取条纹相位变化,采用 PID 控制算法,通过并行 IO 将数字输出量输出给执行器件驱动器。在实现控制功能的同时,设计实时显示的人机交互界面,完成系统状态监控,数据实时记录等功能,控制系统人机交互界面如图 3 所示。

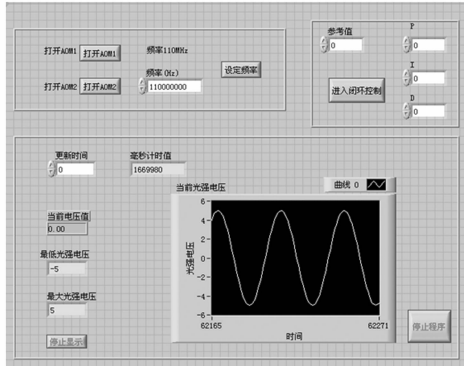


图 3 控制系统人机交互界面

Fig. 3 Human-machine interface of control system

### 2.3 移频式相位调整系统设计及调整原理

对干涉条纹的相位进行调整,即调整两束相干光束的光程差。常用的方法通过压电陶瓷反射镜来控制一束曝光光束的光程。该方法调整速度较慢,只能调整有限个周期的相位。

本系统选用 AOM 作为条纹的相位调整器件。这是一种利用声光效应的器件,可以对入射光的强度、频率及衍射偏角进行调制。文中应用 AOM 的移频特性,采用 Bragg 型 AOM,激光光束以 Bragg 角入射,将一级衍射光作为输出。当驱动器施加的信号仅为载波频率而强度不变时,一级光的频率将在入射光频率基础上叠加载波频率,达到移频效应<sup>[12,13]</sup>。

干涉曝光光路如图 4 所示。设激光器频率为  $f_0$ ,由于 AOM 的频率变化须围绕某一固定的频率点,在左侧光束中,放入固定移频为  $f_c$  的定频声光调制器 AOM<sub>1</sub>,经过 AOM<sub>1</sub> 后,其一级衍射光频率变为  $f_1 = f_0 + f_c$ 。右侧光束中,放入频率调整范围为  $f_c \pm \Delta f_c$  的移频声光调制器 AOM<sub>2</sub>。

将经过 AOM<sub>1</sub> 和 AOM<sub>2</sub> 的一级衍射光取出作为新的相干光束,零级光和其他级次的衍射光用光阑挡去。若需要对干涉条纹相位进行  $\Delta\phi$  的调整,向 AOM<sub>2</sub> 施加的载波频率为  $f_c + \Delta f$  的驱

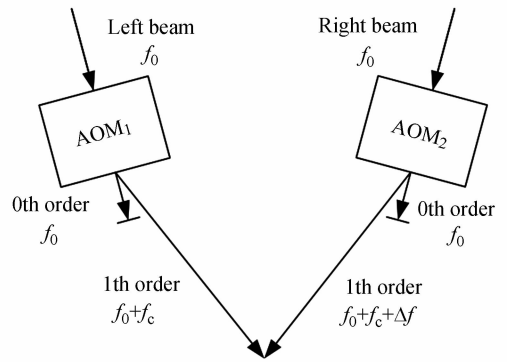


图 4 曝光光路示意图

Fig. 4 Exposure optical circuit

动信号,输出一级光频率变为  $f_2 = f_0 + f_c + \Delta f$ ,其中  $\Delta f$  为校正相位变化的频差,满足:

$$\Delta\phi = 2\pi \int (f_2 - f_1) dt = 2\pi \int \Delta f dt. \quad (13)$$

可见,通过改变 AOM<sub>2</sub> 的载波频率,可以对干涉条纹相位进行调整。由于 AOM 的调整时间为 ns 级,且移频范围为 MHz 级,因此具有更高的控制速度。另外,从式(13)可以看出,其相位调整范围为无穷大,应用起来更加灵活。

### 3 实验设计与实验结果

系统中的 AOM 选用法国 AA 公司的产品,定频 AOM(型号 MQ110-A3-UV)的载波频率为 110 MHz,采用配套的定频驱动器(型号 MOD-AGXX-B51k-36-110000)驱动,移频 AOM(型号 MQ110-B30A3-UV)的调频为 95~125 MHz,中心频率为 110 MHz。移频 AOM 采用 DDS 射频发生器(型号 DDSPA-B431b-0)和功率放大器(型号 AMPA-B-36)驱动其工作,DDS 射频发生器通过 31 bit 并行数字接口控制射频频率,频率分辨率为 0.233 Hz。当控制频率为 5 kHz 时,相位调整分辨为:

$$\Delta\phi_{\min} = 2\pi \times 0.233/5000 = 0.0003 \text{ rad}. \quad (14)$$

功率放大器将射频信号放大后驱动 AOM。采用根据当前曝光系统激光器波长,定频 AOM 和移频 AOM 的波长为 325~425 nm。

实验中, AOM 与驱动器间通过阻抗为 50  $\Omega$  的射频线连接。定频驱动器和功率放大器各有 1 位开关控制位,开关控制位和 DDS 射频发生器的 31 位频率控制位连接到工控机中的并行 IO 板

卡上。图 5 所示为相位调整系统的照片。

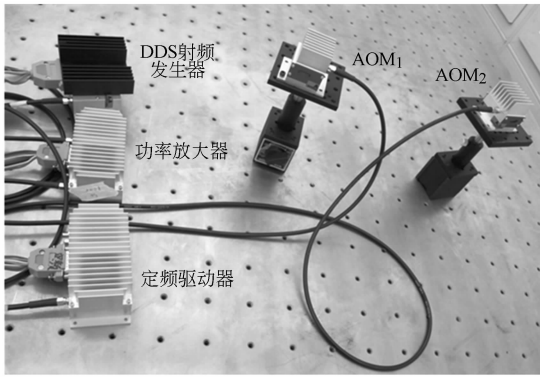


图 5 相位调整系统照片

Fig. 5 Photo of phase regulation system

### 3.1 开环实验

在全息曝光光路中放入定频 AOM<sub>1</sub> 和移频 AOM<sub>2</sub>, 使定频驱动器和移频功率放大器进入工作状态。通过 31 bit 数字接口设定 AOM<sub>2</sub> 的频率为 110 MHz, 调整光路和 AOM 角度, 使经过 AOM 出射的两束一级衍射光干涉, 形成干涉场。调整测量光栅, 形成周期合适的莫尔条纹。用 PD 探测莫尔条纹, 将输出的模拟电压进行 A/D 转换, 获取开环情况下的条纹相位变化。

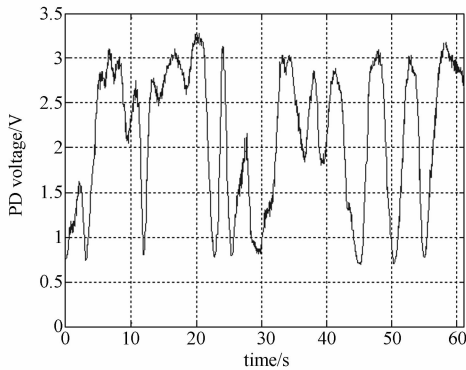


图 6 闭环关闭时 U<sub>PD</sub> 的变化

Fig. 6 Changes of U<sub>PD</sub> with feedback action off

在理想情况下, 两束相干光的频率  $f_1 = f_2 = 110$  MHz, 无条纹移动的静态相位为  $\phi_r$ , 由外部环境造成  $\phi_e(t)$  的相位变化。实际工作中, 由于 AOM 及其驱动器设计存在偏差, 两束光的频率存在频率偏差  $f_e(t)$ , 条纹相位将随着时间变化。PD 输出电压随时间的变化如图 6 所示, 该电压可

以近似表示为:

$$U(\phi) = U_1 + U_2 \cos \phi = 2 + 1.28 \cos \phi = 2 + 1.28 \cos(\phi_r + \phi_e(t) + \int 2\pi f_e(t) dt). \quad (15)$$

对该电压变化进行 FFT 分解后的频谱如图 7 所示。干涉条纹的移动主要包括条纹漂移和 10 Hz 以下的低频振动。

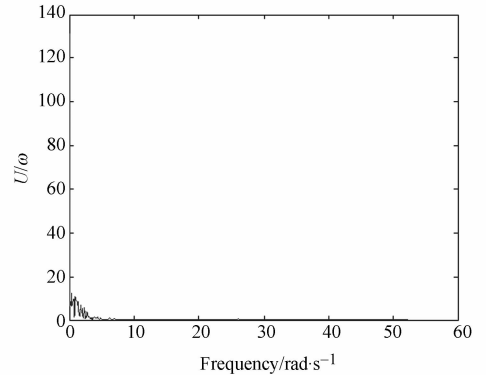


图 7 闭环关闭时 U<sub>PD</sub> 的 FFT 频谱

Fig. 7 Fourier spectra of U<sub>PD</sub> when feedback action is off

### 3.2 闭环实验

在与开环实验相同的初始状态下, 将 PD 输出电压作为反馈量与参考电压进行比较。设定目标参考电压为 2 V, 对应于相位参考值  $\pi/2$ 。采用 PID 控制算法, 控制器输出数字量传递给移频 DDS 射频发生器的数字接口, 调整移频 AOM<sub>2</sub> 的频率, 使 PD 输出电压恒定, 即干涉条纹的相位恒定。进入闭环时电压变化如图 8 所示。

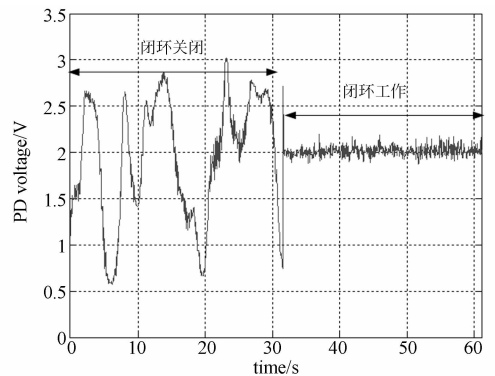
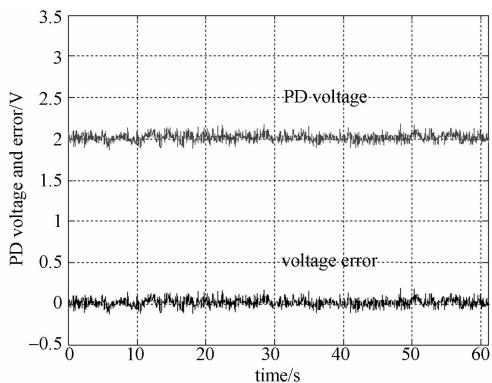
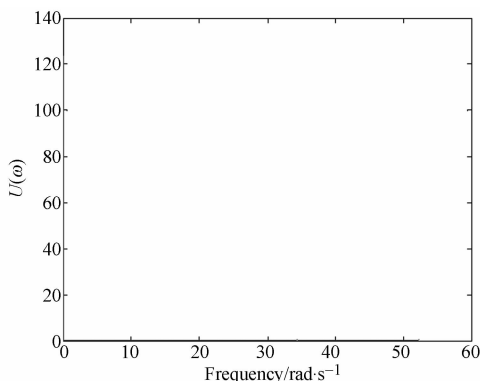


图 8 闭环关闭和工作时 U<sub>PD</sub> 变化

Fig. 8 Changes of U<sub>PD</sub> with feedback action on and off

图9 闭环工作时  $U_{PD}$  和电压误差Fig.9  $U_{PD}$  and locking voltage error with feedback action on图10 闭环工作时  $U_{PD}$  的FFT频谱Fig.10 Fourier spectra of  $U_{PD}$  when feedback action is on

当控制频率为 5 kHz 时,PD 输出电压及锁定误差如图 9 所示。电压误差的  $3\sigma$  值为 0.150 8 V,相应的相位变化  $3\sigma$  值为 0.118 1 rad,即相位变化小于  $\pm 0.02$  个干涉条纹周期,满足我们设计目标。

对条纹锁定后的电压进行 FFT 分解,得到的频谱图如图 10 所示。干涉条纹漂移和 10 Hz 以下的低频振动得到了有效的抑制。

## 4 结 论

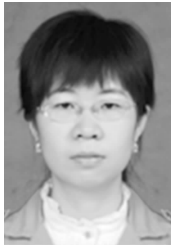
设计了一种移频式全息光束曝光干涉条纹锁定系统,用于多种形式全息曝光光路。该系统具有响应速度快、相位调整范围大、对原曝光光路改动小等优点。实验结果显示,该系统能够有效抑制干涉条纹的缓慢漂移和 10 Hz 以下的低频振动,其相位变化的  $3\sigma$  值小于 0.12 rad,能够限制在  $\pm 0.02$  个条纹周期以内,可以实时有效地锁定曝光干涉条纹,较好地满足了全息曝光的要求。

## 参考文献:

- [1] 祝绍箕,邹海兴,包学诚,等.衍射光栅[M].北京:机械工业出版社,1986.  
ZHU SH Q, ZOU H X, BAO X CH, *et al.*. *Diffraction Grating* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [2] LOEWEN E G, POPOV E. *Diffraction gratings and applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1997.
- [3] 吴娜,谭鑫,巴音贺希格,等.闪耀全息光栅离子束刻蚀工艺模拟及实验验证[J].光学精密工程,2012,20(9):1904-1912.  
WU N, TAN X, BAYANHESHIG, *et al.*. Simulation and experiments of ion beam etching process for blazed holographic grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1904-1912. (in Chinese)
- [4] BURCH J M, PALMER D A. Interferometric methods for the photographic production of large gratings [J]. *Opt. Acta.*, 1961, 8: 73-80.
- [5] 杨齐民,张文碧,钟丽云,等.外部环境对拍摄全息照片的影响与干涉条纹锁定[J].激光杂志,1999,20(3):36-38.  
YANG Q M, ZHANG W B, ZHONG L Y, *et al.*. The influence of external vibration for making hologram and the locking of interference fringe [J]. *Laser Journal*, 1999, 20(3): 36-38. (in Chinese)
- [6] 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):648-654.  
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)
- [7] JONES D C, STACEY C D, SCOTT A M. Phase stabilization of a large-mode-area ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Optic Letters*, 2007, 32(5): 466-468.

- [8] KRISHNAMACHARI V V, ANDRESEN E R, KEIDING S R, *et al.*. An active interferometer-stabilization scheme with linear phase control [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5210-5215.
- [9] HEILMANN R K, KONKOLA P T, CHEN C G, *et al.*. Digital heterodyne interference fringe control system [J]. *Vac. Sci. Technol. B*, 2001, 19(6): 2342-2346.
- [10] 巴音贺希格, 邵先秀, 崔继承, 等. 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 56-63.  
BAYANHESHIG, SHAO X X, CUI J CH, *et al.*. Off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric systems for manufacturing plane holographic gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 56-63. (in Chinese)
- [11] 韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005003.  
HAN J, BAYANHESHIG, LI W H, *et al.*. Method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005003. (in Chinese)
- [12] 霍雷, 曾晓东. 激光外差干涉中声光器件的非均匀声场特性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2386-2392.  
HUO L, ZENG X D. Non-uniform sound field distribution of acousto-optic device in laser heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2386-2392. (in Chinese)
- [13] 安毓英, 曾小东. 光学传感与测量[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.  
AN Y Y, ZENG X D. *Optic Sensing and Measurement* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001. (in Chinese)

## 作者简介:



宋莹(1985—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事衍射光栅制作和测试等方面的研究。E-mail: songyingtec@126.com

## 导师简介:



唐玉国(1967—),男,吉林蛟河人,博士,研究员,博士生导师,1989年于吉林工业大学获学士学位,1995年于中国科技大学获博士学位,主要从事光谱仪器及医用光谱技术方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

(版权所有 未经许可 不得转载)