

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

韩 建^{1,2} 巴音贺希格¹ 李文昊¹ 孔 鹏^{1,2}

(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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了在光栅制作中对光栅掩模占宽比及槽深加以控制, 结合光刻胶在显影过程中的非线性特性, 建立了光栅掩模槽形演化的数学模型, 由此分析和模拟曝光量、条纹对比度对光栅槽形的影响。结果表明: 在显影条件确定时, 光栅掩模占宽比随光刻胶曝光量的增大而减小, 条纹对比度减小, 则不仅使光栅占宽比减小, 同时也是使光栅槽深减小的主要原因, 这样做的前提是预先通过实验和计算确定出一个曝光量上限 E_c 。该方法能够反映光栅掩模形状的演化规律, 为全息光栅参数预测和工艺控制提供依据。

关键词 光栅; 曝光量; 条纹对比度; 占宽比; 槽深

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0305001

Profile Evolution of Grating Masks According to Exposure Dose and Interference Fringe Contrast in the Fabrication of Holographic Grating

Han Jian^{1,2} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Kong Peng^{1,2}

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

Abstract In order to improve the precision control of the duty cycle and the groove depth of a recorded profile in the photoresist, based on the nonlinearity of the photoresist in development processing, a binary resist mathematical model for simulating the profile evolution of the photoresist grating is presented, according to this model, the changing of the profile characteristics such as duty cycle and the groove depth which depend on the contrast and exposure dose can easily be understood. It turns out that: under specific development condition and the exposure upper limit E_c recognized by calculating and experiment, the duty cycle of the grating masks decreases as the exposure dose increases, the decrease of fringe contrast not only results in the decrease of the duty cycle, but also results in the decrease of the groove depth. The model can show the profile evolution trend exactly, it provides a right analysis tool for forecasting and controlling the groove shape in the fabrication of the grating masks.

Key words grating; exposure dose; fringe contrast; duty cycle; groove depth

OCIS codes 050.6875; 100.2650

1 引 言

全息光栅掩模制作是通过两束相干平面波在光

栅基底处叠加形成明暗相间的干涉条纹, 并被涂敷于基底的光刻胶所记录形成折射率调制光栅, 又根

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523, 20086013)资助课题。

作者简介: 韩 建(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事平面全息光栅分波前曝光系统中的基础问题方面的研究。

E-mail: hanjian523@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—), 男, 博士, 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)

据其激发分子在显影液中不同的溶解速度,最终形成浮雕形光刻胶光栅。这种光栅的占宽比、槽形深度及槽形陡度不仅影响光栅的衍射效率,也会影响光栅的离子束刻蚀^[1]。为制作符合离子束刻蚀条件的光刻胶光栅掩模,需要对光栅掩模形状进行预测和工艺控制。

光刻胶光栅槽形由曝光及显影条件共同决定。激光波长、曝光量、干涉条纹对比度、光刻胶感光特性、显影液浓度及温度等任何参量的改变,都会引起光栅槽形的变化。关于如何提高光栅掩模的制作效率,分析各制作工艺参数对掩模形状的影响,进而对光栅槽形变化加以控制,迄今已有不少卓有成效的工作。Dill 等^[2]通过光栅曝光量与光刻胶溶解速度的关系,第一次阐述了光栅掩模形成的基本理论,并由此建立了光栅槽形变化的物理模型。Mello 等^[3~9]改进了曝光量与光刻胶刻蚀速度的关系式,可以通过光栅掩模形成的数学模型分析曝光量对光栅槽形的影响。Yuan 等^[10]发明了一种离线测量装置,通过对曝光后光刻胶潜像光栅进行测量,得到曝光量和光束非零级衍射效率间的函数关系,以此作为实时控制曝光量的依据。赵劲松等^[11~15]提出通过实时测量曝光过程中潜像光栅的衍射效率,以此对曝光量进行监测控制,得出光刻胶的最佳曝光可选区间,从而对光栅掩模曝光量进行控制。以上工作从大的方面可分为两类,即光刻胶光栅形成的机理研究以及全息光栅制作的在线监测技术研究,它们在具体的全息光栅曝光、显影工艺中发挥着重要作用。当然,文献[2]及其进一步的工作并不是纯粹的理论推导结果,需要光刻胶溶解速率等实验数据以及由实验数据拟合所得的相关参数的支持,其特色是在考虑显影液对光刻胶产生腐蚀作用的背景下仿真曝光过程。从曝光仅仅是制作浮雕形光刻胶光栅掩模的中间环节,而非最终工艺的角度讲,上述模

型不仅无可厚非,相反是较为合理的。但是,如果需要在工艺过程中单独去分析曝光条件对潜像光栅及光刻胶光栅掩模占宽比等产生的影响,上述模型在实际应用中是不方便的。另外,曝光量的离线检测手段^[10]在传统的静态干涉场全息曝光法中显然没有曝光量的在线实时监测技术^[11]便捷,因此,全息曝光实时监测技术得到了推广应用^[12~15]。然而,在干涉场扫描曝光装置中^[16],由于干涉场面积小,且要连续不断扫描曝光和相位拼接,曝光实时监测技术在使用上尚有一定困难。

鉴于此,本文以 Mack^[17]关于曝光量与光刻胶溶解速度公式及光刻胶非线性特性为依据,建立一种简单的光栅掩模槽形形成模型,旨在如何通过改变曝光条件来控制光栅掩模占宽比等光栅槽形参数。研究表明,此曝光模型能够反映槽形演化的基本规律,尽管此法属于一种结合离线检测技术的方法,不具有实时性,但在全息光栅参数预测和工艺控制中具有一定的实用价值。

2 光栅掩模槽形形成的理论基础

2.1 光刻胶曝光量与条纹对比度

平面全息光栅制作是通过两束相干平面波在基底处相互干涉,形成明暗相间的干涉条纹,光栅掩模周期与曝光光束干涉角关系为^[8]

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (1)$$

式中 d 为光栅条纹周期, θ 为曝光光束干涉角, λ 为激光波长(图 1)。

忽略光刻胶和基底间反射时,光强在光刻胶内分布形式为^[13]

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

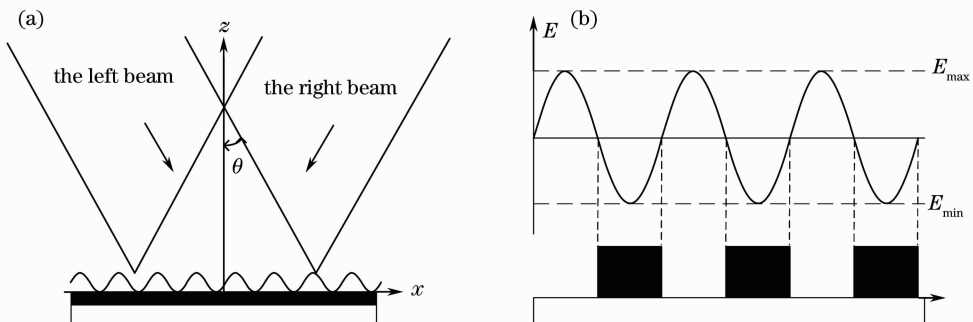


图 1 平面光栅制作光路(a)及光栅掩模形成(b)示意图

Fig. 1 Interference lithography (a) and the formation of the grating masks (b)

式中 A_L, A_R 分别表示左右曝光光束振幅。在实验条件下,左右曝光光束振幅存在差异,即 $A_L \neq A_R$,由此引起条纹对比度的变化,则光强分布与条纹对比度关系表示为^[5]

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left[1 + \Gamma \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \right], \quad (3)$$

式中 Γ 为条纹对比度,其数学表达形式为 $\Gamma = \frac{2A_R A_L}{A_R^2 + A_L^2}$, $I_0 = A_R^2 + A_L^2$ 。在光栅制作过程中,条纹对比度取值范围满足条件: $0 \leq \Gamma \leq 1$ 。

在光栅曝光时间 t 内,光刻胶不同部分接收曝光量^[13]为

$$E = \int I(x, y) t dt, \quad (4)$$

忽略由于激光稳定性引起的光强变化及条纹漂移的影响,则光刻胶不同位置 (x, y) 处在曝光截止时接收到的曝光量为

$$E(x, y) = E_0(x, y) \left[1 + \Gamma \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \right], \quad (5)$$

式中 $E_0 = I_0(x, y)t$, 称之为光刻胶平均曝光量。

2.2 光刻胶感光及显影特性分析

光刻胶在接收一定曝光量时吸收光子,其感光分子变成激发分子,由于激发分子在显影液中的溶解速度随曝光量、显影液浓度、温度的不同而变化,故而形成不同占宽比和槽深的光栅掩模。Mack^[17]给出光刻胶溶解速度的基本公式为

$$V = V_{\max} \frac{(\beta + 1)(1 - M)^n}{\beta + (1 - M)^n} + V_{\min}, \quad (6)$$

式中 $\beta = \frac{(n+1)}{(n-1)}(1 - M_{th})^n$, $M = \exp(-\alpha_0 E)$, 即未激发分子比例(曝光量 E 的函数), V 为光刻胶的溶解速度, V_{\max}, V_{\min} 分别为光刻胶充分曝光和未曝光时的溶解速度, M_{th} 是未激发分子比例特征值, n 是曲线拟合参数。以上参数可以在显影条件固定时,通过对使用台阶仪测量不同曝光量条件下光刻胶的溶解速度进行曲线拟合获得^[18,19]。根据(6)式,光刻胶剩余厚度 h 与初始胶厚 H 及显影时间 t 的关系为 $h = H - Vt$, 由于溶解速度 V 是曝光量 E 的函数,故曝光量不同位置处胶厚不同,亦即形成浮雕形光栅掩模,当形成的掩模其基底裸露表面干净无残胶时,光刻胶与基底交界位置处满足条件 $H = V(E_c)t$ 。由于在一个光栅周期内,位置坐标 x 与曝光量一一对应,故该位置可以用曝光量 E_c 表示。

可见,通过以下两种方法可以达到控制光栅槽形的目的: 1) 在曝光量确定时通过改变显影时间 t ,

进而影响 E_c 的大小而控制光栅占宽比,如显影实时监测技术就是以此为理论基础控制光栅槽形的; 2) 在显影时间 t 固定时通过改变曝光量实现 E_c 对应坐标位置 x 的改变,进而实现控制光栅占宽比。在 E_c 位置处满足条件 $V(E_c)t_0 = H$, 而在 $E \neq E_c$ 位置处:

$$h = \begin{cases} H - V(E)t_0 & E < E_c \\ 0 & E \geq E_c \end{cases}, \quad (7)$$

选择合适的显影时间 t_0 , 使光栅掩模栅脊间基底干净无残胶, 计算归一化光刻胶剩余厚度 $h/H = 1 - V(E)/V(E_c)$ 与曝光量 E 变化趋势如图 2 所示。

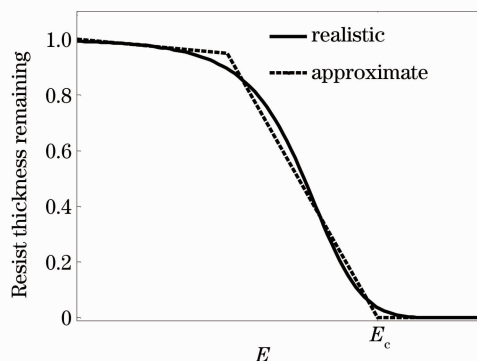


图 2 光刻胶非线性特性

Fig. 2 Typical nonlinearity of the positive photoresist

由图 2 可知,光刻胶随曝光量的变化具有显著的非线性特性: 当 $E \geq E_c$ 时,光刻胶在显影后全部溶解,从而出现光栅掩模栅脊间的基底裸露($h = 0$); 当 $E < E_c$ 时,光刻胶厚度随曝光量不同而不同,从而形成光栅掩模的栅脊($h \leq H$),不妨将 E_c 称之为光刻胶感光上限。至此,解决了显影条件固定时,如何通过曝光量来控制光栅槽形的问题。

3 光栅掩模形成的数学模型及理论分析

当光刻胶类型及显影条件确定时,光刻胶感光上限 E_c 也随之确定。为了分析光栅掩模槽形形成的过程,讨论曝光条件的改变对光栅槽形的影响,建立如图 3 所示的光栅槽形演化的数学模型。

如图 3 所示,在曝光量大于光刻胶感光上限位置时,光刻胶在显影过程中全部溶解掉; 在曝光量小于感光上限位置处,光刻胶厚度随曝光量增大而逐渐减小。在光栅掩模制作中,曝光量与光刻胶感光上限存在三种关系:

1) 当 $E_c > E_{\max}$ 时,根据(5)式知,即满足条件 $E_c > E_0[1 + \Gamma]$ 时,光刻胶曝光量最大位置处未达到光刻胶感光上限,故光刻胶在显影过程中不能被

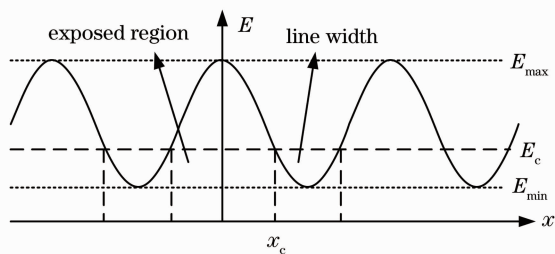


图3 光栅掩模槽形形成的数学模型

Fig. 3 Binary resist mathematical model of the grating mask grooves formation

完全溶解掉,光栅掩模槽底存在残胶,此时曝光不足严重影响光栅掩模质量;

2) 当 $E_c < E_{min}$ 时,根据(5)式知,即满足条件 $E_c < E_0(1 - \Gamma)$ 时,光刻胶曝光量最小位置处超过光刻胶感光上限,此时光刻胶由于过曝光,在显影液中全部溶解掉,不能形成所需要的光栅浮雕形貌;

3) 当 $E_{min} < E_c < E_{max}$ 时,根据(5)式,即满足条件 $E_0(1 - \Gamma) < E_c < E_0(1 + \Gamma)$ 时,光刻胶感光上限在曝光量最大值与最小值之间,满足该曝光量条件的潜像光栅经显影后达到基底无残胶,且光栅掩模占宽比随曝光量及条纹对比度的不同而相应改变。

为制作基底无残胶的光栅掩模,应将曝光量控制在第三种条件下,由图3所示,当光刻胶感光上限为 E_c ,光栅槽宽初始坐标为 x_c 时,(5)式表示为

$$E_c(x, y) = E_0(x, y) \left[1 + \Gamma \cos\left(\frac{2\pi}{d}x_c\right) \right], \quad (8)$$

对于正胶,光栅线宽为 $L = d - 2x_c$,故根据(8)式,光栅占宽比表示为

$$\frac{L}{d} = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left[\frac{1}{\Gamma} \left(\frac{E_c}{E_0} - 1\right)\right], \quad (9)$$

由(9)式可知,在显影条件一定时,光栅占宽比是由曝光量及条纹对比度共同确定的。需要说明的是,光栅占宽比表达式是在掩模槽形为矩形条件下构建的,该理论值相比实际制作的光栅掩模测量值偏大,但以矩形槽形为依据构建占宽比计算式仍然可以反映光栅槽形随曝光条件的变化规律。

计算光刻胶感光上限 E_c 过程为:1)通过控制曝光光束光强及曝光时间控制曝光量,得到潜像光栅曝光量分布的正弦曲线及平均曝光量 E_0 ,实际操作并不困难^[18];2)使显影温度和显影液浓度固定,并选择合适的显影时间使形成的浮雕光栅槽底干净、无残胶,测量此光栅掩模槽形形状及占宽比,最后结合(9)式就可以计算出光刻胶感光上限 E_c (这部分工作也可借助目前使用的显影实时监测技术,以减

少试验次数)。表1为 Shipley1805 光刻胶在室温 20 °C,胶厚 300 nm,使用 1:5 显影液浓度且激发波长为 441.6 nm 的条件下测量 E_c 的结果。

表1 根据曝光条件及掩模槽形占宽比计算光刻胶感光上限 E_c

Table 1 Photoresist sensitization upper limit E_c calculation according to exposure and the duty-cycle of grating masks

T / s	$E_0 / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	L/d	Γ	$E_c / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$
400	121	0.53	1	133
500	151	0.45	1	128
600	190	0.40	1	127

3.1 曝光量对光栅槽形占宽比的影响

由(8)式知,当满足条件 $E_c = E_0, \Gamma = 1$ 时,光栅占宽比为 0.5;当 $E_c \neq E_0, \Gamma = 1$ 时,由(9)式知光栅占宽比与曝光量及条纹对比度关系为

$$\frac{L}{d} = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{E_c}{E_0} - 1\right). \quad (10)$$

由(10)式知,在光刻胶感光上限 E_c 确定及条纹对比度为 1 时,光栅掩模的占宽比与平均曝光量有关。图4给出了使用正胶时曝光量对光栅槽形占宽比的影响分析。从图4中可以看出,在光刻胶感光上限 E_c 确定时,光栅占宽比随曝光量的增大而逐渐减小。在实际光栅制作中,曝光量对光栅占宽比的影响应结合条纹对比度的变化综合分析。

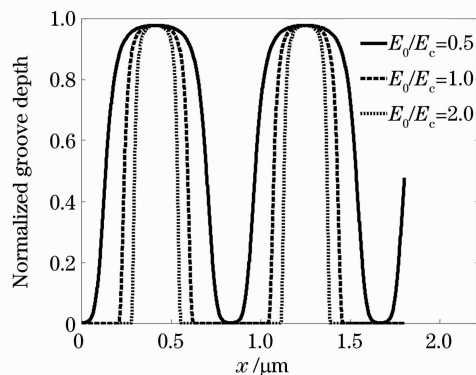


图4 曝光量对光栅槽形占宽比的影响

Fig. 4 Influence of different exposure dose on the duty cycle

3.2 条纹对比度对光栅槽形占宽比的影响

利用(9)式,可对条纹对比度的变化对光栅掩模占宽比的影响进行分析。图5为光栅掩模占宽比随条纹对比度的变化曲线。

从图5可以看出,平均曝光量相同时,光栅占宽比随条纹对比度的减小而逐渐减小;当平均曝光量 E_0 从 0 增加到 E_c ($E_0/E_c = 1$) 时,光栅占宽比随曝光量增加迅速降低,此时条纹对比度对光栅槽形的

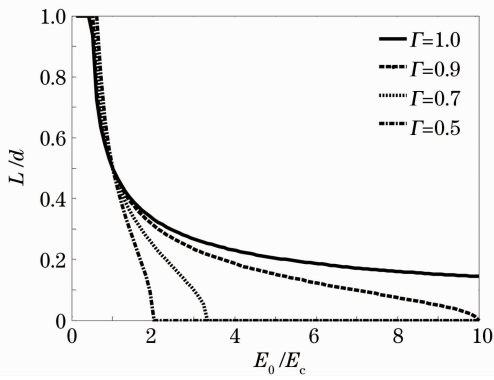


图 5 光栅掩模占宽比随条纹对比度的变化曲线
Fig. 5 Change curve of the duty cycle of the grating mask with different fringe contrast

影响较小；当曝光量大于 E_c 时，条纹对比度越大，曝光量变化对光栅占宽比的影响越小，当条纹对比度为 1 时，光栅占宽比易控制在 0.2~0.5 之间，随着条纹对比度的降低，曝光量增大使光栅掩模槽形消失的机率随之增加，因此此时通过调整曝光量控制光栅占宽比较为困难。综上所述，为提高光栅工艺中的制作精度，降低曝光量的不同对光栅占宽比的影响，通常选择条纹对比度在 0.9~1.0 区间的曝光光束及适宜的曝光量，以实现光栅掩模占宽比的控制范围在 0.2~0.5 之间。

3.3 条纹对比度对光栅槽深的影响

由于光刻胶在显影液中的非线性特性，条纹对比度的变化不仅影响光栅槽形占宽比，也影响光栅掩模的槽深变化。在建立的槽形演化数学模型中，光栅槽深的变化主要取决于最小曝光量的改变，根据(5)式，在任意条纹对比度条件下，最小曝光量表示为

$$E_{\min} = E_0[1 - \Gamma], \quad (11)$$

条纹对比度减小，从而使最小曝光量增加，潜像光栅暗条纹处存在缓慢曝光现象，故在显影过程中，光栅槽深依据光刻胶特性曲线随曝光量的增加而逐渐减少。根据(6)式和(11)式，计算光刻胶槽深随条纹对比度变化曲线如图 6 所示。

由图 6 分析知，光刻胶掩模槽深的变化与条纹对比度及平均曝光量有关：当条纹对比度为 1 时，暗条纹处最小曝光量为零，此时光栅槽深主要取决于光刻胶的原始厚度；当条纹对比度减小时，光刻胶槽深减少量随平均曝光量的增大而逐渐增大。因此，在光栅制作工艺中，提高光栅掩模槽深的控制精度，主要有两种方法：1) 应最大限度地提高干涉条纹对比度，这样既可保证条纹中心位置得到充分曝光，

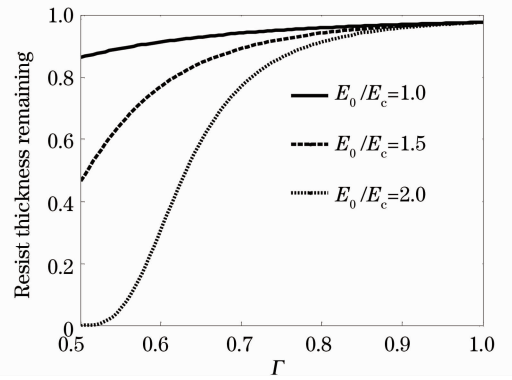


图 6 光栅槽深随条纹对比度的变化曲线
Fig. 6 Change of the grating groove depth due to the different fringe contrast

也可抑制暗条纹中心位置曝光量的增大，从而使光栅槽深唯一取决于光刻胶原始胶厚，而与光刻胶曝光量大小无关，故此此时可以控制曝光量的变化以提高光栅掩模占宽比的制作精度；2) 在条纹对比度既定条件下，选择平均曝光量满足条件 $E_0/E_c = 1$ ，从而使条纹对比度对光栅槽深的影响达到最小。

4 实验验证

使用波长为 441.6 nm 的 He-Cd 激光作为记录光源，通过实时监测技术对曝光量进行控制，使用 Shipley S1805 光刻胶作为记录介质，测量曝光前基底光刻胶厚度在 105~110 nm 之间，以线性渐变滤光片作为条纹对比度的控制装置，在显影条件不变时，通过改变曝光时间及条纹对比度等参数，测得光栅掩模原子力显微镜 (AFM) 剖面如图 7 所示。图 7(a1)~(c1) 为与曝光条件相对应的光栅掩模 AFM 剖面图片，图 7(a2)~(c2) 侧为根据曝光条件及光刻胶特性曲线模拟的光栅掩模槽形，具体曝光参数及光栅掩模槽形测量数据如表 2 所示。

表 2 曝光条件及相应的光栅掩模槽形参数

Table 2 Parameters of the exposure and the grating masks grooves according to the samples in Fig. 7

Parameters	T/s	Γ	L/d	H/nm
a1, a2	600	1	0.51	104
b1, b2	700	1	0.42	105
c1, c2	700	0.7	0.4	85

为验证条纹对比度及曝光量对光栅槽形的影响，选择条纹对比度为 1，通过曝光实时监测技术控制曝光量，经多次实验寻找出在既定显影条件下光栅占宽比为 0.5 的曝光时间，根据此条件制作的光栅掩模及槽形模拟如图 7(a1)~(a2) 所示。分别调整曝光时间及条纹对比度，观察槽形的演化，并与模

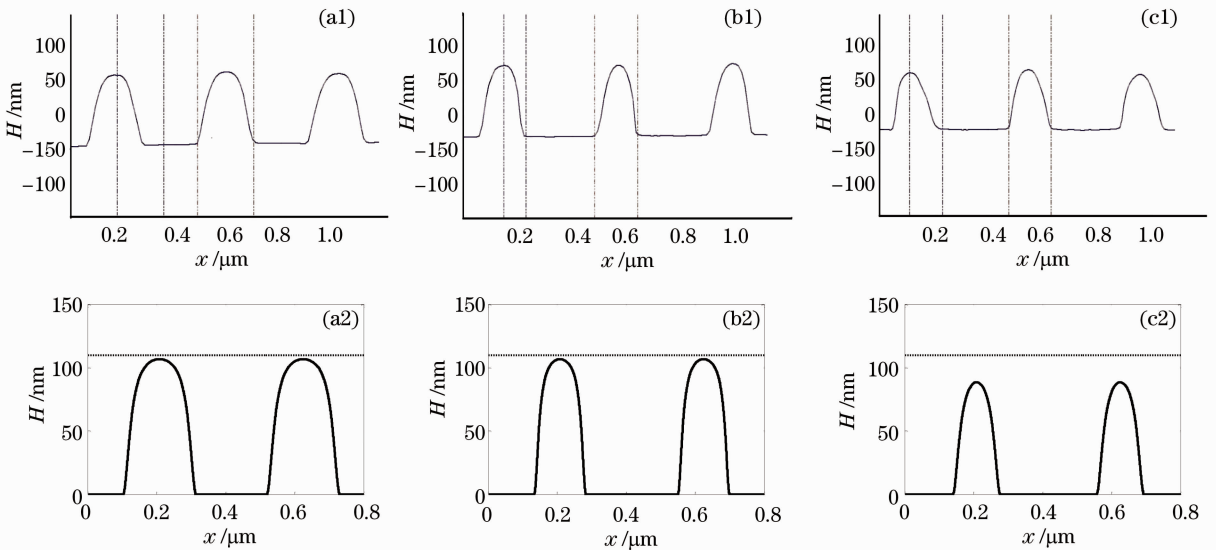


图 7 不同曝光条件下光栅掩模槽形变化(a1)~(c1)及数值模拟比较(a2)~(c2)

Fig. 7 Comparison between the profile of the fabrication (a1)~(c1) and the evolution of the computed profile (a2)~(c2) for different doses and contrasts

拟槽形相互比较。在条纹对比度不变的条件,由图 7(a1)~(b2)比较知,光栅槽深由光刻胶初始厚度决定,没有明显改变,而光栅掩模占宽比随光刻胶曝光量的增大而逐渐减小。曝光量相同而条纹对比度减小,由图 7(b1)~(c2)比较知,在光栅槽形占宽比减小的同时,光栅槽深也随之变浅,槽深变化大小同具体曝光量及显影条件有关。当对比度不变光栅曝光量继续增加时,光栅掩模很难形成所期望的槽形,其原因有二:1)低条纹对比度使决定光栅槽深的最小曝光量增加到光刻胶线性改变区,由此引起槽形深度迅速降低,占宽比减小,条纹易发生坍塌现象。2)在实际曝光过程中,条纹的稳定性并不理想,由此引起潜像光栅暗条纹位置缓慢地曝光,在显影过程中易出现光刻胶完全被溶解或掩模坍塌现象,从而制作较为困难。

5 结 论

为提高光栅槽形的控制精度,制作适用于离子束刻蚀的光栅掩模,根据光刻胶在显影液中的非线性特性,建立了光栅槽形演化的数学模型,通过该模型理论分析光栅槽形随曝光量、条纹对比度的演化规律,得到如下结论:1)在显影条件既定时,光栅槽形占宽比随曝光量的增大、条纹对比度的减小而逐渐减小,当条纹对比度在 0.9~1.0 时,光栅占宽比易控制在 0.2~0.5 之间,且曝光量越大,控制精度越高。2)光栅槽深主要取决于光刻胶最小曝光量的变化:在条纹对比度为 1 时,光栅槽深由光刻胶初始

厚度决定;在条纹对比度变化时,光栅槽深随条纹对比度的减小而逐渐减小,选择曝光量条件 $E_0/E_c = 1$ 时,条纹对比度的变化对光栅槽深的影响较小。3)在建立的光栅槽形形成模型中,占宽比和槽深主要由曝光条件确定,而具体的槽形形状如矩形、梯形、正弦形则依据不同的显影条件而改变,因此该模型也可作为分析显影条件不同对光栅槽形影响的有力工具。

参 考 文 献

- 1 Meng Xiangfeng, Li Lifeng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive-ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189~193
- 孟祥峰, 李立峰. 提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189~193
- 2 F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge *et al.*. Characterization of positive photoresist [J]. *IEEE. Trans. Electron. Devices*, 1975, **ED-22**(7): 445~452
- 3 B. deA. Mello, I. F. da Costa, C. R. A. Lima *et al.*. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 597~603
- 4 C. Zanke, A. Gombert, A. Erdmann *et al.*. Fine-tuned profile simulation of holographically exposed photoresist gratings [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **154**(1): 109~118
- 5 S. Austin, F. T. Stone. Fabrication of thin periodic structures in photoresist: a model [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(4): 1071~1074
- 6 C. L. Henderson, S. N. Pancholi, S. A. Chowdhury *et al.*. Photoresist characterization for lithography simulation part2: exposure parameter measurements [C]. *SPIE*, 1997, **3049** (1997): 816~828
- 7 J. C. Montoya, Chih Hao Chang, R. K. Heilmann *et al.*. Doppler writing and linewidth control for scanning beam interference lithography [J]. *J. Vacuum Sci. Technol. B*, 2005, **23**(6): 2640~2645

- 8 M. S. Stiel, Carlos R. A. Lima. Photoresist resolution measurement during the exposure process [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(35): 5152~5156
- 9 W. T. Tsang. Theoretical modeling of the simultaneous exposure and development (SED) process of a positive photoresist [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(7): 1918~1930
- 10 C. Yuan. Photolithographic Dose Determination by Diffraction of Latent Image Grating [P]. U. S. Patent, 1996, 5476783
- 11 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 851~858
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 851~858
- 12 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Method for controlling groove depth and duty cycle of rectangular photoresist gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1285~1291
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 一种控制矩形光刻胶光栅槽深和占宽比的方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1285~1291
- 13 B. R. Napier, N. J. Phillips. Use of real-time latent images to write long holographic diffraction gratings in photoresist [C]. *SPIE*, 1997, **3011**: 182~193
- 14 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Modeling and in-situ monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 65~69
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊 等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 65~69
- 15 Lin Hua, Li Lifeng, Zeng Lijiang. Controlling the duty cycle of photoresist gratings by setting the guided-wave coupling angles in monitoring of photoresist development [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 767~772
林 华, 李立峰, 曾理江. 利用导波耦合角度实时控制光刻胶光栅掩模的占宽比[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 767~772
- 16 Carl G. Chen. Beam Alignment and Image Metrology for Scanning Beam Interference Lithography Fabricating Gratings with Nanometer Phase Accuracy [D]. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 2003
- 17 C. A. Mack. Development of positive photoresist [J]. *Electrochem. Soc.*, 1987, **134**: 148~152
- 18 Liu Quan, Wan Hua, Wu Jianhong. Research on acquisition of low gradient photoresist gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1401~1405
刘 全, 万 华, 吴建宏. 低陡度光刻胶光栅槽形研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1401~1405
- 19 Chen Gang, Wu Jianhong, Liu Quan. Study on the profile evolution of the photoresist grating mask and its law [J]. *Opt. Tech.*, 2008, **34**(1): 133~140
陈 刚, 吴建宏, 刘 全. 全息光栅光刻胶掩模槽形演化及其规律研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(1): 133~140

栏目编辑: 李文喆