

移栅型全息光栅曝光干涉条纹锁定

宋莹¹, 赵旭龙^{1,2}, 姜岩秀¹, 巴音贺希格^{1*}, 齐向东¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光栅技术研究中心, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高全息光栅曝光系统的曝光对比度, 抑制外部环境变化引起的曝光干涉条纹漂移, 提出了一种移栅型干涉条纹锁定方法。采用分束光栅实现光源激光的分光及干涉条纹的相位调整。通过叠栅条纹间接测量干涉条纹相位变化, 给出了双光电探测器的最佳探测位置。结合分光及相位调整功能, 给出了分束光栅参数的设计方法。针对光栅曝光特点设计了控制器。从理论上对比了分束光栅与压电反射镜的相位调整性能。实验结果表明, 采样频率为 500 Hz 时, 干涉条纹的低频漂移得到有效抑制, 相位锁定精度达到 0.13 rad (3σ), 即条纹漂移量低于 ± 0.021 个周期。该方法可以实时有效地锁定曝光干涉条纹, 提高曝光对比度。且分束光栅偏转对条纹周期影响小, 相位调整性能仅与分束光栅参数相关, 便于光路设计。

关键词 全息; 全息光栅; 干涉条纹锁定; 分束光栅; 叠栅条纹

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0509001

Interference Fringe Locking by Grating-Shifting Holographic Grating Exposure

Song Ying¹, Zhao Xulong^{1,2}, Jiang Yanxiu¹, Bayanheshig¹, Qi Xiangdong¹

¹Grating Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to increase the exposure contrast of the holographic grating exposure system, and depress the exposure interference fringe drifts caused by the environmental changes, a method of interference fringe locking by grating-shifting is proposed. The beam splitter grating is used to split the beam from laser source and adjust the phase of the interference fringe. The phase changes of the interference fringe are measured indirectly by Moire fringe. The best detection locations of the two photoelectric detectors are given. The parameters design method of the beam splitter grating is presented by combining the function of splitting beam and regulating phase. The controller is designed aiming at the characteristic of the grating exposure. The phase-regulating performances of the beam splitter grating and the piezomirror are contrasted theoretically. The experiment results illustrate that the low-frequency drifts of the interference fringe are depressed at a sample frequency of 500 Hz. The value of the phase locking is below 0.13 rad (3σ), namely the fringe drift is below ± 0.021 period. The exposure interference fringe can be timely and effectively locked by this method, and the exposure contrast is improved. The tilt of the beam splitter grating has little effect on fringe's period. Besides, the phase regulating performance is only relevant to the parameters of the beam splitter grating, which is convenient to the design of the optical layout.

Key words holography; holographic grating; interference fringe locking; beam splitter grating; Moire fringe

OCIS codes 090.7330; 050.2770; 230.1950; 050.5080; 250.0040

收稿日期: 2016-12-13; **收到修改稿日期:** 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制专项(61227901)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)

作者简介: 宋莹(1985—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事衍射光栅制作方法与技术方面的研究。

E-mail: songyingtec@126.com

* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

1 引 言

全息光栅的曝光过程是将涂有光刻胶的光栅基底放入曝光干涉场中,将干涉条纹记录在光刻胶上。曝光后经过显影形成全息光栅掩模,再经过后续的工艺过程,形成全息光栅^[1]。在全息光栅曝光过程中,要求曝光干涉条纹与光栅基底保持固定的相位关系,但由于外部环境的影响,如温度变化、气流扰动、光学元件振动,会造成干涉条纹发生移动,导致曝光对比度下降。在相同的曝光显影参数下,所形成的光栅掩模槽深变浅,槽形侧壁陡直度下降。这说明干涉条纹的移动将直接影响全息光栅的质量,甚至导致曝光失败。若保证曝光对比度达到 0.95,条纹低频漂移均方根(RMS)值应控制在 0.05 个条纹周期以内^[2-3]。

为了克服全息光栅曝光过程中由于外部环境造成的干涉条纹移动,需要采用优良的外部环境控制措施。但随着光栅刻线密度的增加或曝光时间的增长,对环境控制提出了更加严格的要求,光栅制作成本将大大增加^[4]。为此,各种形式的干涉条纹锁定方法应运而生,这些方法利用光电二极管或电荷耦合器件(CCD)等光电探测器(PD)测量干涉条纹的相位变化,调整两束相干光束的相位差,对干涉条纹的相位进行反馈控制,使干涉条纹保持稳定。目前广泛应用的调整方式是采用压电陶瓷平移反射镜(压电反射镜)调整两束相干光束的光程差^[5-7],该方法的条纹锁定性能容易受到光路设计的影响。应用电光调制器或声光调制器对相干光束的相位或频率进行调整的方法^[8-9],引入了额外的相位调整元件,系统较为复杂。

本文提出一种移栅型全息光栅曝光干涉条纹锁定方法,利用分束光栅实现光源激光的分光与干涉条纹的相位调整。针对分束光栅在本系统中的应用,给出分束光栅的设计方法。结合光栅曝光特点,完成了干涉条纹相位的差分光电探测及控制器设计。并从理论上将本方法与压电反射镜调整方法进行了比较。

2 基本原理

移栅型全息光栅曝光干涉条纹锁定主要用于分振幅型全息光栅曝光光路,其系统组成如图 1 所示。由分束光栅代替传统曝光光路中的分束棱镜,将光源激光分束。两束相干光束经过反射镜、空间滤波器后形成球面波曝光光路,或再次经过准直透镜,形成平面波曝光光路。

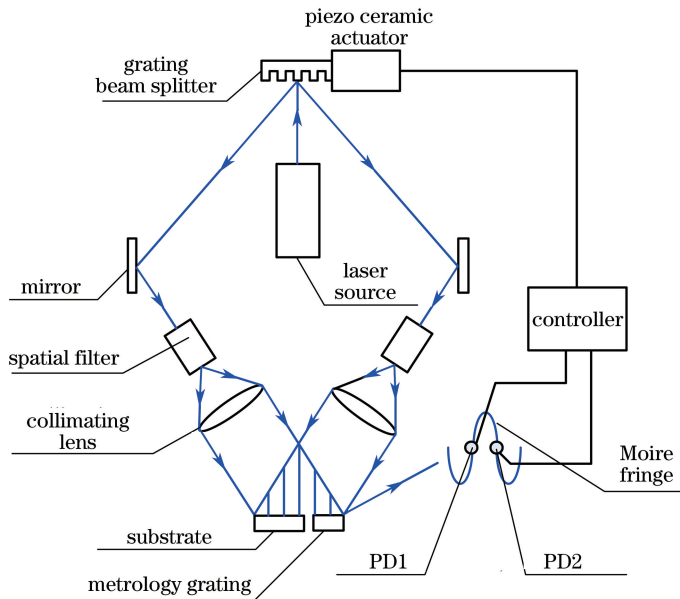


图 1 移栅型曝光干涉条纹锁定原理

Fig. 1 Principle of grating-shifting exposure interference fringe locking

干涉场区域内放置用于记录干涉条纹的光栅基底,并放入一块小尺寸的平面反射光栅作为测量光栅。测量光栅的周期与干涉条纹周期成整数倍,二者叠加将产生叠栅条纹^[10]。在测量光栅保持静止的情况下,叠栅条纹与干涉条纹具有相同的相位变化。由于叠栅条纹周期远大于干涉条纹周期,并可以根据需要进行调整,因此通过探测叠栅条纹的相位变化来间接获取干涉条纹的相位变化。采用两个光电探测器 PD1、PD2

测量叠栅条纹的强度,在二者间距不等于叠栅条纹周期整数倍时,其差分电压信号的变化代表了曝光干涉条纹的相位变化,采用双探测器可消除激光器光强波动等共模信号对测量的影响。

控制器获取双探测器的差分电压信号,通过反馈控制,输出控制量令压电陶瓷产生伸缩。压电陶瓷驱动分束光栅在分束光栅表面所在的平面沿垂直于光栅刻线的方向运动,实现对干涉条纹相位的调整。在干涉条纹锁定前,将压电陶瓷工作零点设置为整个行程的中间位置,使其具有较大的相位调整范围。在干涉条纹锁定过程中,持续进行闭环反馈控制,压电陶瓷位移不断动态变化,克服温度漂移及压电陶瓷器件非线性的影响。在本方法中,分束光栅除具有分光作用外,还成为干涉条纹锁定的调整元件。

3 系统设计

3.1 差分型光电探测

若采用平面波曝光系统,形成的叠栅条纹相位将沿垂直于叠栅条纹方向线性分布,将垂直于叠栅条纹的方向定义为 X 方向,叠栅条纹的光强可表示为:

$$I(x) = I_1 + I_2 \cos\left(\frac{2\pi x}{D} + \varphi_e\right), \quad (1)$$

式中 D 为叠栅条纹周期, $2\pi x/D$ 为 x 位置处叠栅条纹静止时的相位, φ_e 为相位变化量。

设光电探测器有效感光面积为矩形,光电探测器沿 X 方向的宽度为 w ,长度为 h ,两个光电探测器 PD1 和 PD2 中心位置的坐标分别为 x_1 和 x_2 ,通过光电转换电路获得 PD1 的电压信号 U_{PD1} 为:

$$U_{PD1} = Kh \int_{x_1 - \frac{w}{2}}^{x_1 + \frac{w}{2}} I(x) dx = A_1 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi x_1}{D} + \varphi_e\right), \quad (2)$$

式中 K 为光电转换电路的光电转换系数, $A_1 = Kw h I_1$, $A_2 = (Kh D I_2 / \pi) \sin(\pi w / D)$ 。同理,可以获得 PD2 的电压信号 U_{PD2} ,二者的差分电压信号为:

$$U_{diff} = U_{PD1} - U_{PD2} = A_{diff} \sin\left[\frac{\pi(x_1 + x_2)}{D} + \varphi_e\right], \quad (3)$$

式中 $A_{diff} = -2A_2 \sin[\pi(x_1 - x_2)/D]$ 。对(3)式取微分后,可以得到:

$$\Delta U_{diff} = A_{diff} \cos\left[\frac{\pi(x_1 + x_2)}{D} + \varphi_e\right] \Delta \varphi_e. \quad (4)$$

由(4)式可知,为了获得较高的测量灵敏度,需要满足:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 = (2k_1 + 1)D/2 \\ x_1 + x_2 = k_2 D \end{cases}, \quad (5)$$

式中 k_1 及 k_2 为自然数,当 $k_1 = 0, k_2 = 0$ 时, $x_1 = D/4, x_2 = -D/4$,即两个光电探测器对称放置在某一叠栅条纹明条纹两侧的背景光强处。当 k_1 与 k_2 取其他数值时,还可获得两个光电探测器对称放置在某一暗条纹两侧,或间隔整数倍周期放置在明(暗)条纹两侧的背景光强处。在实际的测量中,若采用球面波曝光系统,将形成弯曲的叠栅条纹相位分布。另外光电探测器探测面也可能存在矩形以外的其他形状,但在探测位置的局部范围内,以上原则仍然适用。

3.2 移栅型相位调整

控制器采集双光电探测器的差分信号后,通过控制算法输出控制量,压电陶瓷驱动分束光栅沿垂直于分束光栅刻线的方向运动,对干涉条纹的相位进行调整。设分束光栅的周期为 d_g ,光源激光垂直入射,入射角 $\alpha_g = 0$,入射激光的频率为 f_0 。利用其出射的 $\pm n$ 级衍射光作为相干光束。若分束光栅运动速度为 v_g ,根据光栅运动所产生的多普勒效应, $+n$ 级衍射光与 $-n$ 级衍射光之间的频差为 $2nv_g/d_g$ ^[11-12]。根据光的干涉原理,二者的频差将使干涉条纹的相位发生变化,当分束光栅运动位移 l 时,曝光干涉条纹将发生如下的相位变化^[13]:

$$\Phi_g = 2\pi \int \frac{2nv_g}{d_g} dt = \frac{4\pi n l}{d_g}. \quad (6)$$

由(6)式可知,相位调整量与分束光栅位移 l 和光栅衍射级次 n 成正比,与光栅周期 d_g 成反比。

分束光栅衍射级次 n 及光栅槽形参数主要由光栅的衍射效率特性决定。为充分利用光束能量并提高曝光对比度,分束光栅在 $\pm n$ 级应具有较高的衍射效率,且衍射效率近似相等。利用光栅衍射效率分析软件计算后发现,采用类矩形镀铝膜反射光栅,其 ± 1 级较易获得高的衍射效率。如采用 600 gr/mm 的类矩形镀铝膜反射光栅,在光栅槽形占空比为 50% 时,更改类矩形光栅槽形上升沿和下降沿的宽度,使槽形发生变化。通过计算,当上升沿和下降沿宽度从 $d_g/3$ 减小到 $d_g/20$ 时,在槽深 120 nm 左右,光栅 ± 1 级衍射效率值相等,且高于 30%。因此,分束光栅的衍射级次 n 可选择为 1。

光栅周期 d_g 减小,分束光栅运动相同位移 l 可以获得更大的相位调整量。但采用数字控制系统,数字/模拟(D/A)转换位数确定的情况下, d_g 的减小将降低相位调整分辨率。由于干涉条纹相位为周期性分布,理论上 $[-d_g/2, d_g/2]$ 的光栅运动范围即可涵盖整个周期的相位值。因此在相位调整范围留有余量的情况下,适当增加 d_g 可提高相位调整分辨率。应综合考虑测量系统模拟/数字(A/D)转换、数字控制器和 D/A 转换等方面,对光栅周期 d_g 做出选择。

3.3 控制器设计

控制器硬件主要包括 A/D 转换器件、数字控制器及 D/A 转换器件。若控制目标是干涉条纹锁定精度优于 $d_f/20$,其中 d_f 为干涉条纹周期。根据经验,可要求相位测量和相位调整的分辨率为 $d_f/200$ 。采用参考文献[14]的计算方法对 A/D 转换位数进行估算,要求 A/D 转换位数大于等于 12 bit,D/A 转换位数根据(6)式,结合压电陶瓷总行程和分束光栅周期 d_g 计算。

影响光栅曝光的主要因素是干涉条纹的低频漂移,由于测量光路杂散光和光电转换电路噪声的存在,使差分电压信号包含中高频噪声。数字控制器对采集到的差分电压信号进行了软件低通滤波,采用 4 阶有限脉冲响应(FIR)低通滤波器,滤波器 Z 传递函数可以表示为:

$$\frac{U_{out}(z)}{U_{in}(z)} = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}, \quad (7)$$

式中 $U_{out}(z)$ 为滤波器输出电压的 z 变换, $U_{in}(z)$ 为滤波器输入电压的 z 变换, $a_0 \sim a_4$ 为滤波器系数。

为抑制 50 Hz 工频噪声及高频噪声,将滤波器通带截止频率设定为 48 Hz,此时对影响曝光的干涉条纹低频漂移没有影响。设计滤波器参数如下: $a_0 = 0.144426, a_1 = 0.235649, a_2 = 0.23985, a_3 = 0.235649, a_4 = 0.144426$ 。滤波器的频率响应如图 2 所示。控制器根据滤波后的差分电压获取干涉条纹的相位变化 φ_c ,被控对象可视为一阶系统,传递函数表示为 $1/(zs + 1)$ 的形式,其中 τ 为时间常数, s 是拉式变换的复变参量。采用比例积分微分(PID)控制算法,由于积分作用的存在,条纹锁定系统为 I 型系统。将干涉条纹锁定于某一恒定相位时,相当于输入为阶跃信号,此时条纹锁定控制系统的稳态误差为 0。将控制量经过 D/A 转换和放大后驱动压电陶瓷运动,对干涉条纹相位进行实时调整。

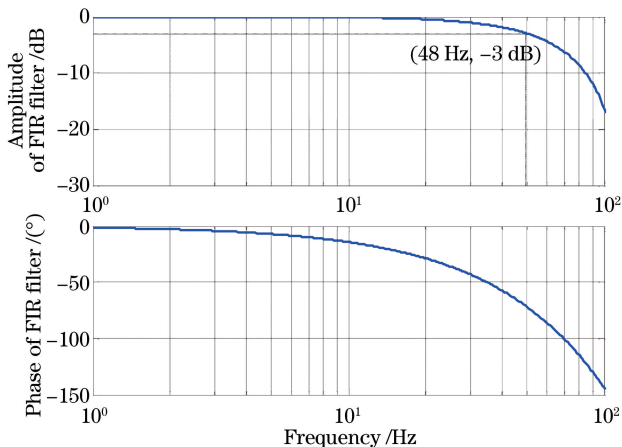


图 2 FIR 低通滤波器的频率响应

Fig. 2 Frequency response of the FIR low-pass filter

4 实验设计与实验结果

实验光路激光器采用 441.6 nm 波长的 He-Cd 激光器,利用 600 gr/mm 的平面类矩形反射光栅作为分光及相位调整元件,分束光栅入射角 $\alpha_g = 0$, 1 级衍射光衍射角 $\beta_g = 15.36^\circ$ 。曝光干涉条纹的线密度为 2400 gr/mm,测量光栅周期与曝光干涉条纹周期需具有整数倍关系,此处选用具有 600 gr/mm 的平面反射光栅。测量光栅的周期是曝光干涉条纹周期的 4 倍,一侧曝光光束的 +1 级与另一侧曝光光束的 +3 级或两束曝光光束的 +2 级将重合形成叠栅条纹。为增强叠栅条纹的亮度和对比度,提高测量的信噪比,测量光栅表面镀有金属膜层,并设计光栅在形成叠栅条纹的两个使用级次上具有相似的衍射效率。将两个光电二极管尽量放置在叠栅条纹某条明条纹两侧,实验系统光路照片如图 3 所示。

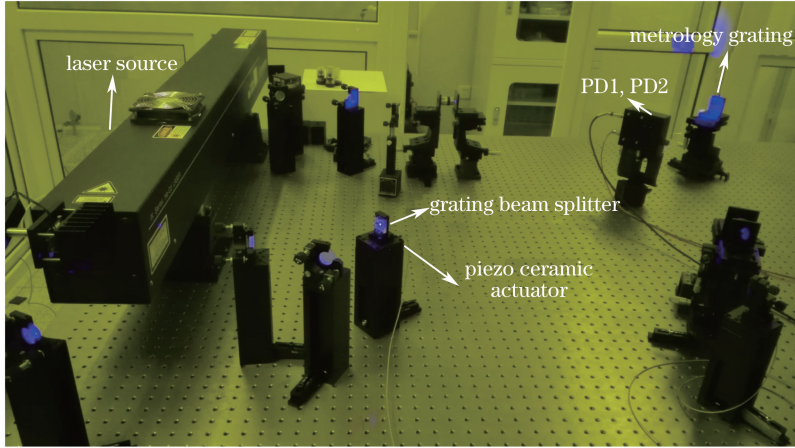


图 3 实验系统光路照片

Fig. 3 Optical path photo of the experimental system

根据系统设计,选用具有 12 bit 转换能力的研华 PCI 1714UL 作为 A/D 转换器件,A/D 转换范围为 ± 5 V。A/D 转换的电压分辨率为: $10 \text{ V}/2^{12} = 0.0024 \text{ V}$ 。由于叠栅条纹强度分布为正弦型,相同的电压分辨率在发生不同的相位变化时,对应不同的相位测量分辨率。根据(3)式,在差分电压信号的零点处具有最高的相位测量分辨率。因此设定差分电压锁定参考值为 0 V,若差分电压信号的幅值为 3 V,当锁定精度在 $\pm d_i/20(\sigma)$ 的范围内时,相位测量分辨率为 0.0014 rad。压电陶瓷选择芯明天 XP-620.12K 及其配套的驱动器,压电陶瓷的额定行程为 $0 \sim 12 \mu\text{m}$ 。压电陶瓷驱动器与控制器通过通用串行总线(USB)通信。驱动器内部 D/A 转换位数为 16 bit,转换范围为 $\pm 10 \text{ V}$,在电压为 10 V 时,由于压电陶瓷非线性的存在,压电陶瓷行程接近 $12 \mu\text{m}$ 。相位调整分辨率可以达到: $4\pi \times (12 \mu\text{m}/2^{15}) / (1 \text{ mm}/600) = 0.0028 \text{ rad}$,条纹锁定系统的相位分辨率为相位测量与相位调整分辨率中的较大值,即相位分辨率为 0.0028 rad,条纹锁定随机误差的理论极限值将高于该相位分辨率。

无干涉条纹锁定时,分束光栅仅作为分光元件。光电二极管的差分电压时域信号及其低功率谱密度(PSD,频率 $f \leq 50 \text{ Hz}$)如图 4 所示。从图 4 中可见,差分电压信号为(3)式所示的正弦形式变化,其幅值

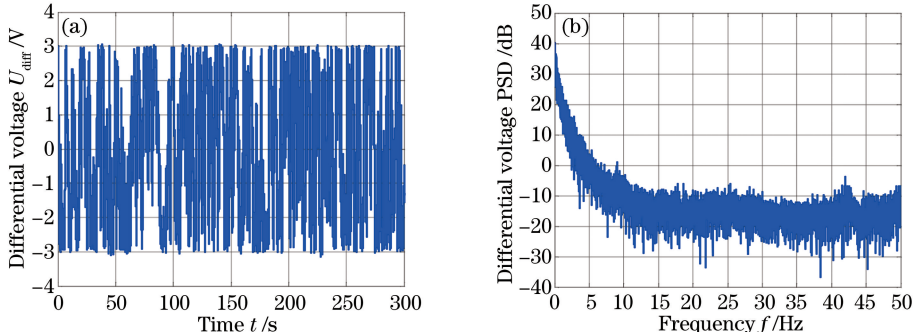


图 4 无条纹锁定的光电探测器差分电压 U_{diff} 。(a) U_{diff} 时域变化; (b) U_{diff} 功率谱密度

Fig. 4 Differential voltage U_{diff} of PD without fringe locking. (a) Time domain change of U_{diff} ; (b) PSD of U_{diff}

A_{diff} 为 3 V。在 5 min 的时间内,干涉条纹漂移多个周期,对曝光对比度产生不利影响,影响曝光对比度的低频漂移主要集中在 5 Hz 以下。

干涉条纹锁定后,分束光栅不仅作为分光元件,还作为条纹锁定的执行元件。采样频率为 500 Hz 时,设定差分电压参考值为 0 V,对应干涉条纹相位变化量 $\varphi_e = 0$,进入锁定时刻的差分电压变化如图 5 所示。

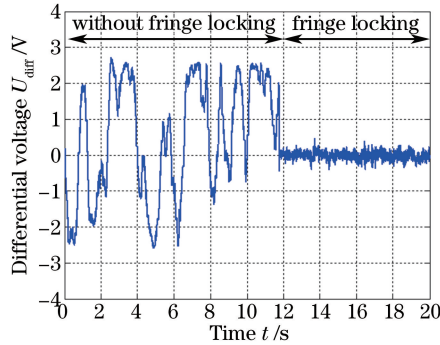


图 5 条纹锁定开始时刻差分电压 U_{diff} 变化

Fig. 5 Change of differential voltage U_{diff} when the fringe locking starts

在 500 Hz 的控制频率下,持续进行干涉条纹锁定,差分电压时域信号及其低频功率谱密度如图 6 所示。对比图 4(a)与图 6(a),可见时域电压锁定在 0 V 附近,大幅值的条纹漂移消失。对比图 4(b)和图 6(b)的频域功率谱密度图,可见干涉条纹的低频漂移得到显著衰减。通过数据分析,可以得到干涉条纹锁定后差分电压误差为 0.39 V(3σ),转化为曝光干涉条纹的相位变化为 0.13 rad(3σ),优于 ± 0.021 个干涉条纹周期。

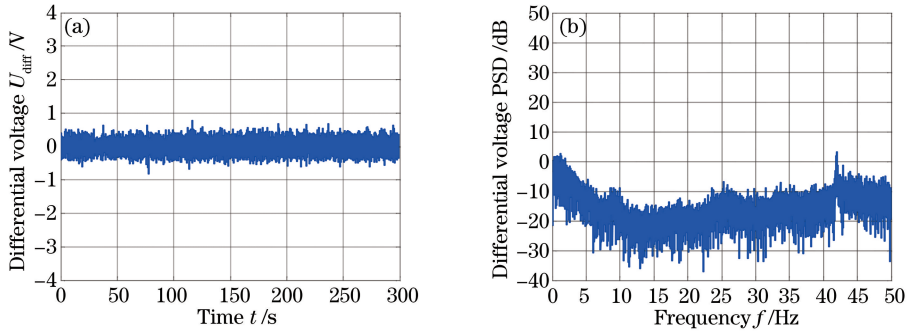


图 6 条纹锁定时光电探测器差分电压 U_{diff} 。(a) U_{diff} 时域变化;(b) U_{diff} 功率谱密度

Fig. 6 Differential voltage U_{diff} of PD when fringe locking is on. (a) Time domain change of U_{diff} ; (b) PSD of U_{diff}

5 移栅法与压电反射镜法的对比分析

通常的干涉条纹相位调整方式是利用压电陶瓷驱动一侧曝光光路中的反射镜平移(图 1 中的反射镜),通过调整曝光光束的光程差来调整干涉条纹相位。当压电陶瓷沿反射镜法线运动距离为 l ,光束在此反射镜的入射角为 α_m ,激光器波长为 λ 时,曝光干涉条纹产生的相位变化为:

$$\Phi_m = \frac{4\pi l \cos \alpha_m}{\lambda} \quad (8)$$

利用分束光栅进行干涉条纹相位调整,在光束入射角 $\alpha_g = 0$,使用级次 $n = 1$ 时,结合光栅方程 $d_g = \lambda / \sin \beta_g$,根据(6)式可得:

$$\Phi_g = \frac{4\pi l \sin \beta_g}{\lambda} \quad (9)$$

对比(8)式和(9)式,在通常的光路设计中,这两种方式具有相似的相位调整量级。但利用压电反射镜调整干涉条纹相位,相位调整量 Φ_m 与光束入射角 α_m 有关,而 α_m 通常与曝光干涉条纹的周期及光路设计相关。在光路发生变化时,相位调整范围及相位调整分辨率存在不确定性。但利用分束光栅调整干涉条纹,相

位调整范围及相位调整分辨率仅与分束光栅固有参数有关,且分束光栅放置在光路前端,后端光路发生变化时,对曝光干涉条纹锁定性能没有影响,便于光路设计。

在相位调整过程中,由于安装误差和压电陶瓷运行直线度误差,会导致相位调整元件发生偏转,在球面波曝光系统中,会对曝光干涉条纹周期产生影响。设相位调整元件偏转角为 δ ,压电反射镜偏转时,对光束角度的影响如图 7 所示,干涉条纹的周期变为 d_{fm} ,可以表示为:

$$d_{fm} = \frac{\lambda}{\sin \theta + \sin(\theta - 2\delta)} = d_f [1 + \delta \cot \theta + o(\delta^2)], \quad (10)$$

式中 $d_f = \lambda / (2 \sin \theta)$ 为曝光干涉条纹的理想周期, θ 为理想的相干光束的半角。

若采用分束光栅作为相位调整元件,根据光栅方程, +1 级衍射角度为:

$$\beta_g = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d_g} - \sin \alpha_g\right). \quad (11)$$

当压电陶瓷推动光栅发生偏转 δ 时,光栅的入射角将从 0 变化为 δ ,光栅衍射角从 β_g 变为 $\beta_{g,tilt}$,变化为 $\Delta\beta_g$,如图 8 所示。当 δ 较小时,衍射角变化 $\Delta\beta_g$ 可以表示为:

$$\Delta\beta_g = -\frac{d_g \delta}{\sqrt{d_g^2 - \lambda^2}} = -\frac{\delta}{\cos \beta_g}. \quad (12)$$

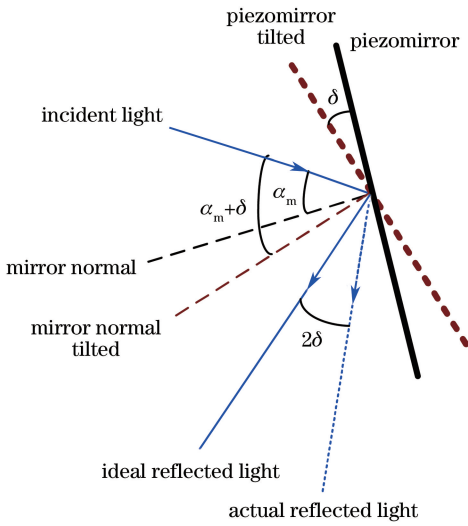


图 7 压电反射镜偏转引起的反射光束角度变化

Fig. 7 Angle change of reflected light when the piezomirror tilts

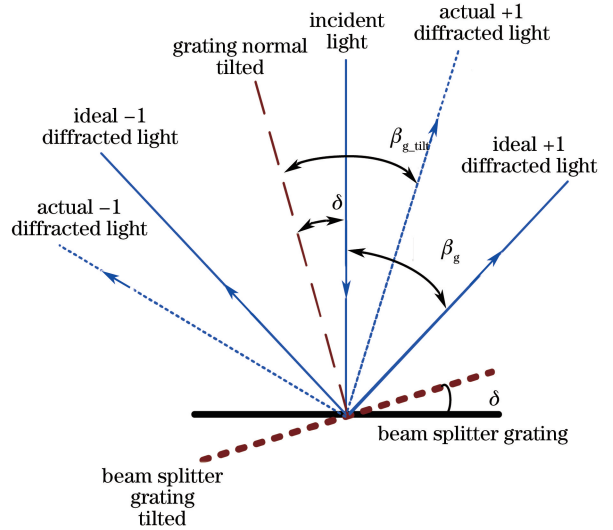


图 8 分束光栅偏转引起的衍射光束角度变化

Fig. 8 Angle change of diffracted light when the beam splitter grating tilts

由于光栅法线方向也发生 δ 的偏转,相对于偏转前的出射光束, +1 级衍射光束角度将发生 $(1 + 1/\cos \beta_g)\delta$ 的角度变化。同理, -1 级衍射光束发生同方向的 $(1 + 1/\cos \beta_g)\delta$ 的角度变化,曝光干涉条纹的周期变为 d_{fg} ,可以表示为:

$$d_{fg} = \frac{\lambda}{\sin[\theta - (1 + 1/\cos \beta_g)\delta] + \sin[\theta + (1 + 1/\cos \beta_g)\delta]} = d_f \left[1 + \frac{1}{2} (1 + 1/\cos \beta_g)^2 \delta^2 + o(\delta^4) \right]. \quad (13)$$

根据(10)式和(13)式,不考虑高阶误差,当压电反射镜发生 δ 偏转时,干涉条纹周期相对误差与 $\delta \cot \theta$ 成正比,误差随着干涉条纹周期的增加(θ 减小)而增加。而分束光栅作为相位调整元件发生 δ 偏转时,干涉条纹周期相对误差以 δ^2 的速度快速衰减,该误差仅与衍射角 β_g 相关。实际曝光光路中,分束光栅的使用衍射角 β_g 通常在 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围内,此时移栅型相位调节方式对干涉条纹周期的影响更小。

在分振幅平面波曝光光路中,基底处的曝光光束是分光光束经空间滤波器和准直透镜扩束获得的。准直光束角度变化与分束光束角度变化存在正比关系,比例系数为空间滤波器中聚焦透镜与准直透镜焦距之比。通常聚焦透镜焦距比准直透镜焦距约小三个数量级。此时,相位调整元件偏转对干涉条纹周期产生的影响可忽略不计^[15]。

6 结 论

提出了一种移栅型全息光栅,非全息光束曝光干涉条纹锁定方法,该方法中分束光栅兼具分光及干涉条纹相位调整功能,无需增加额外的相位调整元件,可以应用于多种形式分振幅型全息光栅曝光光路中。依据该方法设计了一套干涉条纹锁定系统,实验结果显示,该方法能够实时有效地对干涉条纹的低频漂移进行抑制,干涉条纹相位锁定精度达到 $0.13 \text{ rad}(3\sigma)$,相位漂移限制在 ± 0.021 个干涉条纹周期以内。从理论上对比本方法与通常的压电反射镜相位调整方法,分析结果表明,本方法中干涉条纹相位调整范围及分辨率仅与分束光栅参数有关,便于后端光路的设计。且采用移栅型相位调整方式,相位调整元件发生偏转对曝光干涉条纹周期的影响更小。

参 考 文 献

- [1] Hutley M C. Diffraction gratings[M]. New York: Academic Press, 1990: 95-100.
- [2] Qian Guolin, Li Chaoming, Yin Qingyan, *et al.* Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 648-650.
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.
- [3] Song Ying. Effect of phase changes of interference fringes on exposure of plane holographic gratings [J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 339-343.
宋 莹. 干涉条纹相位变化对平面全息光栅曝光的影响[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 339-343.
- [4] Yang Qimin, Zhang Wenbi, Zhong Liyun, *et al.* The influence of external vibration for making hologram and the locking of interference fringe[J]. Laser Journal, 1999, 20(3): 36-38.
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.
- [5] 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.
- [6] Sio L D, Veltri A, Tedesco A, *et al.* Characterization of an active control system for holographic setup stabilization[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1363-1367.
- [7] Ott D B, Divliansky I B, SeGall M A, *et al.* Stabilization system for holographic recording of volume Bragg gratings using a corner cube retroreflector[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1039-1046.
- [8] Schattenburg M L, Chen C G, Heilmann R K, *et al.* Progress toward a general grating patterning technology using phase-locked scanning beams[C]. SPIE, 2002, 4485: 378-384.
- [9] Heilmann R K, Konkola P T, Chen C G, *et al.* Digital heterodyne interference fringe control system[J]. J Vac Sci Technol B, 2001, 19(6): 2342-2346.
- [10] Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.* Method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005003.
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.
- [11] Gao Jinlei, Zong Mingcheng. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0904003.
高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904003.
- [12] Zhang Shu, Li Yu, Lu Guangfeng. Research of laser doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312003.
张 澍, 李 玉, 卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312003.
- [13] Wu C C, Hsu C C, Lee J Y, *et al.* Optical heterodyne laser encoder with sub-nanometer resolution[J]. Meas Sci Technol, 2008, 19(4): 045305.
- [14] Song Ying, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 318-324.
宋 莹, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 318-324.
- [15] Han Jian. The research on the lithography system and the grating mask profile evolution and controlling in the fabrication of the holographic grating[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 55-57.
韩 建. 全息光栅曝光系统及光栅掩模参数控制的基础问题研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 55-57.