

扫描干涉场曝光系统中周期设定对曝光刻线相位的影 响

姜 珊^{1,2} 巴音贺希格¹ 李文昊¹ 宋 莹^{1,2} 潘明忠¹

(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 100049)

摘要 扫描干涉场曝光系统中的干涉条纹周期是相位锁定系统的重要参数,其设定值与名义值之间的偏差会引起相邻扫描间的干涉条纹相位拼接误差。为获取以扫描曝光方式所制作光栅的衍射波前特征,根据步进扫描曝光的特点及动态相位锁定的工作原理,建立了扫描曝光的数学模型,给出了曝光刻线误差及曝光光栅周期的变化规律,并进行了相关实验验证。结果表明,相位锁定中周期设定误差会带来周期性的刻线误差。曝光光栅周期会随周期设定值的变化而改变,当周期设定误差较小时,曝光光栅周期等于周期设定值。对于曝光光斑束腰半径为 0.9 mm、曝光步进间隔为 0.6 mm、曝光条纹周期为 555.6 nm 的系统参数,周期设定的相对误差小于 278×10^{-6} 时,周期性的刻线误差小于 1 nm。若要求曝光对比度大于 0.9,则周期设定的相对误差需要控制在 92.6×10^{-6} 以内,周期设定值及曝光光栅周期的可变范围为 102.8 pm。

关键词 光栅;扫描干涉场曝光系统;相位锁定;光栅周期;刻线误差

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0905003

Effect of Period Setting Value on Printed Phase in Scanning Beam Interference Lithography System

Jiang Shan^{1,2} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Song Ying^{1,2} Pan Mingzhong¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Interference fringe period is a very important parameter of phase locking in scanning beam interference lithography system. The deviation between period setting value and nominal fringe period value will cause stitching error of interference fringe between adjoining scans. To get features of scanning lithography manufactured grating diffraction wavefront, according to the characteristics of step-and-scanning lithography and working principle of dynamic phase locking, the mathematical model of scanning beam interference lithography is built. According to this model, variations of printed error and lithography grating period are given. Experiments are done to verify this model. Results show that period setting error in phase locking system will cause periodic printed error. Periods of lithography grating vary with period settings. Lithography grating period is equal to period setting value with tiny period setting error. When interference beam waist radius is 0.9 mm, step over distance is 0.6 mm and fringe period is 555.6 nm, periodic printed error is less than 1 nm with period setting relative error less than 278×10^{-6} . If the dose contrast is more than 0.9, period setting error must be controlled within 92.6×10^{-6} . The variable range of period setting value and lithography grating period is 102.8 pm.

Key words gratings; scanning beam interference lithography system; phase locking; grating period; printed error

OCIS codes 050.2770; 220.3740

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(61227901)

作者简介: 姜 珊(1988—),女,博士研究生,主要从事扫描干涉场曝光系统方面的研究。

E-mail: jiangshan0122@126.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—),男,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

扫描干涉场曝光(SBIL)^[1-4]系统是制作脉冲压缩光栅^[5-6]掩模的一种方法,该系统是采用工作台二维运动的方式,将小尺寸干涉场光斑曝光至涂有光刻胶的光栅基底上,从而制作大面积的光刻胶光栅掩模。SBIL系统在制作方法上一定程度融合了全息光栅^[7-8]、激光直写^[9]及刻划光栅^[10-11]的制作特点。该制作方法具有独特的优势,是大口径光栅制作的发展方向之一。

为补偿工作台的运动误差、完成相邻扫描过程中的干涉条纹相位拼接,Konkola等^[1,12-14]设计了SBIL中的动态相位锁定系统,该系统将测量得到光栅基底的位移量转换为欲曝光光栅的位相移动量,通过控制声光调制器(AOM)的频移改变曝光光束的相位差,使干涉条纹的相移与光栅基底的位移相匹配。干涉条纹周期是相位锁定系统中基底位移与光栅相位之间转换的关键参数,其误差决定了相位锁定系统控制相邻扫描间干涉条纹拼接精度。Montoya^[3]用傅里叶变换的方法计算了周期误差对曝光对比度的影响,并以曝光对比度降低至 $1/e^2$ 为限得出周期误差的容限,但傅里叶变换只是一种近似的方法,对于周期误差较大时不适用。文献^[15]对曝光对比度及光栅掩模刻槽进行了详细分析,但并未提及对光栅衍射波前及刻线误差的影响。由于光栅的衍射波前由曝光刻线误差决定,是评价光栅掩模质量的指标之一,且SBIL系统制作光栅过程中相邻扫描间存在干涉条纹拼接的问题,因此分析光栅的刻线误差十分必要。Chen^[2]计算了步进间隔对曝光刻线误差的影响,但仅分析了步进间隔误差为 15×10^{-6} 时曝光刻线误差的分布,且没有给出曝光刻线误差的变化规律,不具有普适性。本文根据扫描曝光的工作特点以及系统中动态相位锁定的工作原理,建立扫描干涉场曝光系统的曝光模型,旨在通过数值分析得到制作光栅的曝光刻线误差随周期设定误差的变化规律,确定周期设定误差容限,给出由该系统制作的光栅周期变化特点,为SBIL系统制作光栅时,干涉条纹周期的设定精度、衍射波前分析等提供理论指导。

2 SBIL 曝光理论模型

2.1 SBIL 系统干涉条纹的形成及扫描曝光量

扫描干涉场曝光系统采用准直的高斯光束在束腰位置干涉,形成干涉条纹,利用工作台的二维运

动,将干涉条纹曝光在涂有光刻胶的光栅基底上。如图1所示,工作台沿干涉条纹方向的运动方向定义为扫描方向(y 轴),垂直于干涉条纹的方向定义为步进方向(x 轴)。由于曝光光束的能量呈高斯分布,为保证扫描曝光过程中基底上曝光量的均匀性,在相邻两次扫描时能量需要有部分重叠。若基底表面干涉场的束腰半径为 ω ,步进间隔选用 $S=0.8\omega$,重叠曝光的归一化曝光量如图2所示,此时中间部分的曝光量的均匀性高于99.9%。因此通常选择步进间隔 S 小于等于 0.8ω ,以满足曝光均匀性的需求。

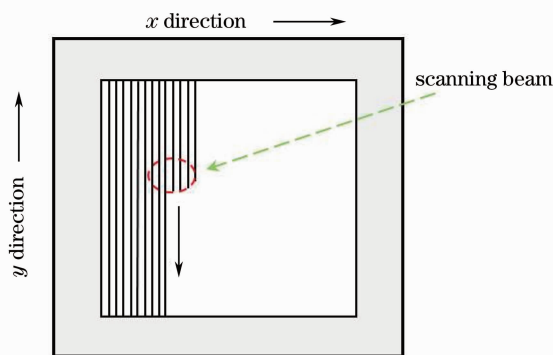


图1 SBIL系统步进扫描示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SBIL system step-and-scanning

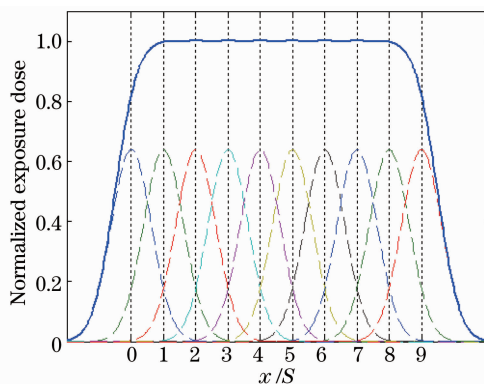


图2 重叠曝光的归一化曝光量

Fig. 2 Normalized exposure dose by beam overlapping

假设基底平面位于 $z=0$ 平面且两侧光束的束腰半径相等,干涉条纹平行于 y 轴,则左右两侧光束在基底平面上的干涉场光强分布均可以表示为

$$I(x, y) = A \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \times \left\{ 1 + \gamma \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \varphi(0)\right] \right\}, \quad (1)$$

式中 A 为常量, ω 为激光束腰半径, $\varphi(0)$ 为 $x=0$ 处的相位, p 为两光束相干形成的干涉条纹周期, γ 为干涉条纹的对比度。

二维运动工作台沿干涉条纹运动的扫描速度为 v ，相邻两次扫描间的步进间隔为 S ，第 n 次扫描光

斑中心位置的横坐标为 $(n-1)S$ ，工作台运动为理想状态时，第 n 次扫描的曝光量可写为

$$D_n(x) = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} I[x - (n-1)S, y] dy = A_{Dn}(x) \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\frac{2\pi}{p} x + \varphi_n(0) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\varphi_n(0)$ 为第 n 次曝光条纹在 $x=0$ 处的相位。

综合(1)、(2)式，计算可得

$$A_{Dn}(x) = A \frac{\omega}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp \left\{ -2 \frac{[x - (n-1)S]^2}{\omega^2} \right\}. \quad (3)$$

系统在经过 N 次步进扫描，光栅基底上光刻胶的总曝光量为 N 个单次扫描曝光的总和，表示为

$$D(x) = \sum_{n=0}^{N-1} D_n(x). \quad (4)$$

2.2 动态相位锁定周期设定误差与曝光刻线相位

SBIL 系统在曝光过程中，利用动态相位锁定的方式实现干涉条纹与工作台的随动及相邻两次扫描间的相位拼接。干涉条纹周期是动态相位锁定过程中至关重要的参数。

假设干涉条纹周期的设定值为 p_s ，与实际干涉条纹周期 p 之间存在一定的误差，可以写为 $p_s = p(1 + \delta p)$ ，即干涉条纹周期在动态条纹锁定的过程中的设定值与实际干涉条纹之间的相对误差为 δp ($\delta p \ll 1$)。当工作台的沿步进方向的位移量为 x 时的动态相位锁定误差为

$$\varphi_{ex} = \frac{2\pi}{p_s} x - \frac{2\pi}{p} x \approx -2\pi \frac{x}{p} \delta p. \quad (5)$$

工作台沿扫描方向运动过程中的动态相位锁定误差可以忽略不计。若相邻两次扫描之间的步进间隔为 S ，则相邻扫描之间的相位拼接误差为

$$\varphi_s = \frac{2\pi}{p_m} S - \frac{2\pi}{p} S \approx -2\pi \frac{S}{p} \delta p. \quad (6)$$

为计算方便，令(2)式中的 $\varphi_1(0) = 0$ ，由(3)式和(6)式可得第 n 次扫描的曝光量为

$$D_n(x) = A_{Dn}(x) \left[1 + \gamma \cos \left(\frac{2\pi}{p} x + \varphi_{en} \right) \right]. \quad (7)$$

式中

$$\varphi_{en} = -\frac{2\pi(n-1)S}{p} \delta p. \quad (8)$$

N 次扫描后光栅基底处的曝光量为单次扫描曝光量的总和，最终可化简为干涉条纹曝光量的标准形式：

$$D(x) = D_B(x) \left\{ 1 + \frac{D_A(x)}{D_B(x)} \cos \left[\frac{2\pi}{p} x + \Phi_e(x) \right] \right\}. \quad (9)$$

由(9)式易得

$$\tan \Phi_e = \frac{\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_{en}}{\left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_{en} \right]}, \quad (10)$$

$$D_A(x) = \gamma \sqrt{\left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_{en} \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_{en} \right]^2}, \quad (11)$$

$$D_B(x) = \sum_{n=1}^N A_{Dn}(x). \quad (12)$$

从(10)~(12)式可以看出， $D_B(x)$ 决定了平均曝光量的均匀性，曝光量与 x 之间的函数关系呈以 $D_B(x) \pm D_A(x)$ 为包络的余弦型分布，曝光的对比如由 $D_A(x)/D_B(x)$ 决定。 $\frac{2\pi}{p} x + \Phi_e(x)$ 代表了曝光条纹的相位， $\Phi_e(x)$ 可以认为是曝光条纹相位与曝光光栅相位名义值之间的偏差。假设由扫描曝光的方式制作的光栅可以完全线性地反映出(10)式中的曝光条纹相位信息，通过对 $\Phi_e(x)$ 进行分析即可得到曝光刻线的相位分布及曝光刻线误差。

3 数值结果与讨论

本系统欲制作周期为 555.6 nm 的平面全息光栅掩模，曝光干涉条纹周期 $p = 555.6$ nm，曝光光束的束腰半径 $\omega = 0.9$ mm，采用的步进间隔 $S = 0.6$ mm。本文对于曝光刻线相位的影响均以此参数进行数值计算和讨论。

3.1 周期设定误差与曝光光栅周期

根据(5)~(12)式，通过数值计算即可得到实际的曝光刻线相位与曝光刻线相位名义值 $\frac{2\pi}{p} x$ 之差 $\Phi_e(x)$ 。 δp 分别为 -300×10^{-6} ， -200×10^{-6} ， -100×10^{-6} ， 0 ， 100×10^{-6} ， 200×10^{-6} ， 300×10^{-6} 时，进行 10 次步进扫描后 $\Phi_e(x)$ 的分布如图 3 所示。

图 3 中横坐标为步进方向的空间位置，纵坐标为 $\Phi_e(x)$ 。从图 3 中可以得到如下结论：

1) 曝光边缘部分的最终曝光量大部分是单次

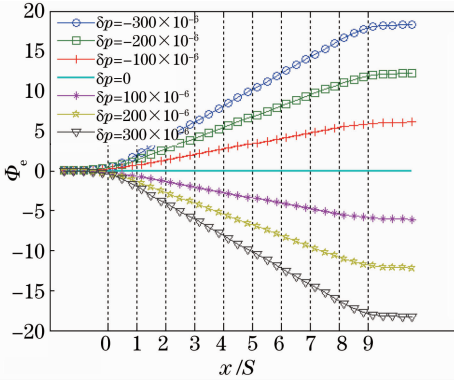


图 3 不同干涉条纹周期设定误差对应的 $\Phi_e(x)$ 分布

Fig. 3 Space distributions of $\Phi_e(x)$ with different interference fringe period setting errors

扫描的结果, 因此曝光边缘部分的 $\Phi_e(x)$ 基本平行于 x 轴, 曝光刻线的周期与干涉条纹周期相等。

2) 当周期设定误差不为 0 时, 曝光中间部分 ($2 < x/S < 7$) 基本呈线性变化, 并且与边缘部分 ($x/S < 0$ 和 $x/S > 9$) 的变化趋势不同, 周期设定误差的大小 $|\delta p|$ 越大, 中间部分的斜率越大, 并关于 $\Phi_e = 0$ 对称。说明曝光光栅的周期与干涉条纹的周期存在偏差, 即周期设定误差的存在改变了重叠曝光部分的曝光光栅周期。

由于 $\Phi_e(x)$ 在扫描曝光的中间部分基本呈线性分布, 对其进行线性拟合, 可以将 $\Phi_e(x)$ 写为

$$\Phi_e(x) = kx + \phi_e(x), \quad (13)$$

式中 k 与重叠曝光后的光栅周期的变化量有关, $\phi_e(x)$ 为曝光刻线相位与理想光栅相位之间的差值, 定义 $\phi_e(x)$ 为曝光刻线误差。通过多组数据的计算整理得到 (13) 式中的斜率 k 与 δp 之间的关系如图 4 所示。

图 4(a) 中横坐标为周期设定误差 δp , 纵坐标为 (13) 式中的斜率 k 。为易于分析, 图 4(b) 中改为以 $\frac{S}{p}\delta p$ 为横坐标, 以 $\frac{k}{2\pi}S$ 为纵坐标。从图 4 中可以看出: 斜率 k 为分段周期性奇函数, 其中的每一段都随 δp 呈线性变化, k 的取值被限定在 $(-\frac{\pi}{S}, \frac{\pi}{S})$ 区间内, 变化周期为 $\frac{S}{p}\delta p = 1$ 。下文将只对一个周期 ($-0.5 < \frac{S}{p}\delta p < 0.5$, 即 $|\delta p| < 463 \times 10^{-6}$) 进行讨论。

从图 4(b) 中可以看出, 变换坐标系后, $\frac{k}{2\pi}S$ 在一个

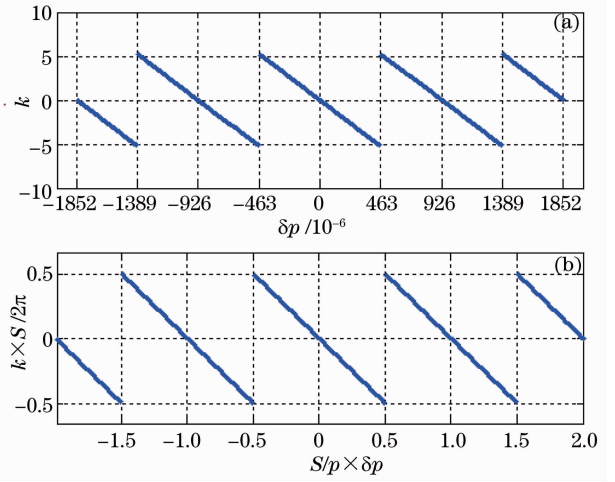


图 4 斜率 k 与周期设定误差 δp 之间的关系图

Fig. 4 Slope ratio k variations with period setting error δp

周期内随 $\frac{S}{p}\delta p$ 的变化比例为 -1 , 由此可以得到

$$k = -\frac{2\pi}{p}\delta p, \quad \left| \frac{S}{p}\delta p \right| < 0.5. \quad (14)$$

将 k 代入 (12)、(13) 式, 并根据 $p_s = p(1 + \delta p)$, 得到

$$D(x) = D_B(x) \left\{ 1 + \frac{D_A(x)}{D_B(x)} \cos \left[\frac{2\pi}{p_s} x + \phi_e(x) \right] \right\}. \quad (15)$$

从 (15) 式可以看出, 当动态相位锁定过程中的周期设定值为 p_s ($|\frac{S}{p}\delta p| < 0.5$) 时, 通过重叠扫描曝光, 中间部分的曝光光栅周期不再是干涉条纹周期 p , 而是变为设定周期 p_s 。这说明通过改变动态相位锁定时周期参数的设定, 就可以改变欲制作光栅的周期, 重要的是可以得到以扫描曝光的方式制作出光栅周期的精确值。但是这种改变光栅周期的方法的使用范围很小, 比较受限。下面将分析周期设定误差的其他影响, 并给出光栅周期的可变范围。

3.2 周期设定误差与曝光刻线误差

动态相位锁定时的周期设定误差不仅会改变曝光光栅的周期, 还会带来曝光刻线误差的变化, 即 (15) 式中的 $\phi_e(x)$, 分别将图 3 中的曲线减去 (14) 式中的斜率值, 得到不同周期设定误差对应应在 ($2 < x/S < 7$) 区间内的曝光刻线误差如图 5 所示。

图 5 中以 $\frac{\phi_e}{2\pi}p$ 作为纵坐标, 即根据光栅周期将刻线误差换算为长度单位。从图 5 中可以得到如下结论:

- 1) 曝光刻线误差 $\frac{\phi_e}{2\pi}p$ 的变化幅度随 $|\delta p|$ 的增

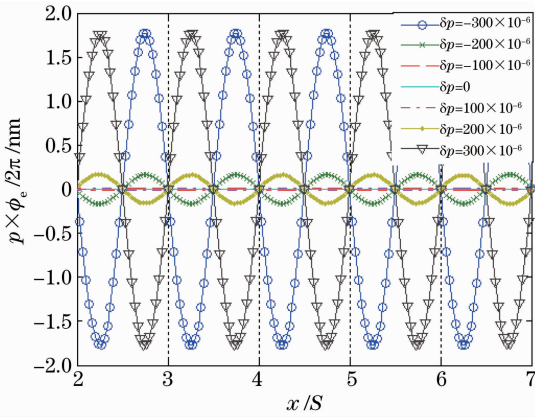


图 5 不同周期设定误差对应的曝光刻线误差空间分布

Fig. 5 Space distributions of printed errors with different period setting errors

大而明显增大,说明重叠曝光部分两次的干涉条纹相位的不匹配增大了曝光刻线误差。

2) 当 $|\delta p| \leq 300 \times 10^{-6}$ 时,光栅的刻线误差幅值均可控制在纳米量级,假设基底为理想面形时,由 SBIL 方式制作的光栅可以得到纳米级的衍射波前。这与传统的静态曝光相比,在衍射波前上具有极大的优势,尤其是在制作的大面积光栅时,此优势更为明显。

3) 曝光刻线误差在空间呈周期性变化,周期为 $x=S$,即步进扫描的周期。说明当动态相位锁定的周期设定与干涉条纹周期之间存在偏差时,光栅会产生周期性的刻线误差。而周期性的刻线误差会产生罗兰鬼线。一级罗兰鬼线的强度可写为^[16]

$$P_r = \left(\frac{\pi m \delta}{p} \right)^2. \quad (16)$$

通过计算可知当 $\delta=1 \text{ nm}$, $m=1$ 时, $P_r=3.2 \times 10^{-5}$ 时,若要求制作的光栅的鬼线强度控制在 10^{-5} 量级,则曝光刻线误差振幅需控制在亚纳米量级。

4) 图 5 中的数据倾斜量已经完全除去,进一步验证了(14)式计算的正确性。

周期性的刻线误差幅值 δ 与周期设定误差之间的关系如图 6 所示。其中图 6(b)为图 6(a)中 $\delta < 1 \text{ nm}$ 部分的放大。从图 6(a)中可以看出,当 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.3$,即 $|\delta p| < 278 \times 10^{-6}$ 时,可以使得周期性的刻线误差小于 1 nm ,满足对鬼线强度的要求。

3.3 周期设定误差与曝光对比度

周期设定误差会带来相邻扫描间干涉条纹之间的拼接误差,因此会降低最终的曝光对比度。曝光对比度的定义为

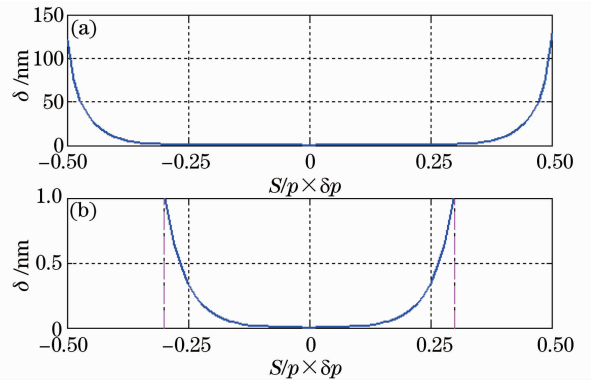


图 6 周期性刻线误差振幅随周期设定误差的变化曲线

Fig. 6 Amplitude of periodic printed error variations with period setting errors

$$\Gamma_D = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}, \quad (17)$$

式中 D_{\max} 和 D_{\min} 分别代表最大曝光量和最小曝光量。将(9)~(12)式代入(17)式并整理得

$$\Gamma_D(x) = \frac{D_A(x)}{D_B(x)}. \quad (18)$$

扫描曝光的方式与传统的全息曝光不同,不同位置的对比度不同,因此整个光栅基底处的曝光对比度用 $\Gamma_D(x)$ 表示。将(3)、(8)~(12)式代入(18)式计算得到曝光对比度与周期设定误差之间的关系,如图 7 所示。图中的阴影部分表示对于一定的周期设定误差,基底上不同位置曝光对比度的变化范围。

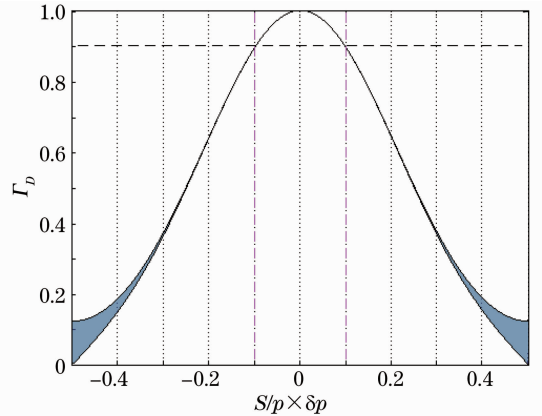


图 7 曝光对比度随周期设定误差的变化曲线

Fig. 7 Dose contrast variations with period setting error

当显影条件既定时,曝光对比度控制在 0.9 以上,易于控制光栅刻槽的占宽比^[17]。从图 7 中可以看出,当 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.5$ 时,随着 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right|$ 的增大,曝光对比度 $\Gamma_D(x)$ 在逐渐降低的同时,基底上不同位置

的曝光对比度的均匀性也逐渐变差。且当 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.1$ 时,曝光对比度 $\Gamma_D > 0.9$,曝光对比度均匀。因此,为保证系统对曝光对比度高于 0.9 的要求,需要保证 $\frac{S}{p} \delta p$ 在 $(-0.1, 0.1)$ 区间内。

综上所述,为保证曝光对比度大于 0.9、周期性刻线误差小于 1 nm 的系统要求,周期设定误差 δp 需要保证 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.1$,即 $|p_s - p| < 51.4 \text{ pm}$ 。在满足系统对曝光对比度、周期性刻划误差的前提下,通过改变周期设定值的方式改变制作光栅周期的最大范围为 102.8 pm。

4 实验验证

为验证上述理论计算的结果,利用现有的扫描曝光系统做了相关验证性曝光实验。曝光光源采用波长为 413.1 nm 的氦离子激光器,选择合适的激光功率和扫描速度对曝光量进行控制,用 ShipleyS1805 光刻胶记录曝光干涉条纹。

根据文献[2]中给出的周期测量方法,在曝光实验之前对干涉条纹周期进行多次测量,得到的平均值为 555.648 nm,假设此值为单个干涉光斑内的条纹周期的真值。为保证制作的一致性,在同一光栅基底上的不同区域分 9 组进行扫描曝光,光栅基底

面形优于 $\lambda/6$,可以满足曝光要求。各组在曝光时动态条纹锁定中的周期设定值如表 1 所示,曝光显影等其他工艺条件均保持一致。曝光的光栅如图 8 所示。图 8 中第 8 组和第 9 组光栅表面显现出明显的不均匀,对应误差 $\frac{S}{p} \delta p$ 分别为 $-0.366, -0.468$ 。这是由图 7 中所示的曝光对比度的不均匀导致的。用 Zygo 干涉仪对图 8 中光栅的衍射波前进行检测,测得的干涉图如图 9(a)所示,波前如图 10(a)所示。由于 9 组光栅在同一干涉图中给出,使得图 10 中的波前看似比较大,实际上每组光栅内的波前均接近平面。

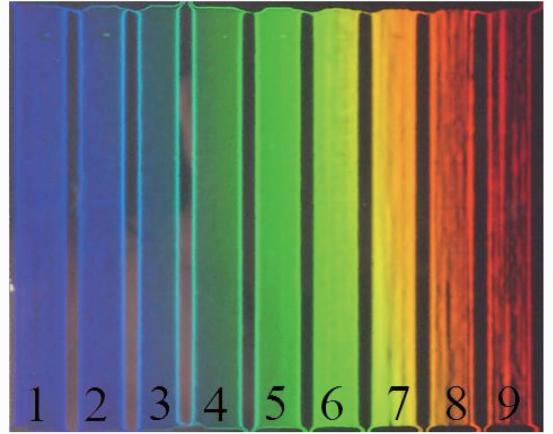


图 8 曝光光栅照片

Fig. 8 Photograph of lithography grating

表 1 每组光栅周期设定参数

Table 1 Period setting values of each grating

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_s/nm	555.75	555.716	555.68	555.648	555.614	555.562	555.51	555.46	555.407
$\delta p / 10^{-6}$	183	122	61	0	-61	-156	-250	-339	-433
$S/p \times \delta p$	0.198	0.132	0.066	0	0.066	0.168	0.27	0.366	0.468

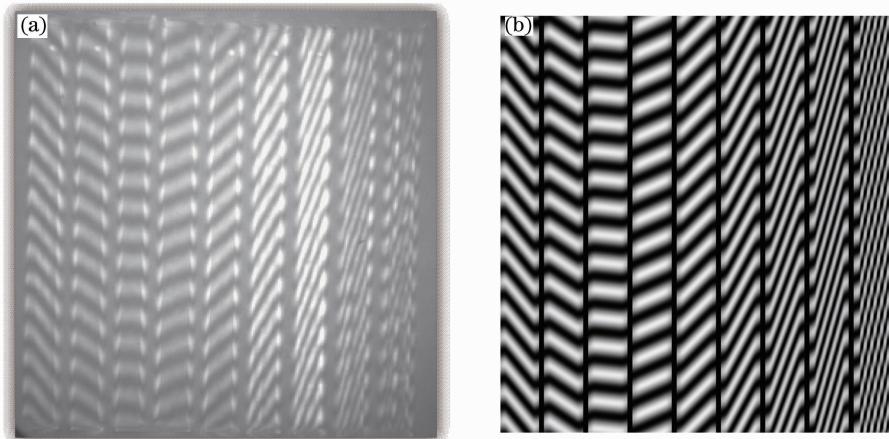


图 9 (a)光栅衍射波前干涉图与(b)模拟干涉图的对比

Fig. 9 (a) Interferogram of grating diffraction wavefront compared with (b) simulation interferogram

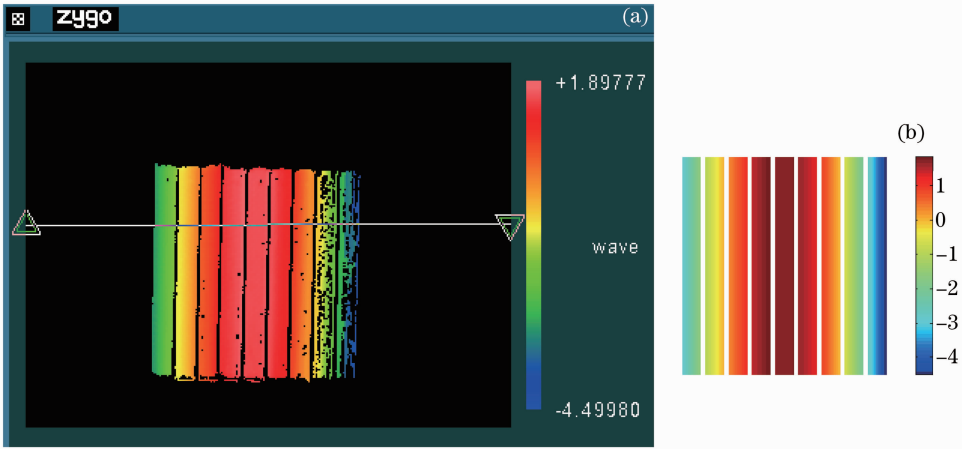


图 10 (a) Zygo 干涉仪测得的光栅衍射波前和(b)模拟值之间的对比

Fig. 10 Contrast between (a) grating diffraction wavefront map measured by Zygo and (b) simulated result

根据光栅的衍射特性^[18]可知,对于相同的入射光(波矢沿 x 方向的分量为 k_x),第 m 级光栅衍射光沿光栅矢量方向的波矢 k_{xm} 与光栅周期 p_g 有关,可表示为

$$k_{xm} = k_x + m \frac{2\pi}{p_g}. \quad (19)$$

由前面的分析可知,当设定不同的周期值 p_s 时,曝光的光栅周期会随之改变,且当周期设定值与干涉条纹名义值不同时会产生刻线误差 $\phi_e(x)$ 。结合(19)式可知,由 Zygo 干涉仪发出的平面波,经图 8 中各组光栅衍射后,各组光栅衍射光波矢沿 x 方向分量均不相同,反映至干涉图中即为各组的干涉条纹方向不同,结合由刻线误差 $\phi_e(x)$ 产生的波前差,即可模拟得到 Zygo 干涉仪测量所得的干涉图和波前,如图 9(b)和图 10(b)所示。

对比图 9 和图 10 可以看出,理论模拟结果和实测值之间有较好的一致性。从干涉图中可以明显看出各组光栅之间周期的变化,验证了前面分析得到的曝光光栅周期随设定值改变的结论。由于周期设定误差较小($\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.3$)时,周期性的刻线误差为纳米量级,目前没有合适的方法对此进行测量。而周期设定误差较大($0.3 < \left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.5$)时,周期性刻线误差增大,但由于拼接部分曝光对比度的降低,拼接部分难以制作出完整的光栅,因此在干涉图上难以观察到周期性刻线误差。但扫描曝光周期随周期设定值改变是前面理论推导并引申得到的结论,对其进行验证证明了理论模型的正确性,也间接证明了周期性刻线误差的存在。

5 结 论

为得到 SBIL 系统制作光栅的衍射波前特征,根据 SBIL 的工作特点,建立了 SBIL 的曝光数学模型,分析了相位锁定系统中周期设定误差对曝光刻线误差、曝光光栅周期及曝光对比度的影响,并进行了相关实验验证,可得到如下结论:1)相位锁定系统中的周期设定误差会影响扫描曝光后的光栅周期,当 $\left| \frac{S}{p} \delta p \right| < 0.5$ 时,曝光光栅周期等于周期设定值 p_s 。考虑到光栅后续制作工艺易于控制,要求曝光对比度大于 0.9。对于干涉条纹周期为 555.6 nm,步进间隔为 0.6 mm 的技术参数,曝光光栅周期的可变范围限定在 $|p_s - p| < 51.4$ pm 区间内。2)周期设定误差会带来周期性的刻线误差,但当 $|\delta p| < 278 \times 10^{-6}$ 时,周期性刻线误差小于 1 nm,可满足制作光栅的鬼线强度控制在 10^{-5} 量级的要求。3)理论上利用扫描曝光的方式制作的光栅衍射波前峰谷值易于控制在纳米量级,此特点在制作大面积光栅时与传统的静态曝光方式相比具有极大优势。4)实验结果与理论计算间有较好的一致性,说明理论模型合理,对 SBIL 系统制作光栅时衍射波前的控制具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 P T Konkola. Design and Analysis of a Scanning Beam Interference Lithography System for Patterning Gratings with Nanometer-Level Distortions [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 2 C G Chen. Beam Alignment and Image Metrology for Scanning Beam Interference Lithography: Fabricating Gratings with Nanometer Phase Accuracy [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 3 J Montoya. Toward Nano-accuracy in Scanning Beam

- Interference Lithography [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- 4 Bin Yu, Wei Jia, Changhe Zhou, *et al.*. Grating imaging scanning lithography [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(8): 080501.
 - 5 Qian Guolin, Wu Jianhong, Chen Xinrong, *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1943—1946.
钱国林, 吴建宏, 陈新荣, 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1943—1946.
 - 6 He Kai, Liu Shijie, Hou Yongqiang, *et al.*. Broadband and high resolution spectral measurement technique for pulse compression gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1005002.
何 凯, 刘世杰, 侯永强, 等. 用于脉冲压缩光栅的宽带高分辨率光谱测量技术 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1005002.
 - 7 Qian Guolin, Li Chaoming, Chen Xinrong, *et al.*. Error analysis of holographic mosaic gratings [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 747—751.
钱国林, 李朝明, 陈新荣, 等. 全息拼接光栅的误差研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(6): 747—751.
 - 8 Qian Guolin, Wu Jianhong, Li Chaoming. The analysis of wave aberration of meter-sized mosaic-grating made in holographic exposure system [J]. *Laser Journal*, 2013, 34(5): 16—18.
钱国林, 吴建宏, 李朝明. 米级光栅全息曝光拼接系统像差分析 [J]. *激光杂志*, 2013, 34(5): 16—18.
 - 9 Li Fengyou. Study on Technology of Laser Direct Writing Photolithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
李凤有. 激光直写光刻技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
 - 10 Chen Kewei, Yu Hongzhu, Zhang Shanwen, *et al.*. Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2900—2905.
陈科位, 于宏柱, 张善文, 等. 大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2900—2905.
 - 11 Cai Jinda, Wang Ying, Yan Tingmeng, *et al.*. Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2417—2423.
蔡锦达, 王 英, 颜廷萌, 等. 衍射光栅刻划机的闭环控制系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2417—2423.
 - 12 J C Montoya, C H Chang, R K Heilmann, *et al.*. Doppler writing and linewidth control for scanning beam interference lithography [J]. *J Vac Sci Technol B*, 23(6): 2640—2645.
 - 13 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.
 - 14 R K Heilmann, P T Konkola, C G Chen, *et al.*. Digital heterodyne interference fringe control system [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2001, 19(6): 2342—2346.
 - 15 Jiang Shan, Bayanheshig, Song Ying, *et al.*. Effect of measured interference fringe period error on groove profile of grating masks in scanning beam interference lithography system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0405003.
姜 珊, 巴音贺希格, 宋 莹, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期测量误差对光栅掩模槽形的影响 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0405003.
 - 16 Zhu Shaoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng, *et al.*. Diffraction Gratings [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 112—115.
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. 112—115.
 - 17 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Profile evolution of grating masks according to exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 0305001.
韩 建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 0305001.
 - 18 Bayanheshig. The Study on The Dispersion Theory, Design, Manufacture, and Efficiency Test of Diffraction Gratings [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. 43—45.
巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检测方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004. 43—45.

栏目编辑: 史 敏