

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

姜 珊^{1,2} 巴音贺希格¹ 宋 莹^{1,2} 潘明忠¹ 李文昊¹

(¹ 中科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干涉条纹周期的测量误差是影响曝光过程中相位拼接的主要因素。为制作符合离子束刻蚀要求的高质量光栅掩模,建立了条纹周期测量误差与扫描曝光对比度关系的数学模型,利用光刻胶在显影过程中的非线性特性,建立了扫描干涉场曝光光栅的显影模型,给出了光栅掩模槽形随周期测量误差的变化规律,并进行了实验验证。结果表明:周期测量误差不仅会使掩模槽形变差,还会引起槽形在空间上的变化。在周期测量的相对误差一定时,相位拼接误差与相邻扫描间的步进间隔成正比,与干涉条纹周期成反比。在显影条件一定、曝光光束束腰半径 1 mm、曝光步进间隔 0.8 mm、曝光线密度 1800 gr/mm 时,周期测量误差控制在 139 ppm 以内,理论上可以制作槽底洁净无残胶、槽形均匀的光栅掩模。

关键词 光栅;扫描干涉场曝光系统;周期测量误差;槽形

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.0405003

Effect of Measured Interference Fringe Period Error on Groove Profile of Grating Masks in Scanning Beam Interference Lithography System

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

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract Measured interference fringe period error has a major effect on the phase stitching error in scanning beam interference lithography system. In order to make high quality grating masks which can meet the requirement of the ion beam etching, mathematical model of the relationship between measured fringe period error and dose contrast is established. Based on the photoresist nonlinearities in developing process, the developing model of grating masks made by scanning beam interference lithography system is built. According to this model, variation of groove profile with measured fringe period error is given. Experiments are done to verify this model. It shows that: measured fringe period error makes groove profile worse and varies in space domain. With a certain measured fringe period error, phase stitching error between scans is proportional to step over distance and inversely proportional to fringe period. When interference beam waist radius is 1 mm, step over distance is 0.8 mm and grating line density is 1800 gr/mm, with certain developing conditions, measured fringe period error must be less than 139 ppm to make grating masks with bottom clean without residue and groove uniform.

Key words grating; scanning beam interference lithography system; measured fringe period error; groove profile

OCIS codes 220.3740; 050.2770; 090.7330

收稿日期: 2013-09-04; 收到修改稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项(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,研究员,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(通信联系人)

1 引 言

扫描干涉场曝光(SBIL)^[1-3]系统是制作大尺寸脉冲压缩光栅掩模的一种方法,在一定程度上融合了刻划光栅^[4-6]与全息光栅^[7-8]的制作特点,其原理为两束高斯激光束通过口径不大的光学系统后在束腰处相叠加形成干涉条纹,并以二维精密工作台步进扫描的方式将该干涉条纹记录于涂有光刻胶的基底上,制作高精度大面积平面全息光栅掩模。由于激光光束空间强度为高斯分布,SBIL 为保证整个光栅基底表面曝光的均匀性,相邻两次扫描间需有部分重叠^[2]。重叠部分的相位拼接误差会带来曝光对比度下降,从而影响掩模线宽^[3]。

Konkola 等^[1,9]设计了 SBIL 中的相位锁定系统,利用声光调制器(AOM)产生基底上相干光束的相位差,实现了曝光过程中干涉条纹相位与光栅基底的随动。干涉条纹周期是根据基底位移量控制相干光束相移的主要参数,初始的光栅周期测量误差会使 AOM 控制的实际相移量与预先设定的相位名义值间有一定的偏差,使相邻扫描间存在拼接误差,从而带来曝光对比度的下降。Montoya^[3]用傅里叶变换的方法计算了曝光对比度与周期误差间的关系,并以曝光对比度减小至 $1/e^2$ 为限计算得出周期误差的容限。但利用傅里叶变换的方法只能得到曝光对比度与周期误差间的近似关系式,而当周期误差较大时,步进扫描后的曝光对比度在空间会呈现明显的周期性分布。对于 SBIL 系统,最终关心的是光栅掩模的质量。为降低离子束刻蚀^[10]工艺的

技术难度,光栅掩模应做到具有特定占宽比和槽深,且槽底干净无残胶、侧壁陡直的矩形刻槽。因此,从光栅掩模槽形出发,计算得到周期测量误差容限是十分必要的。

另外,文献[3,11]中以二值光刻胶模型为基础讨论了对比度、曝光量与占宽比之间的关系。二值光刻胶模型在光刻胶较薄时,可以粗略计算占宽比与对比度的关系,但无法给出槽深和槽形侧壁倾角与曝光量及对比度间的关系。韩建等^[12]利用光刻胶显影时的非线性特性,给出掩模槽形随曝光量 and 对比度的变化规律,但其未考虑光刻胶在显影过程中的溶解速度方向的变化,在计算掩模槽形时会与实际值有一定的偏差。因此,考虑到光刻胶在显影过程中溶解速度的变化^[13],本文拟建立扫描干涉场曝光光栅的显影模型,旨在通过数值分析得到掩模槽形占宽比、槽深和侧壁倾角随光栅周期测量误差的变化规律。这对利用 SBIL 系统制作全息光栅时,周期测量精度设定、掩模槽形控制等提供理论指导。

2 SBIL 曝光光栅掩模形成的数学模型

2.1 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,曝光在涂有光刻胶的光栅基底上。高斯光束在束腰位置的波前为平面,假设基底平面位于 $z=0$ 平面且两侧光束的束腰半径相等,则左右两侧光束在基底平面上电场 E_L 和 E_R 分布可写为以下形式^[14]

$$\begin{cases} E_L = A_L \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\sin \theta_L}{\lambda} x + j\varphi_{L0}\right) \hat{y} \\ E_R = A_R \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{\sin \theta_R}{\lambda} x + j\varphi_{R0}\right) \hat{y} \end{cases} \quad (1)$$

则两光束相干叠加后的光强分布可写为

$$I(x, y) = \|A_L(x, y)\|^2 + \|A_R(x, y)\|^2 + 2A_L(x, y)A_R(x, y) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} A_L(x, y) = A_L \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \\ A_R(x, y) = A_R \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right), \\ p = \frac{\lambda}{\sin \theta_L + \sin \theta_R} \end{cases} \quad (3)$$

p 为两光束相干形成的干涉条纹周期。

$$I(x, y) = A \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \times \left\{ 1 + \gamma_0 \cos\left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi(0)\right] \right\}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} A = A_L^2 + A_R^2 \\ \gamma_0 = \frac{2A_L A_R}{A} \end{cases} \quad (5)$$

工作台沿 y 轴扫描,扫描速度为 v ,工作台运动

为理想状态时, 单次扫描的曝光量可写为

$$D_1(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dt = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dy. \quad (6)$$

将(4)式代入(7)式得

$$D_1(x) = A \frac{\omega}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-2 \frac{x^2}{\omega^2}\right) \times \left\{1 + \gamma_0 \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \varphi_1(0)\right]\right\}. \quad (7)$$

相邻扫描间的步进间隔为 S 时, 第 n 次扫描的曝光量可写为

$$D_n(x) = A_{Dn}(x) \left\{1 + \gamma_0 \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \varphi_n(0)\right]\right\}, \quad (8)$$

式中

$$A_{Dn}(x) = A \frac{\omega}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left\{-2 \frac{[x - (n-1)S]^2}{\omega^2}\right\}. \quad (9)$$

N 次扫描后的在光栅基底上光刻胶的曝光量为单次扫描曝光的总和

$$D(x) = \sum_{n=0}^{N-1} D_n(x). \quad (10)$$

2.2 周期测量误差与曝光对比度

SBIL 系统在曝光过程中, 利用相位锁定^[15]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。假设干涉条纹周期的测量值为 p_m , 相对误差为 δp ($\delta p \ll 1$), 即 $p_m = p(1 + \delta p)$, 以 p_m 作为动态相位锁定的周期参数, 工作台的位移为 x 时, 由相位锁定系统控制 AOM 的目标相移量为^[1]

$$\varphi_{xm} = \frac{2\pi}{p_m}x. \quad (11)$$

而实际由于工作台位移而产生的相位移动为

$$\varphi_x = \frac{2\pi}{p}x. \quad (12)$$

在相位锁定和工作台二维运动均为理想的情况下, 相邻两次扫描之间的相位拼接误差为

$$\varphi_S = \frac{2\pi}{p_m}S - \frac{2\pi}{p}S \approx -2\pi \frac{S}{p} \delta p. \quad (13)$$

为计算方便, 令(7)式中的 $\varphi_1(0) = 0$, 设

$$\varphi_n = -\frac{2\pi(n-1)S}{p} \delta p. \quad (14)$$

则第 n 次扫描的曝光量可写为

$$D_n(x) = A_{Dn}(x) \left[1 + \gamma_0 \cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \varphi_n\right)\right]. \quad (15)$$

N 次扫描后光栅基底处中的曝光量为单次扫描曝光量的总和, 可写为

$$D(x) = \sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) + \gamma_0 \sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \left[\cos \varphi_n \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) - \sin \varphi_n \sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right)\right]. \quad (16)$$

对上式化简为如下形式

$$D(x) = D_B(x) + D_A(x) \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \varphi_e(x)\right], \quad (17)$$

式中

$$\begin{cases} D_B(x) = \sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \\ D_A(x) = \gamma_0 \sqrt{\left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_n\right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_n\right]^2}, \\ \tan \varphi_e = \frac{\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_n}{\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_n} \end{cases} \quad (18)$$

式中 $\varphi_e(x)$ 为 N 次扫描曝光后曝光量的相位与理想相位的偏差, $D_B(x)$ 为光刻胶平均曝光量, 由于 $D_B(x)$ 和 $D_A(x)$ 的变化频率远小于干涉条纹的频率, 则光栅基底处的曝光对比度可写为

$$\Gamma_D(x) = \frac{D_{\max}(x) - D_{\min}(x)}{D_{\max}(x) + D_{\min}(x)} = \frac{D_A(x)}{D_B(x)}. \quad (19)$$

在扫描干涉曝光中, 由于周期测量误差的存在,

曝光对比度不再是常量, 而是以坐标 x 为自变量的函数。

2.3 光刻胶感光及显影模型

光刻胶显影模型可基于以下两个假设^[13]: 1) 在显影条件一定时, 光刻胶上某点上显影时的溶解速率取决于该点处激发分子的浓度; 2) 显影时光刻胶溶解速度的方向总是垂直于光刻胶表面。

光栅基底上的光刻胶感光分子会由于曝光量的变化而使激发分子的浓度发生变化,进而影响光栅基底光刻胶在显影液中的溶解速率发生变化。未激发分子浓度与光刻胶上的曝光量 D 之间的关系为^[16]

$$M = \exp(-\alpha_0 D), \quad (20)$$

式中 α_0 为与光刻胶有关的常数。光刻胶激发分子的溶解速率与曝光量、显影液浓度、显影温度、光刻胶类型和前烘温度等均有关,光刻胶溶解速率的关系可写为^[17]

$$v(D) = v_{\max} \frac{(\beta + 1)(1 - M)^n}{\beta + (1 - M)^n} + v_{\min}, \quad (21)$$

式中 $\beta = \frac{n+1}{n-1}(1 - M_{\text{th}})^n$, M_{th} 为未激发分子比例常数, n 为曲线拟合参数。韩建等^[18] 给出实验测量 S1805 光刻胶在不同显影条件下的曲线拟合参数,选用显影液浓度 1:6, 温度 20 °C, 此时各参数分别为: $\alpha_0 = 0.019$, $n = 7$, $M_{\text{th}} = 0.75$, $v_{\min} = 0.3 \text{ nm/s}$, $v_{\max} = 20 \text{ nm/s}$ 。从而得到光刻胶溶解速率与曝光量 D 之间的关系如图 1 所示。

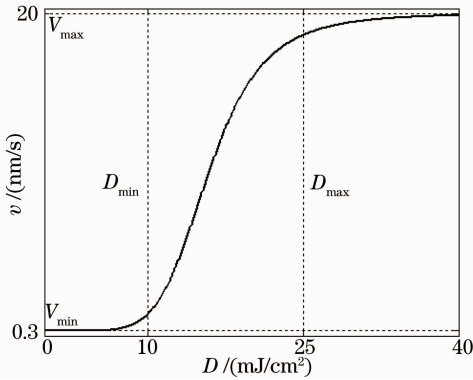


图 1 光刻胶(S1805)溶解速率曲线

Fig. 1 Plot of photoresist dissolution rate (S1805)

从图 1 中可以看出,光刻胶的溶解速率具有显著的非线性特性,光刻胶的这种非线性特性对制作矩形或梯形光栅是非常有利的^[19]。若基底上光刻胶厚度为 H , 显影时间为 t , 为保证显影后基底上的光刻胶露底, 曝光须大于一定的曝光量 D_c , 定义其为截止曝光量, 满足条件 $v(D_c) = H/t$ 。通过改变显影时间, 即可改变截止曝光量的大小。通常将截止曝光量 D_c 调整至光刻胶溶解速率曲线的线性区域 ($D_{\min} < D_c < D_{\max}$)^[12], 下面的讨论中令 $D_c = 20 \text{ mJ/cm}^2$ 。

3 数值结果与讨论

在扫描曝光的过程中, 为保证光栅基底光刻胶上曝光量的均匀性, 采用重叠扫描的方式曝光。本

系统欲制作的光栅线密度 1800 gr/mm, 光栅基底表面相干高斯光束的束腰半径为 1 mm, 采用步进间隔 $S = 0.8 \text{ mm}$ 。在该步进间隔下, 重叠后中间部分的曝光量均匀性高于 99.9%, 如图 2 所示。本文对于周期误差对槽形的影响均基于此参数进行计算和讨论。

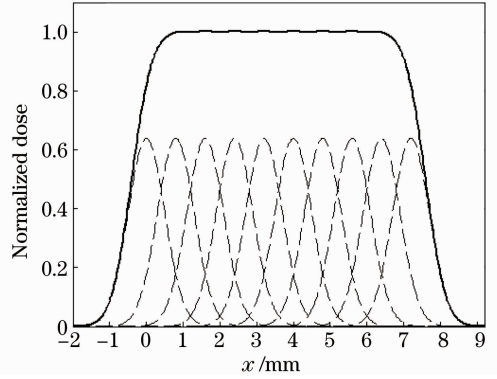


图 2 重叠曝光均匀性示意图

Fig. 2 Beam overlapping to create a uniform exposure dose

3.1 周期测量误差对曝光对比度的影响分析

干涉场中干涉条纹的周期测量误差是相邻扫描间相位存在拼接误差的主要原因, 而拼接部分干涉条纹的相位不匹配会对曝光的对比度造成一定的影响。由(13)~(19)式的推导结果可以计算出在不同的周期测量误差下曝光对比度的空间分布, 如图 3 所示。

图 3 为十次扫描后不同周期测量误差下曝光对比度的分布, 图中的横坐标为空间位置, 为便于观察, 横坐标为位置坐标 x 与步进间隔 S 之间的比值, 即横坐标以步进间隔为单位。纵坐标为曝光对比度 Γ_D 与单次扫描的对比度 γ_0 的比值。从图 3 中可以得到如下结论:

1) 当周期测量误差为 0 时 ($\delta_p = 0$), 曝光对比度 Γ_D 与单次扫描对比度 γ_0 相等, 即此时曝光对比度取决于单次扫描的对比度;

2) 当周期测量误差不为 0 时, 步进扫描边缘处 ($x < 0$ 和 $x > 9S$) 的曝光对比度高于中间部分 ($S < x < 8S$)。说明存在周期测量误差时, 相邻扫描的叠加降低了曝光对比度;

3) 从图 3(a)中可以看出, 在周期测量的相对误差为 0~300 ppm 时, 周期测量误差越大, 曝光对比度越小; 从图 3(b)中可以看出, 在周期测量的相对误差为 400~700 ppm 时, 周期测量误差越大, 曝光对比度越大。说明曝光对比度的大小随周期测量误

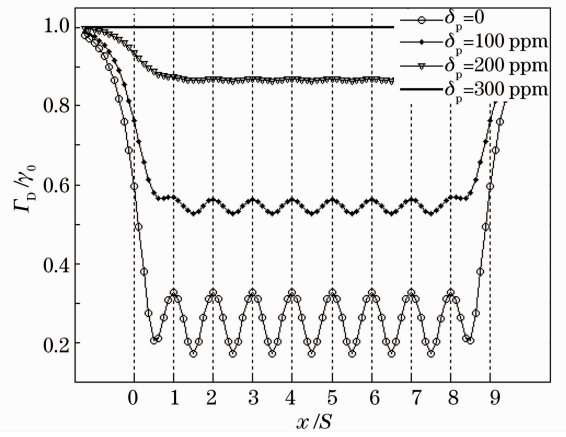
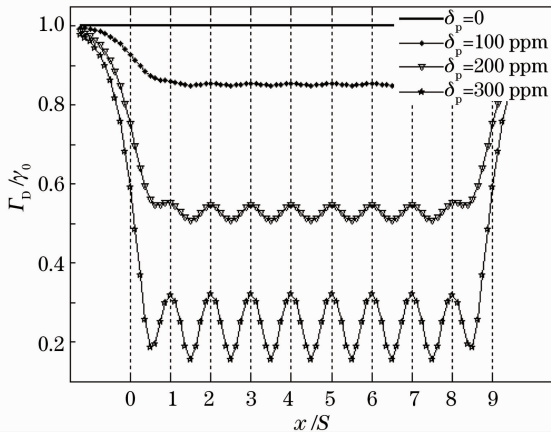


图 3 不同周期测量误差下曝光对比度的空间分布

Fig. 3 Space distribution of dose contrast with different measured fringe period errors

差的变化并不单调；

4) 由于周期测量误差的存在,曝光对比度在中间部分($S < x < 8S$)并不是均匀分布的,而是随坐标 x 呈正弦形变化,变化周期为步进间隔 S 。对于不同的周期测量误差,在曝光对比度减小的同时,对比度正弦变化的幅度却在变大,即曝光对比度的空间均匀性变差。

曝光对比度在空间分布的不均匀,会引起光栅掩模的槽形在空间上发生变化,从而影响光栅掩模的表面质量和光栅衍射效率。图 4 给出曝光对比度及其变化范围与周期测量误差之间的关系。

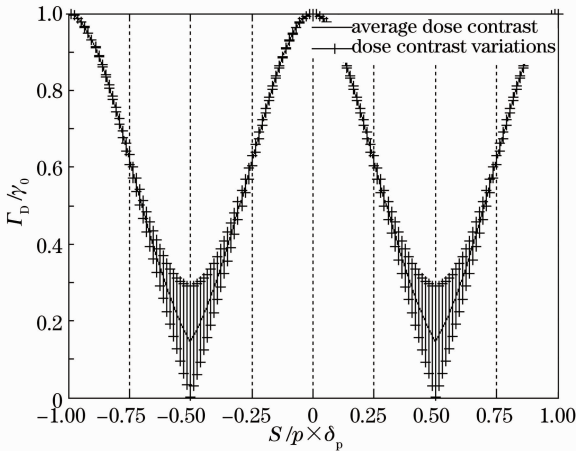


图 4 曝光对比度及变化量随周期测量误差的变化曲线
Fig. 4 Dose contrast and contrast variations with different measured fringe period

为便于分析,图 4 中横坐标用 $S/p \times \delta_p$ 表示,由(12)式可知, $S/p \times \delta_p$ 表示相邻两次扫描拼接时相差的条纹数。图 4 中的竖线表示出了周期测量误差一定时,光刻胶上曝光对比度在空间不同位置处的变化范围。图 5 给出曝光对比度相对变化量随周期测量误差变化的关系图。从图 4 和图 5 中不难看出,

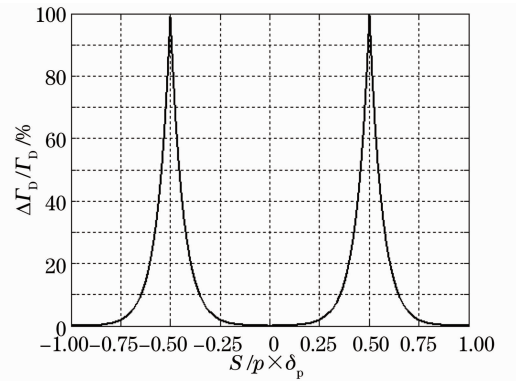


图 5 曝光对比度在空间上相对变化量与周期测量误差间的关系曲线

Fig. 5 Relationship between dose contrast relative variations and measured fringe period

曝光对比度随周期测量误差的变化具有周期性,且周期内关于中线对称,变化周期为 $S/p \times \delta_p = 1$,即相邻两次扫描拼接误差每变化一个条纹,曝光对比度变化一个周期。但是一般情况下,对周期的测量具有一定的不确定度,只能控制在一定的范围内,因此对上述的一个周期内 ($|S/p \times \delta_p| \leq 0.5$) 分析曝光对比度随周期测量误差变化规律更具实际意义。当 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,曝光对比度的空间相对变化量 $\Delta\Gamma_D/\Gamma_D$ 随周期测量误差的变化较小,曝光对比度相对变化仅 1%,当 $0.2 < |S/p \times \delta_p| < 0.5$ 时, $\Delta\Gamma_D/\Gamma_D$ 随周期测量误差绝对值的增大而迅速增大。

3.2 周期测量误差对槽形的影响

由上面的分析可知,周期测量误差不仅会引起曝光对比度的降低,还会引起对比度在空间上的变化,根据光刻胶的感光及显影特性可知,曝光对比度的变化会引起掩模槽形的变化。假设单次扫描曝光对比度 $\gamma_0 = 1$,光栅基底上的初始胶厚 $H = 500$ nm,

利用 2.3 节中所述的光刻胶显影模型,通过计算得到平均曝光量为 $0.6D_C$ 时,不同对比度对应的槽形如图 6 所示。从图中可以看出,不同的曝光对比度对应的槽深、槽形占宽比和侧壁倾角均不相同。结合 2.2 节中所述周期测量误差与曝光对比度间的关系,即可建立 SBIL 系统曝光显影的模型。下面分别讨论周期测量误差对槽深、槽形占宽比和侧壁倾角的影响。

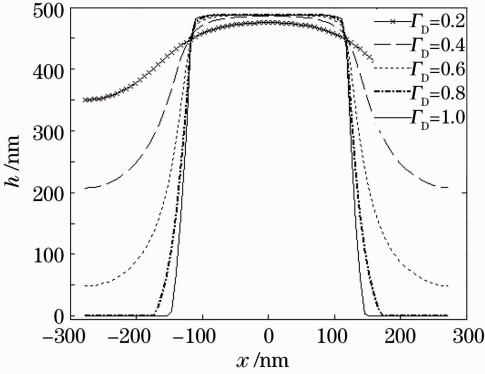


图 6 平均曝光量 $D_B=0.6D_C$ 时,不同曝光对比度对应的槽形

Fig. 6 Groove profiles with different dose contrast for the average dose ($D_B=0.6D_C$)

1) 周期测量误差对槽深的影响

光栅掩模的槽深决定了离子束刻蚀可获得的最大槽深,因此槽深是光刻胶光栅掩模制作的最重要的指标之一,必须加以严格控制。曝光对比度的变化会带来光栅掩模槽深的变化,使得光栅各个部分的槽深不一致。槽深的变化是由曝光对比度的变化引起的,因此槽深与曝光对比度应有相同的周期性和对称性的变化规律。通过计算得到平均曝光量 D_B 不同时,槽深随周期测量误差的变化曲线如图 7 所示。

图 7 为一个对比度变化周期内的曲线。从图 7 中可以看出,当 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,即相邻扫描间的拼接误差小于 $1/5$ 个条纹时,槽深不随周期测量误差的变化而变化,一直保持最大的槽深,说明显影后的掩模槽底无光刻胶残留。当 $0.2 < |S/p \times \delta_p| < 0.5$ 时,槽深随着周期测量误差绝对值的增大而迅速降低,且槽深的相对变化量也迅速增大,严重影响掩模表面槽深的一致性。

2) 周期测量误差对槽形占宽比的影响

光栅占宽比是影响光栅衍射效率的重要因素之一,光栅掩模的槽形占宽比由曝光量、对比度、显影条件等共同确定,在显影条件和平均曝光量确定的

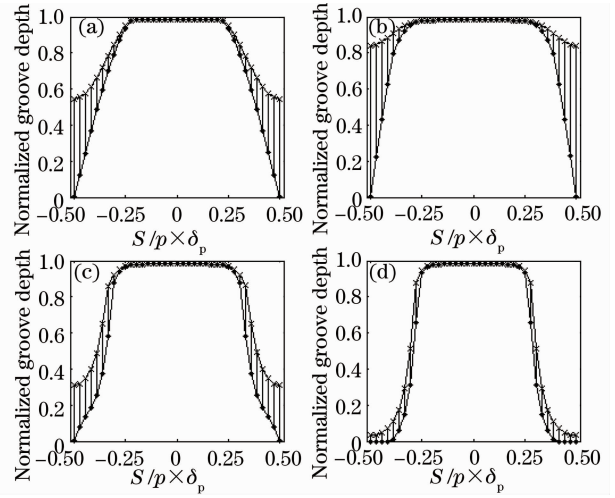


图 7 不同曝光量下槽深随周期测量误差的变化曲线。
(a) $D_B=0.6D_C$; (b) $D_B=0.8D_C$; (c) $D_B=1D_C$;
(d) $D_B=1.2D_C$

Fig. 7 Groove depth variations with measured fringe period error for different doses. (a) $D_B=0.6D_C$;
(b) $D_B=0.8D_C$; (c) $D_B=1D_C$; (d) $D_B=1.2D_C$

情况下,曝光对比度就成为影响槽形占宽比的主要因素。对于干涉场扫描曝光制作的全息光栅掩模而言,周期测量误差带来的相邻扫描间的拼接误差会严重影响曝光对比度,因此周期测量误差对槽形占宽比有较大的影响。在不同曝光量下,槽形占宽比随周期测量误差的变化曲线如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,当周期测量误差为 0 时,平

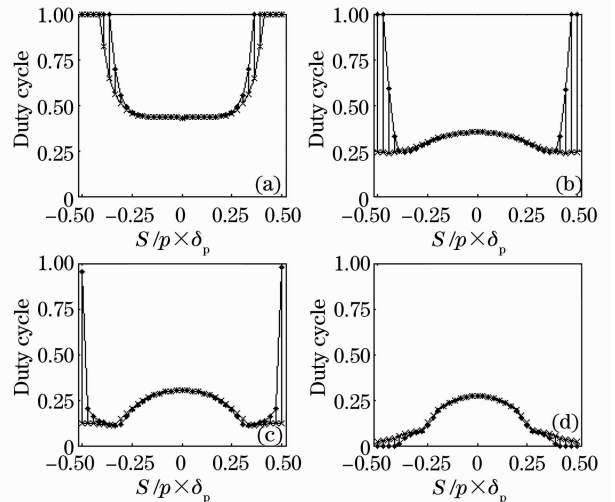


图 8 不同曝光量下槽形占宽比随周期测量误差的变化曲线。(a) $D_B=0.6D_C$; (b) $D_B=0.8D_C$; (c) $D_B=1D_C$; (d) $D_B=1.2D_C$

Fig. 8 Duty cycle variations with measured fringe period error for different doses. (a) $D_B=0.6D_C$; (b) $D_B=0.8D_C$; (c) $D_B=1D_C$; (d) $D_B=1.2D_C$

均曝光量 D_B 决定了理想情况下的槽形占宽比,曝光量越大槽形占宽比越小,因此可以通过改变平均曝光量来改变槽形的占宽比。从图中可以看出,当 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,对应相同的周期测量误差,占宽比在空间上的相对变化量很小。但平均曝光量较大 ($D_B > 0.8D_C$) 时,占宽比随周期测量误差的增大而减小,这说明平均曝光量较大时光刻胶栅脊容易发生“坍塌”,不易控制槽形的占宽比。当 $0.2 < |S/p \times \delta_p| < 0.5$ 时,槽形占宽比剧烈变化,说明理想的矩形槽形已经破坏。

3) 周期测量误差对槽形侧壁倾角的影响

为制作符合离子束刻蚀的优质光栅掩模,仅有槽深和槽形占宽比两个参数还不足以说明刻槽的形状,因此引入槽形侧壁倾角这个参量来描述槽形侧壁的陡度。对于理想的矩形光栅掩模,侧壁倾角应为 90° ,但实际的侧壁倾角小于 90° 。从图 6 可以看出,不同的对比度下槽形侧壁倾角也不同,通过计算可得在不同曝光量下侧壁倾角随周期测量误差的变化曲线如图 9 所示。

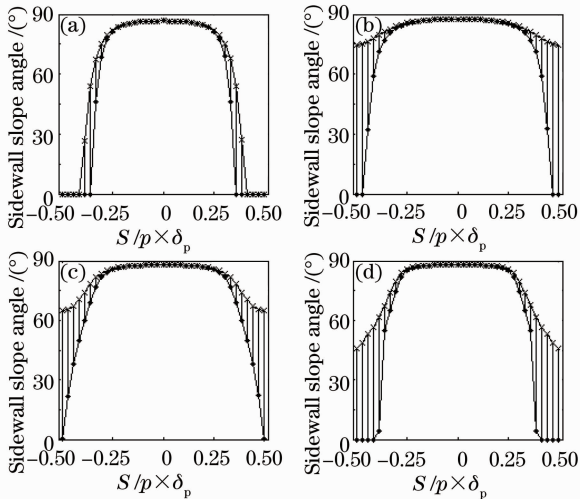


图 9 不同曝光量下侧壁倾角随周期测量误差的变化曲线。(a) $D_B = 0.6D_C$; (b) $D_B = 0.8D_C$; (c) $D_B = 1D_C$; (d) $D_B = 1.2D_C$

Fig. 9 Groove sidewall slope angle variations with measured fringe period error for different doses. (a) $D_B = 0.6D_C$; (b) $D_B = 0.8D_C$; (c) $D_B = 1D_C$; (d) $D_B = 1.2D_C$

从图 9 可以看出,当周期测量误差为 0 时,槽形的侧壁倾角接近 90° ,说明显影后光栅掩模的槽形接近矩形。当 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,侧壁倾角随周期测量误差的变化较小,且侧壁倾角在空间上的一致性也很好。当 $0.2 < |S/p \times \delta_p| < 0.5$ 时,槽形侧壁倾角随周期测量误差的变化剧烈,对应相同的周期

测量误差,侧壁倾角在空间的相对变化量很大,说明光栅掩模的类矩形槽形被破坏,且光栅掩模的表面一致性很差。

综上所述,当 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,光栅掩模的槽形占宽比、槽深和槽形侧壁倾角在合适的曝光条件下均可以做到较好的一致性,可以曝光得到掩模槽底无残胶,符合离子束刻蚀的光栅掩模,以此作为周期测量误差的容限。对于系统参数:光栅线密度 1800 gr/mm 、光栅基底表面相干高斯光束的束腰半径 1 mm 、步进间隔 $S = 0.8 \text{ mm}$,可得周期测量的相对误差需要控制在 139 ppm 内。

4 实验验证

使用波长为 413.1 nm 的氦离子激光器作为曝光光源,选择合适的激光器功率和扫描速度对曝光量进行控制,使用 Shipley S1805 光刻胶作为记录介质,记录扫描曝光后的干涉条纹。为验证不同的干涉条纹周期设定对光栅掩模槽形的影响,保证其他曝光条件的一致性,对同一块光栅基底上的不同区域分组进行扫描曝光。

实验中对干涉条纹周期进行多次测量,以得到的平均值作为干涉条纹周期进行曝光,测量的干涉条纹周期为 555.716 nm ,假设此时的 $\delta_p = 0$ 。在同一光栅基底上分七组进行扫描曝光,动态相位锁定中干涉条纹周期设定分别满足 $S/p \times \delta_p = 0, 0.067, 0.133, 0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 ,其他曝光显影条件均一致。当 $S/p \times \delta_p = 0$ 时制作的光栅掩模槽形如图 10 所示,图中的两条线分别为光栅掩模不同的点测得的槽形。从图中可以看出,此时的光栅掩模为梯形槽,槽底洁净无残胶、槽形均匀,槽深也达到最大。

图 11 为相位锁定过程中设定不同周期时光栅

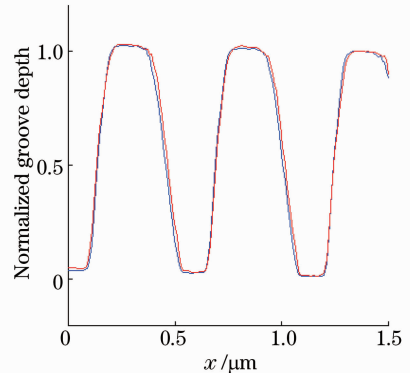


图 10 $S/p \times \delta_p = 0$ 时原子力测得的掩模槽形
Fig. 10 Groove profile measured by atomic force microscope (AFM) when $S/p \times \delta_p = 0$

掩模上两点的槽形,图中(1)至(3)中槽形基本一致,呈梯形,槽深较深。从(4)至(6)图中可以看出随着

设定周期与实际周期之间误差的增大,槽形由梯形变为正弦形,槽深逐渐变浅,槽形的均匀性变差。

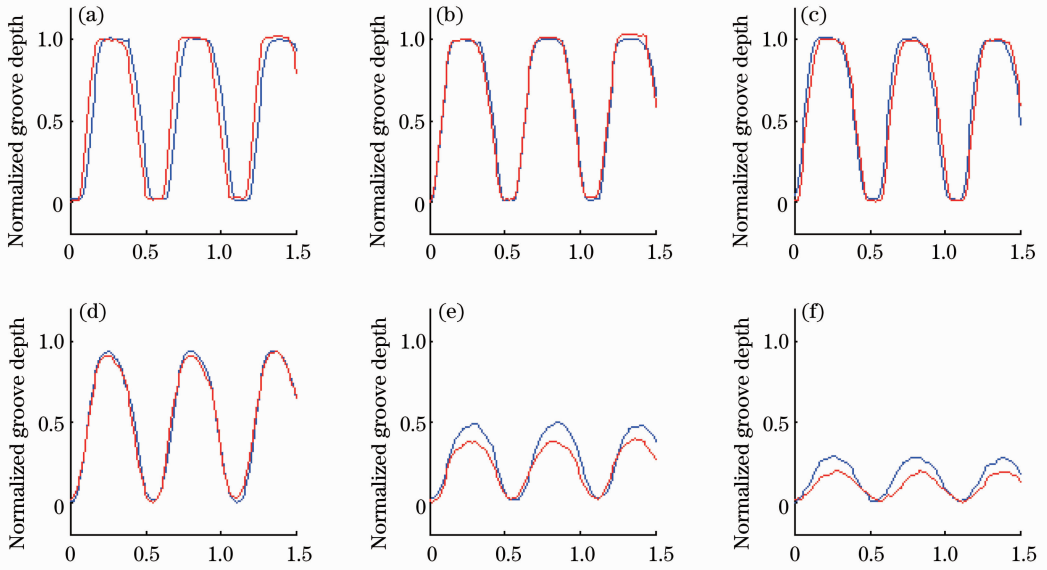


图 11 不同周期误差下的掩模槽形。(a) $S/p \times \delta_p = 0.067$; (b) $S/p \times \delta_p = 0.133$; (c) $S/p \times \delta_p = 0.2$; (d) $S/p \times \delta_p = 0.3$; (e) $S/p \times \delta_p = 0.4$; (f) $S/p \times \delta_p = 0.5$

Fig. 11 Groove profile with different measured fringe period errors. (a) $S/p \times \delta_p = 0.067$; (b) $S/p \times \delta_p = 0.133$; (c) $S/p \times \delta_p = 0.2$; (d) $S/p \times \delta_p = 0.3$; (e) $S/p \times \delta_p = 0.4$; (f) $S/p \times \delta_p = 0.5$

测得的槽深与理论模型间的对比如图 12 所示。从图中可以看出,测量得到的槽深变化趋势与理论计算值有较好的一致性。但掩模槽形很难与理论模型完全重合,主要原因有:1)影响曝光对比度的因素很多,两干涉光斑间的重复性、干涉条纹的直线度、光斑光强分布、干涉条纹与扫描方向间的夹角、相位锁定以及工作台的二维运动等均难以达到理想值;2)实验时干涉条纹周期测量值存在一定的误差;3)光栅掩模制作过程中的曝光显影条件与理论模型有

一定的差距;4)原子力显微镜的测量范围有限,且很难测得掩模槽形最好的点和槽形最差的点,不能完全反映槽深的变化范围。

5 结 论

为制作适用于离子束刻蚀的矩形光栅掩模,根据 SBIL 中利用工作台扫描方式曝光的特点,建立了 SBIL 曝光的数学模型,对曝光对比度与周期测量误差间的关系进行了分析。根据光刻胶显影的非线性特性,建立 SBIL 系统光刻胶显影模型,得到在显影条件一定的情况下,光栅掩模槽形随周期测量误差的变化规律。并实施了相关实验,可得到如下结论:1)周期测量误差会降低曝光对比度,并使曝光对比度在空间呈周期性分布,周期为步进间隔长度,使得整个光栅掩模槽形的均匀性变差;2)当周期测量误差较小时,掩模槽形占宽比主要由平均曝光量决定;3)相邻两次扫描间拼接误差与扫描曝光时步进间隔和干涉条纹周期有关,当周期测量的相对误差一定时,拼接误差与步进间隔成正比,与干涉条纹周期成反比;4)当周期测量误差满足 $|S/p \times \delta_p| < 0.2$ 时,掩模槽形的各参量随周期测量误差的变化量较小,可以曝光得到掩模槽底无残胶,符合离子束刻蚀的光栅掩模,以此作为周期测量误差的容限。

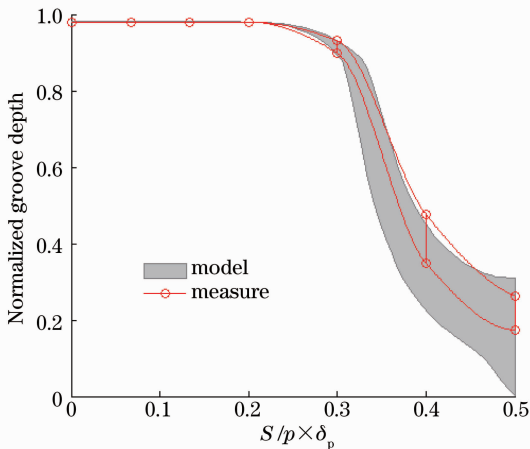


图 12 测得的槽深与理论模型的对比如

Fig. 12 Measured groove depth versus model groove depth

对于 1800 gr/mm, 步进间隔 $S=0.8$ mm, 得到 $\delta_p=139$ ppm; 5) 实验结果与理论模型间有较好的一致性, 说明理论模型合理, 对采用 SBIL 系统制作全息光栅掩模进行槽形预测与控制具有理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 Paul ThomasKonkola. Design and Analysis of a Scanning Beam Interference Lithography System for Patterning Gratings with Nanometer-Level Distortions [D]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2003.
- 2 Carl G Chen. Beam Alignment and Image Metrology for Scanning Beam Interference Lithography-Fabricating Gratings with Nanometer Phase Accuracy [D]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering and Computer Science, 2003.
- 3 Juan Montoya. Toward Nano-Accuracy in Scanning Beam Interference Lithography [D]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering and Computer Science, 2006.
- 4 Zhang Baoqing, Shi Guoquan, Shi Guangfeng, *et al.*. Pre-control of mechanical scratching diffractive grating [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1666-1675.
张宝庆, 史国权, 石广丰, 等. 衍射光栅机械刻划成槽的预控试验[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1666-1675.
- 5 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.
- 6 Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating performance [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308009.
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308009.
- 7 Cui Jinjiang, Kong Peng, Wang Fan, *et al.*. Analysis and control of groove density error for the rowland holographic grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020901.
崔锦江, 孔 鹏, 王 帆, 等. 罗兰全息光栅线密度误差分析与控制[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020901.
- 8 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Wavefront aberration analysis of the interference image according to different axis alignment errors in the grating exposure system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0705002.
韩 建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息曝光系统轴向调节误差对光栅衍射波像差的影响 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0705002.
- 9 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*, 2005, 23(6): 2640-2645.
- 10 Qiu Keqiang, Zhou Xiaowei, Liu Ying, *et al.*. Ion beam etching of large aperture diffractive optical elements [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1676-1683.
邱克强, 周小为, 刘 颖, 等. 大尺寸衍射光学元件的扫描离子束刻蚀[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1676-1683.
- 11 Chihao Chang. Multilevel Interference Lithography-Fabricating Sub-Wavelength Periodic Nanostructures [D]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2008.
- 12 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(3): 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条纹对比度的变化规律[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0305001.
- 13 Li Lifeng. Application of Diffraction Theory to Analysis and Fabrication of Waveguide Gratings [D]. University of Arizona, USA, 1988.
- 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Principles of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. *激光原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- 15 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.
- 16 F H Dill, W P Hornberger, P S Hauge, *et al.*. Characterization of positive photoresist [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1975, 22(7): 445-452.
- 17 C A Mack. Development of positive photoresist [J]. *Electrochem Soc*, 1987, 134(1): 148-152.
- 18 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Groove profile evolution of grating masks for different photoresist response curves in fabrication of holographic gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2380-2388.
韩 建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅制作中光栅掩模槽形形状随光刻胶特性曲线的演化规律[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2380-2388.
- 19 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of in-situ monitoring curves during development of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1146-1150.
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影检测曲线的理论模拟[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1146-1150.

栏目编辑: 李志兰