

文章编号 1004-924X(2012)11-2380-09

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

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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为分析光栅槽形形成的基本原理及槽形随光刻胶特性曲线的演化规律,建立了显影过程中光栅掩模槽形形成的演化模型。基于光刻胶溶解速率在不同曝光量区间的变化,将光刻胶特性曲线分成 3 个不同区域并分析各区域在光栅掩模槽形形成中的作用,讨论了在不同光刻胶特性曲线条件下光栅掩模槽形的演化规律。结果表明:当光刻胶非线性效应显著时,掩模槽形易形成矩形或梯形,此时槽深由原始胶厚决定;当光刻胶线性效应较显著时,槽形形成正弦形同时槽深有所减小。该模型正确反映了光栅槽形随光刻胶特性曲线变化的演化规律,为通过控制光刻胶特性曲线制作多种掩模槽形提供了理论依据及方法。

关 键 词:全息光栅;非线性效应;槽深;掩模槽形;光刻胶

中图分类号:O436.1;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2380

Groove profile evolution of grating masks for different photoresist response curves in fabrication of holographic gratings

HAN Jian^{1,2*}, Bayanheshig¹, LI Wen-hao¹, KONG Peng^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: hanjian523@163.com*

Abstract: To analyze the principle of profile formation for grating masks and the evolution of photoresist response curves, a simulation model of profile formation for grating masks in development was established. Based on the difference of photoresist dissolution rate in the different regions, the complete photoresist curve was divided into three sections, the effect of each section in the profile formation of grating masks was analyzed, then the simulation surface-relief profile model was presented. The experimental results indicate that the groove profile inclines to be rectangular or trapezoidal when the

收稿日期:2012-04-07;**修订日期:**2012-06-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478034);国家创新方法工作专项资助项目(No. 2008IM040700);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ120023);中国科学院知识创新工程资助项目(No. 100132H100)

nonlinearity of photoresist response curve is remarkable, and the groove depth is mainly decided by the initial photoresist thickness. The groove profile is sinusoidal when the linearity response is strong, and the groove depth is also always decreased under this condition. The experiment shows that the proposed model can predict the profile evolution for the different photoresist curves and it provides a directive theory for fabricating the various profile masks during development according to the different photoresist response curves.

Key words: holographic grating; nonlinearity effect; groove depth; grating mask; photoresist

1 引言

离子束刻蚀光栅的制作过程主要分为光栅掩模制作和离子束刻蚀两个步骤,选择不同光栅掩模槽形形状和离子束入射角,可以制作出多种闪耀角的全息光栅^[1-5],其中槽底无残胶的光栅掩模槽形主要影响刻蚀光栅的闪耀角,是全息光栅制作的前提,所以有必要对光栅掩模槽形形成原理进行分析,从而实现光栅制作工艺的精确控制。

光栅掩模槽形是由曝光和显影等综合工艺条件确定的,曝光过程中的曝光时间、条纹对比度变化,显影过程中的显影液浓度、温度及显影时间等参量将影响潜像光栅曝光量和光刻胶特性曲线从而引起光栅槽形的变化。为了提高光栅掩模槽形的可控性,制作多种不同槽形的光栅掩模,关于光栅槽形形成过程及其控制方法,迄今为止已有过多种卓有成效的工作。Dill^[6]首次提出将由于曝光量不同位置处光刻胶感光分子浓度不同而使光刻胶在显影液中溶解速度产生的差异作为光栅掩模槽形形成的物理基础。Mack^[7-10]等人通过各自给出的光刻胶溶解速率随曝光量变化的经验解析表达式,采用数学方法对光刻胶溶解速率的各项参数进行优化拟合,以实现理论模拟和实际槽形的高度吻合。赵劲松^[11]以感光分子浓度随曝光量变化为依据,具体讨论了光刻胶的腐蚀过程并进行槽形模拟,提出通过实时测量曝光过程中潜像光栅衍射效率来对曝光量进行监测控制^[12-13],利用显影监测曲线峰谷相对位置与槽深之间存在准周期关系^[14]控制掩模槽深,在显影监测曲线最后峰值之后适当位置停显控制占宽比对光栅制作工艺进行改进。吴建宏^[15-16]提出通过改变显影温度、显影液浓度及显影时间等显影条件

调整光刻胶特性曲线制作不同掩模槽形。以上工作无论是光栅掩模槽形形成的原理研究还是光栅制作过程中的工艺改进,都有效提高了光栅掩模制作工艺的重复性和制作效率。但对光栅掩模形成的机理研究却忽略了光刻胶的非线性特性,同时该模型在光刻胶胶厚较小时,理论模拟槽形与实验结果常存在着误差,故其槽形形成理论还需进一步修正。光栅工艺的实时监测技术方便了监测光栅槽形演化过程中的相对变化,但对槽形的精确控制尚有一定困难。通过调整光刻胶特性曲线法在制作低陡度光栅掩模过程中得到了广泛应用的同时,需通过进一步的理论论证来指导光栅工艺的制作。

本文根据光刻胶溶解速率随曝光量的变化关系,采用分段分析方法将光刻胶特性曲线分成 3 个区间,通过讨论区间在光栅掩模槽形形成中的作用建立光栅掩模形成的数学模型,并依此模型分析光栅槽形随光刻胶特性曲线变化的演化规律。本文属于光栅掩模槽形形成的原理性研究,旨在通过建立的光栅槽形演化模型分析光刻胶特性曲线对光栅槽形的影响,为通过抑制或扩大光刻胶非线性效应方式获得不同槽形光栅掩模提供理论依据及方法。

2 光栅掩模槽形形成的显影模型及槽形演化规律

2.1 曝光量函数及光刻胶特性曲线的区间划分

图 1 为光刻胶随干涉光束光强变化示意图,左右曝光光束在基底处相互干涉形成明暗相间的干涉条纹,忽略光束在光刻胶内部的驻波效应时,干涉光光强在光刻胶内分布形式为^[17]:

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

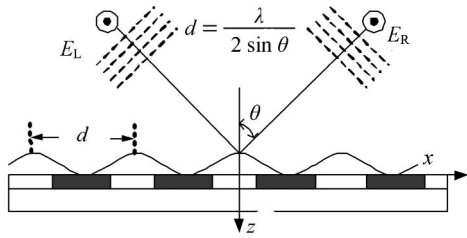


图 1 光刻胶随干涉光束光强变化示意图

Fig. 1 Schema of interfering waves on photoresist film

其中: Γ 为条纹对比度, 其表达式为: $\Gamma = \frac{2E_R E_L}{E_R^2 + E_L^2}$, $I_0 = E_R^2 + E_L^2$, d 为待制作光栅掩模的周期, E_L 、 E_R 分别为左右曝光光束的振幅。在曝光时间 t 内, 忽略条纹不稳定性的影响, 潜像光栅在不同位置处接收到的曝光量表达式为^[8]:

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

式中: E_0 表示平均曝光量, 其表达式为 $E_0 = I_0 t$ 。根据式(2)知, 在光栅掩模基底处曝光量最大值 E_{\max} 和最小值 E_{\min} 分别表示为:

$$E_{\max} = E_0 [1 + \Gamma], E_{\min} = E_0 [1 - \Gamma]. \quad (3)$$

光刻胶感光分子随接收曝光量的不同引起激发分子浓度的不同, 进而影响光栅基底不同位置处光刻胶在显影液中的溶解速率。文献[6]给出了未激发分子浓度与光刻胶接收曝光量关系为:

$$M = \exp(-\alpha_0 E), \quad (4)$$

其中: α_0 为与光刻胶性质有关的曝光常数。光刻胶激发分子溶解速率不仅随曝光量不同而变化, 同时与显影液浓度、显影温度、光刻胶类型及前烘温度有关, 通用的光刻胶溶解速率 v 的解析表达式为^[7]:

$$v = v_{\max} \frac{(\beta + 1)(1 - M)^n}{\beta + (1 - M)^n} + v_{\min}, \quad (5)$$

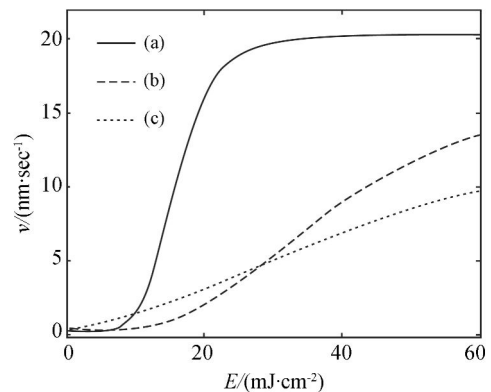
式中: $\beta = \frac{(n+1)}{(n-1)}(1 - M_{th})^n$, v_{\max} 、 v_{\min} 分别为光刻胶充分曝光 ($M=0$) 和未曝光 ($M=1$) 时的溶解速率, M_{th} 是阈值未激发分子比例, n 是曲线拟合参数。通过台阶实验测量 S1805 光刻胶在不同显影条件下的曲线拟合参数如表 1 所示。

表 1 不同显影条件下光刻胶特性曲线参数的模拟 ($\alpha_0 = 0.019$)

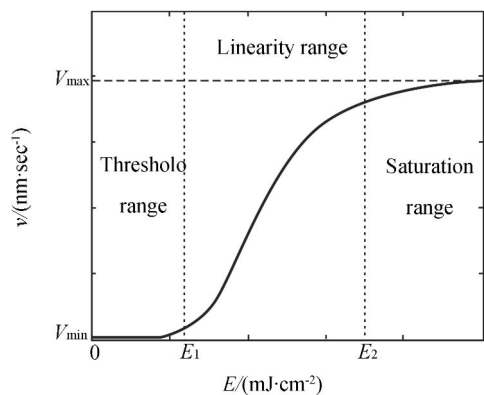
Tab. 1 Development parameters of photoresist response curves for different experimental data ($\alpha_0 = 0.019$)

编号	浓度	温度 / (°)	n	M_{th}	v_{\min} (nm · s ⁻¹)	v_{\max} (nm · s ⁻¹)
(a)	1 : 6	20	7	0.75	0.30	20
(b)	1 : 8	20	4	0.5	0.20	17
(c)	1 : 8	15	2	0.4	0.15	15

图 2 所示为不同显影条件下光刻胶特性参数的测量曲线。为便于分析光栅槽形随光刻胶特性曲线变化的演化规律, 根据曲线斜率变化, 将特性曲线细分为 3 个区域, 如图 2(b) 所示: (1) 曝光启动区, 光刻胶溶解速率很小且随曝光量增大基本保



(a) 实验测量拟合
(a) Experimental curve



(b) 曲线区间划分示意图
(b) Three characteristic zones

图 2 光刻胶(S1805)非线性特性曲线
Fig. 2 Photoresist response curves(S1805)

持不变,此时满足曝光条件 $E < E_1$; (2) 线性变化区,光刻胶溶解速率随曝光量的增大呈现线性变化趋势,此时满足曝光量条件 $E_1 < E < E_2$; (3) 曝光饱和区,光刻胶溶解速率达到最大极限值,且随曝光量的增大而基本保持不变,此时满足曝光量条件 $E > E_2$ 。其中, E_1 和 E_2 随光刻胶特性曲线的不同而变化。

2.2 光刻胶特性曲线不同区间与掩模槽形的关系

由光刻胶特性曲线可知,光栅基底不同位置接收曝光量的差异会引起光刻胶溶解速率不同,从而形成光栅掩模的浮雕槽形。在全息光栅掩模制作中,光刻胶胶厚较薄且基底对曝光光束反射较小,潜像光栅曝光量不随光刻胶胶厚不同而变化,此时光栅掩模槽深 $H(x)$ 随显影时间 t 的变化关系为:

$$H(x) = v(x)t. \quad (6)$$

由图 2 分析,启动曝光区 v_{\min} 和曝光饱和区 v_{\max} 内 2 个最值速率,形成光栅掩模的基本槽形,在显影时间 t 内光刻胶槽深分别为:

$$H_1 \approx v_{\min}t \approx 0, \quad (7)$$

$$H_2 \approx v_{\max}t. \quad (8)$$

启动曝光区域内的光刻胶溶解速率近似为 0,光刻胶表面没有变化 ($H_1 = 0$); 曝光饱和区域光刻胶溶解速率最大,该区域决定了光栅掩模槽深大小 (H_2) 及光栅掩模显影是否到底; 线性变化区域光刻胶溶解速度随曝光量增大呈线性增加,由于位于启动曝光区域和曝光饱和区之间,主要决定光栅掩模侧壁的形状。根据光刻胶特性曲线不同区域对光栅掩模槽形的影响,建立了图 3 所示光栅槽形演化的数学模型。

图 3 为光刻胶在显影过程中槽形形成示意图,启动曝光量 E_1 主要影响光栅掩模槽顶的形状, E_2 主要影响主光刻胶掩模显影露底的时间及光栅掩模占宽比,光刻胶特性曲线线性变化区主要影响掩模侧壁的陡度。根据光刻胶接收曝光量和光刻胶特性曲线关系,光栅掩模主要形成 3 种槽形:

(1) 当 $E_1 > E_{\min}$, 即光刻胶启动曝光量 E_1 大于潜像光栅最小曝光量 E_{\min} 时,由式(7)可知,基底光刻胶存在未溶解部分,故掩模形成平顶槽形。当满足极限条件 $E_2 = E_1$ 时,光刻胶非线性特性显著,掩模槽形平顶部分最大,此时光栅掩模为侧壁

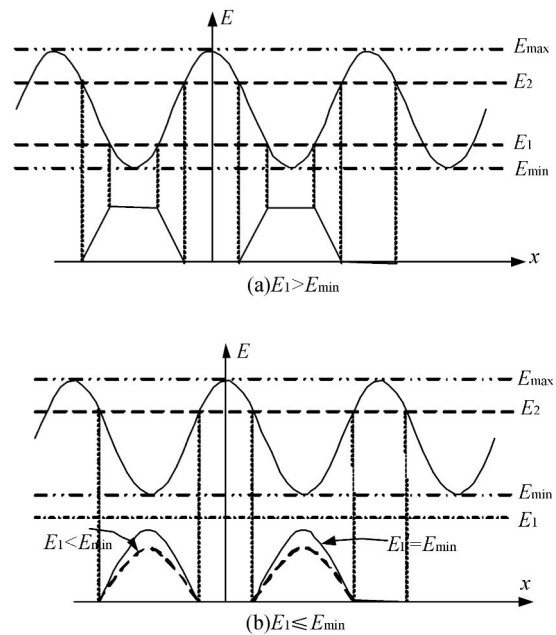


图 3 光刻胶在显影过程中不同槽形形成示意图
Fig. 3 Schema of photoresist profile evolution during development

较为陡直的矩形形状;随着 E_1 的逐渐减小,光刻胶在显影液中的特性曲线趋于平缓,掩模槽形平顶部分逐渐减小,同时侧壁槽形陡度也随之变缓,此时满足条件 $E_2 > E_1 > E_{\min}$,形成的掩模槽形主要为梯形,如图 3(a) 所示。

(2) 当 $E_1 = E_{\min}$ 时,掩模的平顶槽顶达到最小,潜像光栅光刻胶最小溶解速率为 0,光栅槽深没有变化,形成正弦形的光栅槽形;当 $E_1 < E_{\min}$ 时,光刻胶溶解速率进入光刻胶特性曲线中的线性变化区,光栅掩模形成正弦形槽形,且槽深随 E_{\min} 的增大而逐渐减小,如图 3(b) 所示。

(3) 当 $E_1 > E_{\max}$ 时,即光刻胶启动曝光量大于潜像光栅最大曝光量,此时光刻胶最大溶解速度为 0,光刻胶表面没有变化,由于曝光量不足不能形成具有浮雕形状的光栅掩模。

3 光栅掩模槽形随光刻胶特性曲线演化规律的具体讨论

3.1 光刻胶非线性特性显著时光栅掩模槽形的变化

光刻胶非线性效应主要与显影温度、显影液浓度和光刻胶前烘温度有关,在显影液适用范围

内,显影液温度越高,光刻胶非线性效应越显著,启动曝光量也越大^[15]。启动曝光量的大小对光栅掩模槽形的影响如图 4 所示。

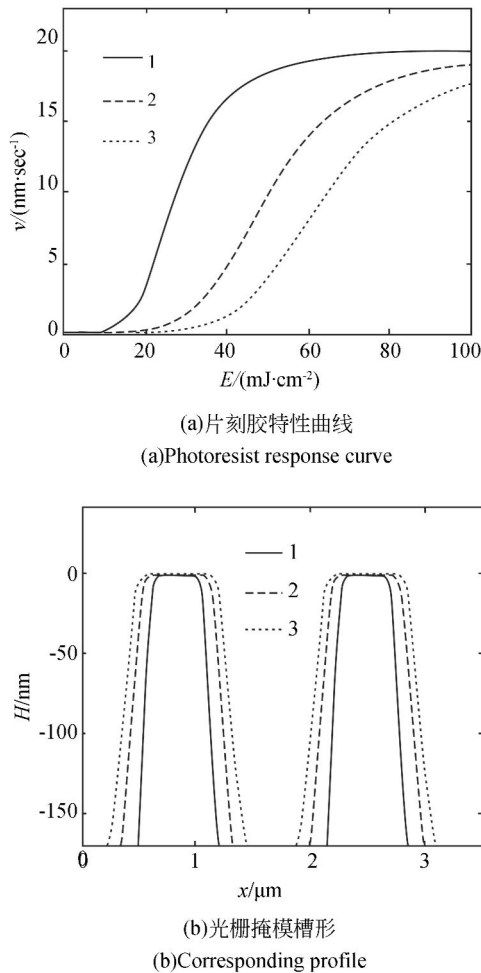


图 4 启动曝光量大小对光栅掩模槽形的影响

Fig. 4 Effect of threshold volume of exposure on grating profile

由图 4 可知,启动曝光量主要影响光栅掩模槽顶的宽度。在制作相同刻线密度光栅掩模时,启动曝光量越大,光栅掩模平顶越大,反之则越小。在实验制作中光栅掩模平顶大小所占周期比例随光栅刻线密度的不同而不同,相对于低刻线密度光栅掩模,高刻线密度光栅掩模不易形成平顶槽形,其主要原因是光刻胶最小分辨率决定了光刻胶平顶宽度的极小值,高刻线密度光栅掩模形成的槽顶平顶宽度很小,故光刻胶在显影过程中不易保持槽顶的完整性,多数高刻线密度光栅掩模侧壁陡度不变,槽顶近似为圆形。

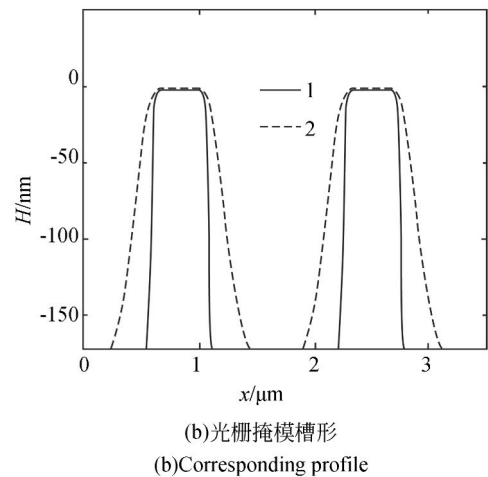
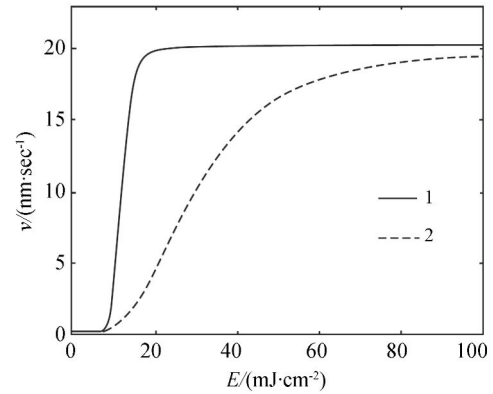


图 5 光刻胶特性曲线线性区域斜率对光栅槽形侧壁的影响

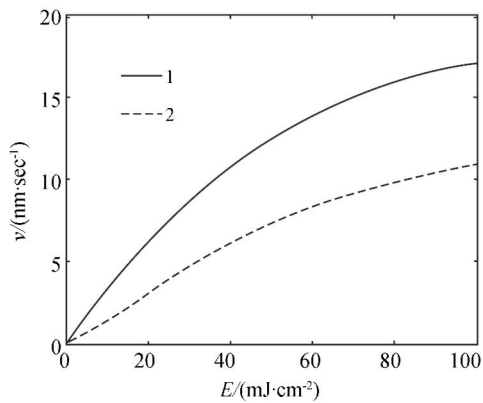
Fig. 5 Effect of slope of linearity zone on grating sidewall profile

图 5 分析了启动曝光量相同,光刻胶线性变化区域斜率不同对光栅掩模槽形的影响。由图 5 可知,光刻胶特性曲线的线性斜率主要影响光栅掩模槽形侧壁的陡度,线性斜率越大,光刻胶非线性越显著,光栅槽形侧壁越陡,即在模型中 E_1 越接近于 E_2 ,光栅掩模槽形越接近于矩形;特性曲线的线性斜率减小时,光刻胶非线性度减小, E_2 逐渐增大,此时光栅槽形侧壁趋于平缓,形成的光栅掩模槽形接近于梯形。

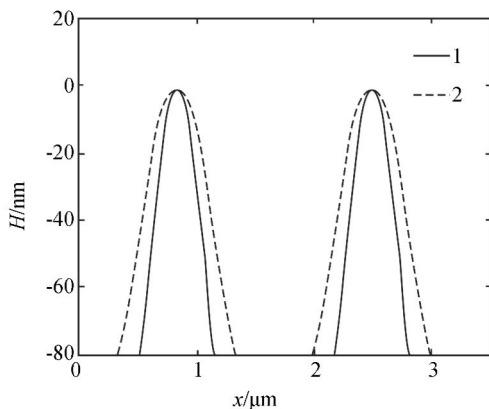
3.2 光刻胶线性效应显著时光栅掩模槽形的变化

为有效改善刻蚀工艺中的再堆积现象,当制作适宜离子束刻蚀的低陡度全息光栅掩模时,都刻意把显影工艺条件控制在线性区内,如采用低

温长时间显影或控制潜像光栅最小曝光量在启动曝光量之上^[15],满足条件 $E_{\min} > E_1$,此时光刻胶在显影液中的溶解速率进入线性变化区,其槽形如图 6 所示。



(a) 片刻胶特性曲线
(a) Photoresist response curve



(b) 光栅掩模槽形
(b) Corresponding profile

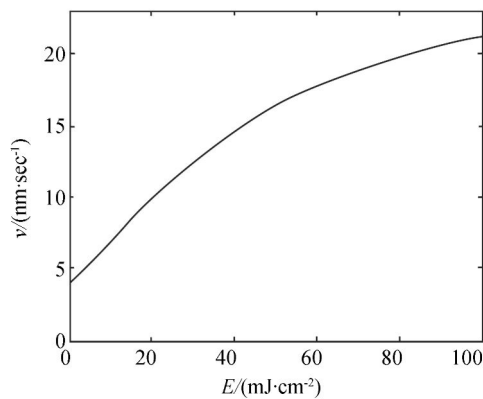
图 6 光刻胶特性曲线线性效应显著时光栅掩模槽形形状

Fig. 6 Profile evolution for a strong linear photoresist response curve

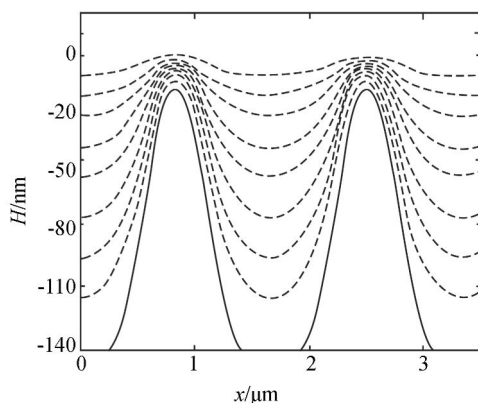
由图 6 可以看出,当光刻胶特性曲线随曝光量呈线性变化时,光栅槽形平顶区域消失,槽形呈现正弦形状,在相同显影时间内,掩模槽形侧壁陡度与光刻胶特性曲线的斜率有关,斜率越大,掩模槽形侧壁越陡;斜率越小,则槽形侧壁陡度趋于平缓,槽形越接近于正弦形。

在实际制作低陡度正弦光栅掩模时,光栅掩模槽深有所减小,而具有平顶槽形光栅掩模不会发生槽深变化,其主要原因是,形成平顶掩模槽形时满足条件 $E_{\min} < E_1$,即最小曝光量小于启动曝

光量,因此光刻胶最小溶解速度为 0,光栅槽深不发生变化;当光栅掩模槽形为正弦形时,由光栅掩模槽形演化模型可知满足条件 $E_1 < E_{\min}$,此时光刻胶最小溶解速率增大使光栅掩模槽深减小。掩模槽深的变化与最小曝光量溶解速率有关,槽形演化如图 7 所示。



(a) 片刻胶特性曲线
(a) Photoresist response curve



(b) 光栅掩模槽形
(b) Corresponding profile

图 7 背景光较强对光栅掩模槽深的影响

Fig. 7 Effect of strong linear photoresist curve with light background on groove depth

引起光栅槽深变化的原因主要有三个:第一,条纹对比度的变化使光刻胶最小曝光量增大,当满足条件 $E_{\min} > E_1$ 时,光刻胶溶解速率随曝光量变化呈现线性关系,从而使光刻胶最小溶解速度增大,光栅槽深减小;第二,曝光光束在光栅基底间较强地反射及光刻胶内部相互散射(统称背景光),导致光刻胶暗条纹处存在暗曝光,使最小曝光量增大,光栅掩模槽深逐渐减小;第三,根据光刻胶在显影液中的特性曲线可知,光刻胶即使在

完全没有接受曝光的条件下也存在微小的溶解速度,从而使光栅槽深减小。故控制光栅槽形的槽深变化需要提高曝光光束的条纹对比度及减小光栅基底的背景光。

4 实验验证

使用波长为 413.1 nm 的 Kr^+ 激光作为记录光源,通过曝光及显影实时监测技术控制曝光量及显影时间,ShipleyS1805 光刻胶作为记录介质,在曝光量相同的条件下,不同显影条件下测得的光栅掩模槽形数据见表 2,图 8 左侧为光栅掩模测量的 AFM 剖面图片,右侧为根据显影模型模拟的光栅掩模槽形。

表 2 不同显影条件下的光栅掩模槽形比较

Tab. 2 Comparison of grating profile parameters in different experimental data

编号	浓度	温度/ $^{\circ}C$	初始厚度/nm	槽深/nm	槽形
(a)	1:6	20	150	148	矩形
(b)	1:8	20	150	145	梯形
(c)	1:8	15	150	123	正弦形

图 8 为通过调节显影液温度及浓度控制光刻胶特性曲线^[18]而制作的光栅掩模槽形与数值模拟槽形的对比图,其不同显影条件下的光刻胶特性曲线见图 2。从图中可知,在显影浓度较大,温度为 $20^{\circ}C$ 时光刻胶非线性效应较为显著,此时易形成矩形掩模,其槽深为 148 nm,如图 8 (a) 所示;随着显影浓度逐渐降低,光刻胶的非线性效应有所抑制,此时易形成槽深不变的梯形光栅掩模,如图 8 (b) 所示;当采用低温长时间显影,光刻胶特性曲线线性效应较为显著,光刻胶溶解速率处在特性曲线线性区域内时,光栅掩模槽形多数为正弦形,光栅掩模槽脊由于受到侵蚀而使槽深减少 27 nm,如图 8 (c) 所示。因此,通过抑制或扩大光刻胶非线性效应可有效改变光栅掩模槽形,该结论和经数学模型分析的槽形演化结果较为一致。

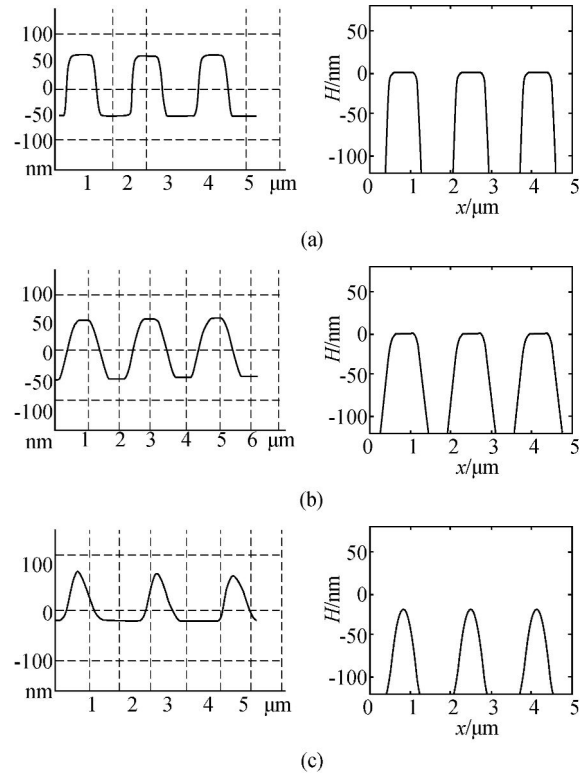


图 8 实验制作光栅槽形原子力剖面图和数值模拟槽形比较

Fig. 8 Comparison between AFM photography and simulated profile

5 结论

为提高光栅掩模槽形的控制精度,使用分段分析方法将光刻胶特性曲线分为曝光启动区、线性变化区及曝光饱和区,建立光栅槽形随光刻胶特性曲线变化的数学模型,并分别讨论各区域对光栅掩模槽形的影响,得到如下结论:(1)当光刻胶特性曲线非线性效应显著时,光栅掩模槽形易制作成矩形或梯形;当光刻胶特性曲线线性效应比较显著时,光栅掩模易制作成低陡度的正弦槽形。(2)最小曝光量增大会引起光栅掩模槽深的减小,故平顶槽形的光栅掩模槽深不会变化,而槽深减小的掩模槽形一定为正弦形。(3)建立的数学模型正确反映了光栅掩模槽形随光刻胶特性曲线变化的演化规律,为实验中通过调节显影温度、显影时间、显影液浓度等显影条件改变光刻胶特性曲线和制作不同掩模槽形提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
MENG X F, LI L F. Methods for increasing side-wall steepness of reactive-ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 189-193. (in Chinese)
- [2] 赵博,齐向东. 高效平面全息衍射光栅的获取方法[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2):109-114.
ZHAO B, QI X D. Manufacturing of high efficient holographic diffraction gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):109-114. (in Chinese)
- [3] 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/洛艾镜干涉系统[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]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1):56-63. (in Chinese)
- [4] 谭鑫,李文昊,巴音贺希格,等. 紫外全息闪耀光栅的制作[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7):1536-1542.
TAN X, LI W H, BAYANHESHIG, *et al.*. Fabrication of ultraviolet holographic blazed grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1536-1542. (in Chinese)
- [5] 巴音贺希格,张浩泰,李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):229-234.
BAYANHESHIG, ZHANF H T, LI W H. Mathematical model and experiment verification of spin coating on concave spherical substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):229-234. (in Chinese)
- [6] DILL F H, HORNBERGER W P, HAUGE P S, *et al.*. Characterization of positive photoresist[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1975, 22(7):445-452.
- [7] MACK C A. Development of positive photoresist[J]. *Electrochem. Soc.*, 1987, 134:148-152.
- [8] MELLO B A, COSTA I F, LIMA C R A, *et al.*. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(4):597-603.
- [9] ZANKE C, GOMBERT A, ERDMANN A, *et al.*. Fine-tuned profile simulation of holographically exposed photoresist gratings[J]. *Opt. Comm.*, 1998, 154(1):109-118.
- [10] BRITTEN J A, BOYD R D, SHORE B W. In-situ end-point detection during development of submicrometer grating structures in photoresist[J]. *Opt. Eng.*, 1995, 34(2):474-479.
- [11] 赵劲松,李立峰,吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟[J]. 光学学报, 2004, 24(8):1146-1150.
ZHAO J S, LI L F, WU ZH H. Modeling of In-Situ Monitoring curves during development of holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8):1146-1150. (in Chinese)
- [12] 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.
ZHAO J S, LI L F, WU ZH H. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6):851-858. (in Chinese)
- [13] 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.
KONG P, BAYANHESHIG, LI W H, *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. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHAO J S, LI L F, WU ZH H. Method for controlling groove depth and duty cycle of rectangular photoresist gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9):1285-1291. (in Chinese)
- [15] 刘全,万华,吴建宏. 低梯度光刻胶光栅槽形研究[J]. 光子学报, 2008, 37(7):1401-1405.
LIU Q, WAN H, WU J H. Research on acquisition of low gradient photoresist gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(7):1401-1405. (in Chinese)
- [16] 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.
CHEN G, WU J H, LIU Q. Study on the profile

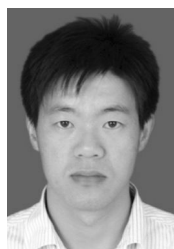
evolution of the photoresist grating mask and its law[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(1):133-140. (in Chinese)

- [17] MONTOYA J C, CHIH H CH, HEILMANN P K, *et al.*. Doppler writing and linewidth control

for scanning beam interference lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, 23(6), 2640-2645.

- [18] ARTHUR T, HO W K, KIEW C M, *et al.*. Real-time control of photoresist development process [J]. *SPIE*, 2005, 5755: 244-250.

作者简介:



韩建(1984—),男,山东德州人,博士研究生,2007年于聊城大学获学士学位,主要从事光栅理论,光栅制作技术方面的研究。E-mail: hanjian523@163.com



孔鹏(1981—),男,山东曲阜人,2003年于曲阜师范大学获学士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事平场全息凹面光栅设计与制作工艺方面的研究。E-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn



李文昊(1980—),男,内蒙古赤峰人,博士,副研究员,2002年于陕西科技大学获学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要研究方向为平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺。E-mail: leewenho@163.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,1984年于内蒙古民族大学获学士学位,2001年于吉林大学获硕士学位,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术方面的研究。E-mail: bayin888@sina.com

导师简介:

●下期预告

X 射线单色成像用透射式对数螺线晶体分析器

毋玉芬¹,肖沙里¹,鲁建¹,钱家渝¹,阳庆国²,黄显斌²

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 中国工程物理研究院 流体物理研究中心,四川绵阳 621900)

研究了一种用于等离子体 X 射线单色成像的透射式对数螺线晶体分析器,与反射式弯晶成像谱仪相比,该分析器具有单能成像视场更大,实现相同放大倍数时的空间排布简单等优点。根据晶体衍射成像原理及对数螺线晶体的表面方程,分析了透射式对数螺线晶体分析器的成像原理和成像性能,包括子午、弧矢放大倍数以及视场大小等。研制了石英晶体透射对数螺线分析器,以铬靶 X 射线源为背光源,对网丝直径为 100 μm 的金属网格进行了单色背光成像实验,实验结果表明,晶体分析器的空间分辨力约为 30 μm ,子午和弧矢方向视场分别达到 15.938 7 和 5.900 6 mm。