

文章编号: 0253-2239(2004)09-1285-7

# 一种控制矩形光刻胶光栅槽深和占宽比的方法\*

赵劲松<sup>1</sup> 李立峰<sup>1</sup> 吴振华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学精密仪器系, 北京 100084  
<sup>2</sup> 北京光学仪器厂光栅研究室, 北京 101149)

**摘要:** 利用光刻胶的非线性效应可以制作出了矩形的全息光栅。制作矩形光栅时,对槽形的控制被简化为对槽深和占宽比这两个参量的控制。首先借助实时潜像监测技术获得最佳曝光量,然后根据显影监测曲线的特征找出光栅槽底的残胶厚度为零的显影时刻,就能得到槽底干净的矩形光栅,同时保证槽深近似等于光刻胶的初始厚度;如果此后继续显影,就能适度减小占宽比。实验结果和理论分析都证实了这种控制方法的可靠性。对 1200 lp/mm 的光栅,目前工艺能精确调控的最大槽深为 1  $\mu\text{m}$ ,占宽比在 0.2~0.6 范围内。实验还揭示,为了提高对光栅槽形的调控能力,必须首先提高干涉条纹的稳定性。

**关键词:** 物理光学; 矩形光刻胶光栅; 槽深; 占宽比; 实时监测技术; 全息光栅; 掩模  
中图分类号: TH74 文献标识码: A

## Method for Controlling Groove Depth and Duty Cycle of Rectangular Photoresist Gratings

Zhao Jinsong<sup>1</sup> Li Lifeng<sup>1</sup> Wu Zhenhua<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084  
<sup>2</sup> Department of Grating Research, Beijing Optical Instruments Factory, Beijing 101149)

(Received 23 June 2003; revised 25 September 2003)

**Abstract:** Rectangular photoresist gratings can be fabricated by taking advantage of the nonlinearity of photoresist. For rectangular gratings the task of controlling groove profile is simplified to controlling the duty cycle and groove depth. By monitoring diffraction intensity of latent image in photoresist in real time, the optimal exposure dose can be determined. Then, by observing characteristic behavior of the development-monitoring curve, the development process can be stopped at the moment when photoresist at the groove troughs is completely etched away. Therefore, rectangular grooves with clean troughs can be obtained; meanwhile the groove depth is kept equal to the initial photoresist thickness. Further development will reduce the duty cycle. It has been proven reliable by experiments and theoretical analysis. For gratings with 1200 lp/mm groove spacing, the groove depth up to 1  $\mu\text{m}$  has been controlled accurately in authors' present fabrication, and the duty cycle value obtained is in the range 0.2 to 0.6. The experimental results have also demonstrated that good controllability of groove profiles depends on good fringe stability of the laser interference patterns.

**Key words:** physical optics; rectangular photoresist grating; groove depth; duty cycle; in-situ monitoring technique; holographic grating; mask

## 1 引 言

随着离子束刻蚀技术的发展,用全息的方法制作光栅掩模,然后利用离子束刻蚀制作闪耀全息光栅的工艺日见成熟<sup>[1]</sup>,这种光栅兼具全息光栅和闪

\* 国家 863 计划资助课题。

E-mail: zhaojinsong@tsinghua.org.cn

收稿日期:2003-06-23; 收到修改稿日期:2003-09-25

耀光栅的优点,我们采用的就是这种制作方法。

离子束蚀刻光栅的槽深受限于光栅掩模的槽深、槽底的干净程度、光刻胶和基底材料的离子束蚀刻速率差;其占宽比决定于掩模的占宽比;而其沟槽表面的光洁度主要受掩模槽底的干净程度影响。实验表明光刻胶与常用光栅基底材料的离子束蚀刻速率很相近,因此要把光栅掩模沟槽很好地传递到基底中去是比较困难的。为了分担离子束蚀刻工艺步骤的技术难点,我们规定具有特定占宽比、槽深,且槽底干净无残胶的矩形全息光栅是合格的掩模。

矩形全息光栅除了做优质的掩模外,还可做特种分束元件<sup>[2]</sup>,如果在高反膜上制作矩形光栅,控制好槽深和占宽比,在自准直条件下反射负一级可以获得高于 95% 的衍射效率<sup>[3]</sup>。对 1200 lp/mm 的光栅,用机械刻划很难制作出良好的矩形槽形,利用电子束直写的制作成本很高<sup>[4]</sup>。所以,精确控制矩形全息光栅的槽形是很有意义的。在前期工作中<sup>[5,6]</sup>,我们已经在曝光和显影中建立了相应的实时监测技术,初步掌握了利用光刻胶非线性效应的规律,而且能够使用光栅严格理论计算任意槽形光栅的衍射效率,所以具备了比较精确地控制矩形光栅槽形的能力。

在本文中,我们先进行了两组实验以分别探讨全息光栅槽深和占宽比的控制方法,同时结合理论模拟分析进一步证实了相应控制方法的可行性,并揭示了一个能分步实现多个工艺控制目标的最佳工艺策略。最后讨论了扩大调控全息光栅槽形能力的途径。

## 2 全息光栅槽深的控制

矩形全息光栅槽形的精确控制有三个基本要求:光栅槽底干净、无残胶;特定的槽深;特定的占宽比。在保证槽底干净的前提下,在本节中先讨论槽深的控制技术。

### 2.1 实验原理和方法

对全息光栅制作工艺的关键步骤曝光和显影,我们采用实时监测技术,由于监测信号与光栅沟槽(曝光时为潜像)演化程度是一一对应关系,根据监测曲线特征就可分别优化出最佳曝光和显影时间,这种优化实际表现为后步工艺对先前工艺波动的最佳补偿。曝光和显影的优化控制方法我们已经分别在文献<sup>[5]</sup>和<sup>[6]</sup>中专门讨论过了,本文不再赘述。在文献<sup>[7]</sup>中,阐述了曝光和显影的补偿控制原则,

指出借助实时的潜像监测技术对于不同的光刻胶厚度都可以获得最佳曝光量,从而保证显影补偿控制能顺利进行;显影对曝光的补偿控制程度只能由实时的显影监测曲线特征来判定。因此,可以充分利用光刻胶的非线性效应,用全息的方法制作出矩形光栅<sup>[6]</sup>,并对槽形进行精确控制。

在 1200 lp/mm 全息光栅的制作中,我们使用 441.6 nm 的 He-Cd 激光作为记录(和潜像自监测)光源,显影实时监测波长采用 632.8 nm 的 He-Ne 激光,使用 Shipley S1805 光刻胶和 Shipley 351 显影液,显影液与去离子水的体积稀释比为 1:4,光栅基底的面积为 75 mm×75 mm 和 76 mm×26 mm 两种。

### 2.2 实验结果

光栅槽形的精确控制首先要使槽底干净、无残胶。要根据显影监测曲线特征判断出光栅槽底残胶厚度为零的显影时刻,必须先分析清楚显影监测曲线与沟槽形状之间的对应关系。

图 1 展示的是胶厚分别为 0.46  $\mu\text{m}$ 、0.55  $\mu\text{m}$ 、0.75  $\mu\text{m}$  的三块样片的显影监测曲线和扫描电子显微镜照片,它们都在潜像监测曲线的线性上升区末端停止曝光,分别在显影监测曲线的特定位置停止显影[见图 1(a)~图 1(c)],最终都获得了矩形槽形,槽底干净无残胶,占宽比也相近[见图 1(a')~图 1(c')]。由此可知,三块样片都获得了程度相同的显影补偿,其对应的工艺参量见附表 1。

Table 1 Photoresist thicknesses, exposure and development times corresponding to the samples in Fig. 1

Sample	Fig. 1	Exp. time /s	Dev. time /s	Photoresist thickness / $\mu\text{m}$
1	(a),(a')	180	67	0.46
2	(b),(b')	227	195	0.55
3	(c),(c')	214	182	0.75

从图 1 中的显影监测曲线可知,初始光刻胶厚度为 0.46  $\mu\text{m}$  和 0.55  $\mu\text{m}$  的两条监测曲线都有两个峰,后者的峰与峰之间的跨度明显增大。对 0.75  $\mu\text{m}$  的初始光刻胶厚度,监测曲线也只有两个峰,但是细心的读者可能已经注意到,在第二个峰的上升沿似乎还有一个被压制了的潜在峰值存在。大量的实验结果确实显示,在这个区域常出现一个峰值,但是有时它并不显现,这是因为当初始光刻胶厚度为某些特定的值时,且在显影过程中槽深的增加伴随有占宽比的微量减小,因而抑制了该峰值的出现。如果显影在最后一

个峰值之后不远处停止,那么,对三种光刻胶厚度,所得的光栅槽底都能达到无残胶。

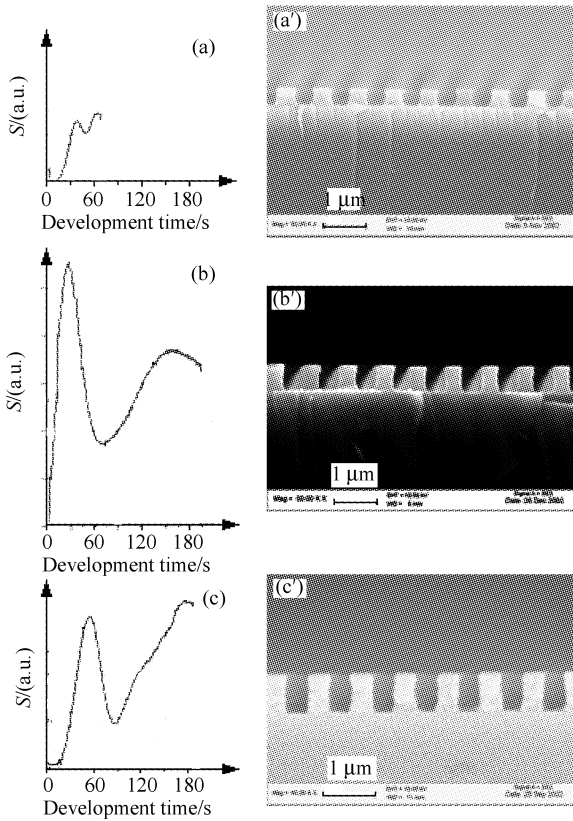


Fig. 1 Development monitoring curves of samples of different initial photoresist thicknesses [(a)  $0.46 \mu\text{m}$ , (b)  $0.55 \mu\text{m}$ , (c)  $0.75 \mu\text{m}$ ] and their corresponding SEM photographs [(a')~(c')]. In (a)~(c), the vertical axes refer to the signal intensities detected by a photomultiplier tube

文献[8]报道,当光刻胶厚度为 $0.15\sim 0.20 \mu\text{m}$ 时,使用  $632.8 \text{ nm}$  波长得到的显影监测曲线只有一个峰值。文献[9]报道,当胶厚为  $0.67 \mu\text{m}$  时,对于  $1064 \text{ nm}$  和  $825 \text{ nm}$  的监测光,实验和模拟显影监测曲线都分别有两个和三个峰值。从上述分析可以得出,当监测波长被确定后,显影监测曲线的峰值数量主要是由光刻胶的初始厚度决定的,但是两者之间的关系还依赖于其它一些因素。

### 2.3 理论模拟分析和讨论

假设在显影过程中全息光栅的槽形是理想的矩形,并且占宽比没有变化(假定为  $0.5$ ),显影监测波长是  $632.8 \text{ nm}$ ,我们使用一个叫做 KAPPA<sup>[10]</sup> 的光栅软件,模拟计算了在满足自准直条件下反射负一级的衍射效率随槽深和槽底残胶厚度的变化,如图 2(a)所示,其中纵轴是光栅槽深,横轴是残胶厚

度,由于我们的涂胶厚度一般小于  $0.8 \mu\text{m}$ ,所以坐标轴最大值取为  $0.9 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,负一级衍射效率的峰值随槽深和残胶厚度变化呈现准周期的二维分布,但是各峰值及其宽度的大小不同。

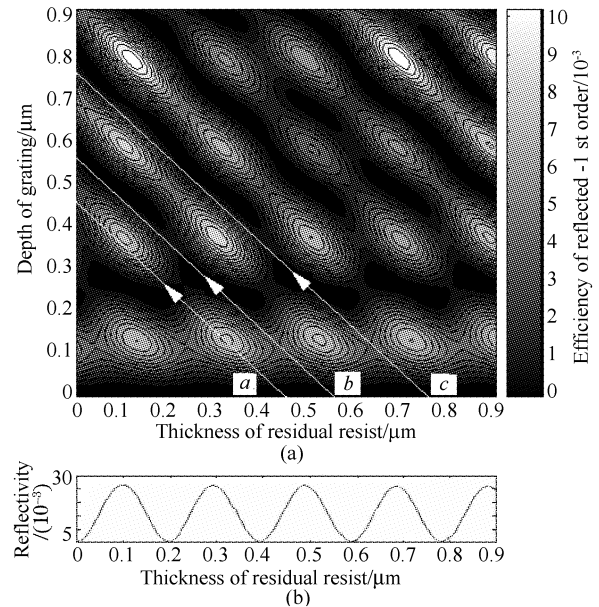


Fig. 2 (a) The efficiency of the reflected -1st order diffraction of rectangular gratings is simulated as a function of groove depth and residual photoresist thickness. (b) The reflectivity of a uniform photoresist layer coated on the substrate is a function of its layer thickness. The oscillations of the two functions with change of photoresist thickness are synchronized

在实际显影中,随着光栅槽深的增大,残胶厚度减小。实验表明,我们获得的矩形全息光栅凸起部分(栅脊)的顶部基本都保持了光刻胶初始表面的平整状态,如图 1(a')~图 1(c')所示,因此可以认为暗条纹中心位置对应的栅脊胶层没有减薄现象,也就是说变化集中在明条纹中心位置对应的沟槽底部(栅谷),而且槽深增加的速度等于残胶减薄的速度。根据这个实验事实可对上述模拟结果进行如下分析。把图 2(a)中的点对  $(0.46, 0)$  和  $(0, 0.46)$ ,  $(0.55, 0)$  和  $(0, 0.55)$ ,  $(0.75, 0)$  和  $(0, 0.75)$  分别用直线连接起来,可得到  $a, b, c$  三条直线,沿箭头所指方向读取反射负一级衍射效率的数值,就得到衍射效率随槽深增加(残胶减薄)的特性曲线;如果栅谷处的显影刻蚀速度是恒定的(槽深和显影时间呈正比关系),则可把上述特性曲线的横轴视为时间轴,就得到一条在残胶为零时停显的显影监测曲线的粗略模拟。

所以,由图 2(a)中的  $a, b, c$  三条矢性直线,可以

分别获知  $0.46\ \mu\text{m}$ ,  $0.55\ \mu\text{m}$  和  $0.75\ \mu\text{m}$  三种胶厚对应的显影监测曲线的主要特征,前两者都有两个峰值,但是  $a$  对应的监测曲线的两个峰值大小相近,峰值跨度较小, $b$  对应的监测曲线的第一峰值比第二峰值大得多,峰值跨度较大; $c$  对应的显影监测曲线有三个峰值,第二个峰值较小,后两个峰值几乎连在一起。如果直线  $c$  被变成稍微向上凸的曲线,第二个峰值就可能消失。可见,这与我们先前的理论结果(参见文献[6])和实验获得的监测曲线[图 1(a)~图 1(c)]的基本特征是一致的,说明这种分析方法是合理的。因此,从图 2(a)中,我们可以方便地预知任意光刻胶厚度对应的显影监测曲线的基本特征,以及不同峰值数目对应的胶厚的粗略取值范围。

从此图还可以看出,胶厚的微小变化将导致显影监测曲线外形明显不同,某些特殊情况下曲线的某个部位还会出现异常大或异常小的信号幅值,所以根据监测曲线的绝对幅值来判断显影终止时刻是没有简单规律可循的。但是,显影监测曲线的峰谷相对位置与槽深(残胶厚度)之间存在一种准周期的对应关系,所以制作者可以借此来控制显影刻蚀过程中的槽深。下面进一步讨论残胶厚度为零时的监测曲线的普遍变化规律。

我们使用的 Shipley 351 显影液、Shipley S1805 光刻胶和玻璃基底材料对于  $632.8\ \text{nm}$  监测波长的折射率分别近似为  $1.33$ ,  $1.659$  和  $1.52$ ,由于作为中间媒质的光刻胶的折射率最大,所以在显影液中残胶的存在只能对玻璃基底产生增反射的作用。图 2(b)是显影液、光刻胶和基底形成的单层薄膜的反射率随胶厚变化的曲线,此曲线的振荡和图 2(a)中衍射效率随残胶厚度准周期振荡是基本合拍的。所以,在显影过程中残胶对光栅衍射效率的作用可看成是一层厚度不断减薄的单层增反膜,其重要意义在于,对于任意的光刻胶初始厚度,总是在残胶厚度快为零时显影监测曲线出现最后一个峰值。因此,在显影监测曲线最后峰值之后的适当位置停显,这就是全息光栅制作中保证槽底干净、无残胶的显影终止时刻的判定依据。

综上所述,如果曝光量被选在最佳值,则栅脊胶层在显影过程中就几乎没有减薄的现象,那么,槽底无残胶时终止显影所得的光栅槽深应该近似等于光刻胶的初始厚度。可见,矩形全息光栅槽深的控制有三个关键技术问题:光刻胶初始厚度、最佳曝光量、和显影终止点的控制。

本节中的分析方法能够简洁、直观地给出不同

监测曲线峰值数目对应的胶厚取值范围,这对工艺制作很有指导意义。其缺点在于只能粗略地判断不同胶厚所对应的显影监测曲线的基本形状,这是由于实际显影过程要比本节中的假设过程复杂,首先光栅槽形不会一直是理想的矩形,其次在槽深变化的同时占宽比也在微小地变化。因此,如果要理论模拟分析各个工艺参量与光栅槽形的对应关系,以及更准确地模拟出显影监测曲线,就需要采用在文献[6]中专门建立的显影理论模型,然后进行严格的衍射效率计算。

### 3 全息光栅占宽比的控制

占宽比是影响光栅衍射效率的主要因素之一,在离子束刻蚀对全息光栅的槽形进行转移的过程中不可能再对其进行调整,所以必须在全息光栅掩膜的制作中就控制好占宽比。

#### 3.1 实验结果

本小节的实验原理和方法与 2.1 小节同。

初步实验表明,影响矩形全息光栅占宽比的因素主要有烘烤、曝光和显影工艺,其中烘烤工艺通过影响光刻胶的感光灵敏度而对占宽比具有微小的调整能力;曝光对占宽比的影响非常显著,但受限于干涉条纹的稳定性,致使曝光量与占宽比的对应关系波动性较大,难以利用。因此,我们目前在显影过程进行对占宽比调控的工艺研究。

图 3(a)~图 3(c)给出样片 4、5、6 的实时潜像监测曲线,它们的显影监测曲线见图 3(a')~图 3(c'),对应的扫描电子显微镜照片见图 3(a'')和图 3(b'')(样片 6 无照片)。三块样片胶厚均为  $0.75\ \mu\text{m}$ ,都在潜像监测曲线的线性上升区末端停止曝光,即都获得了最佳曝光量;其中样片 4 和 5 都在显影监测曲线的最后一个峰后停止显影,但样片 5 的停显位置远离此峰的相对距离更大,结果是后者的占宽比要小得多;样片 6 被进行了全程显影,停显后发现光刻胶几乎被刻蚀干净了,因此无照片,三块样片的工艺参量见附表 2。由此可知,对于  $0.75\ \mu\text{m}$  的胶厚,虽然各样片的显影刻蚀速率相差很大,但是显影监测曲线外形很相似,在显影监测曲线的最后一个峰后停止显影都能得到无残胶的光栅槽底,停显点越远离最后一个峰,所得的占宽比越小。其中最值得注意的是,在最后一个峰后显影监测曲线的幅值缓慢地变化并单调下降趋于零。如果曲线的最后一个峰对应着槽底残胶为零的临界显影时刻,曲线幅值趋近于零对应着栅脊被完

全刻蚀的终点,这是否预示着:从全息光栅槽底残胶为零到栅脊被完全刻蚀的演化过程中,暗条纹中心处对应的光刻胶厚度(栅脊胶层)依然没有明显减薄的

现象,即光栅槽深没有变化,只是占宽比在不断减小,直至最后栅脊坍塌?

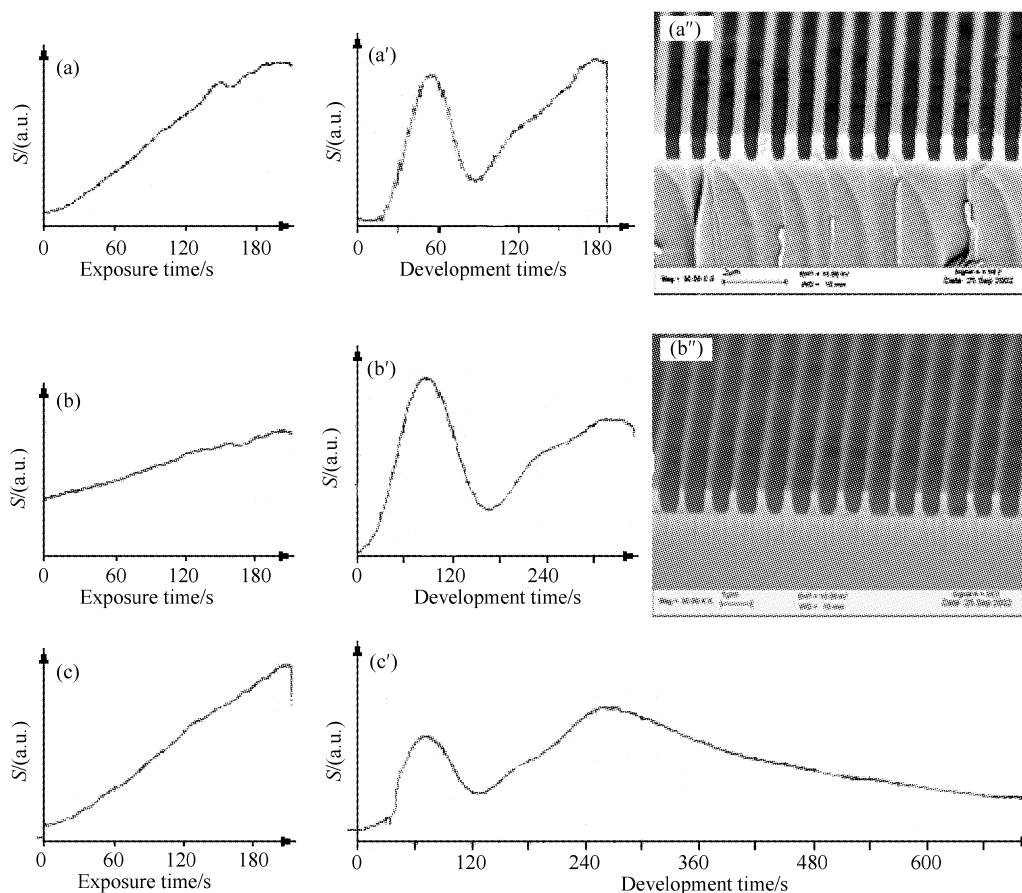


Fig. 3 Latent-image and development monitoring curves of some samples and their SEM photographs. Stopping development at the different points of the monitoring curves can result in different values of duty cycle

Table 2 Duty cycles, exposure and development times corresponding to the samples in Fig. 3

Sample	Fig. 3	Exp. time /s	Dev. time /s	Duty cycle
4	(a), (a'), (a'')	210	180	0.46
5	(b), (b'), (b'')	215	351	0.28
6	(c), (c')	212	736	overdeveloped

### 3.2 理论模拟分析和讨论

为了验证上述猜测,我们同样采用第 2.3 小节中关于光栅槽形是理想矩形的假设,显影的实时监测波长是 632.8nm,再次使用光栅软件 KAPPA,模拟计算了在满足自准直条件下反射负一级的衍射效率随槽深和占宽比变化的关系,如图 4 所示。在这里,光栅槽底的残胶厚度被设定为 0,纵轴是光栅槽深,横轴是占宽比;由于我们实验能得到的最大占宽比没有超过 0.6,所以横轴最大取值为 0.6。从图中可以看出,负一级衍射效率随着占宽比减小而很缓慢地变化,而随着槽深的减小出现多次振荡;对于

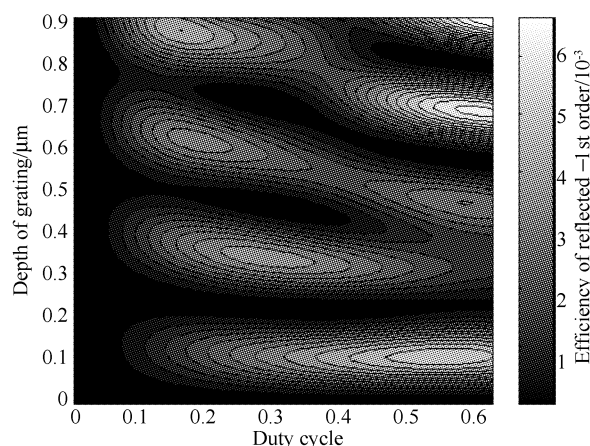


Fig. 4 The efficiency of the reflected -1st order diffraction of rectangular gratings is simulated as a function of groove depth and duty cycle 0.75  $\mu\text{m}$ 的胶厚,在占宽比从 0.6 减小至 0.2 之间(当占宽比小于 0.2 之后,光栅沟槽基本就坍塌了),

衍射效率果然单调地下降,这与显影监测曲线是一致的。如果在槽底残胶为零之后全息光栅槽形的演化是槽深不断减小(栅脊胶层不断减薄),无论有没有伴随着占宽比的减小,[在 2.3 小节中对图 2(a)的分析结果基础上]显影监测曲线将会再出现几个峰值,因为在图 4 中,负一级衍射效率随着槽深减小出现多次振荡(占宽比的伴随减小只会使变化路径按照偏离横、纵坐标轴的方向趋近坐标原点),这与实验现象是不吻合的。

此外,对于某些特定的胶厚(如  $0.35\ \mu\text{m}$ 、 $0.62\ \mu\text{m}$ 、或  $0.82\ \mu\text{m}$  左右),当占宽比从 0.6 减小至 0.2 时,衍射效率的变化仅可能出现一个峰值,也就是说,这些特定的胶厚对应的全程显影监测曲线一般会比槽底残胶刚好为零的时刻对应的监测曲线多一个峰值。这个附加峰是很容易与前面谈到的其它峰相区别开的,因为在槽深不变、占宽比减小这个显影阶段,光刻胶的刻蚀速率已经大大减小,所以这个附加峰在时间上来得迟,跨度大(当这个峰值出现时,光刻胶也几乎被蚀刻殆尽了,参看图 4)。无论如何,只要事先知道光刻胶的初始厚度值,根据图 2 和图 4 总能大致预测出全程显影监测曲线的形状,使借助显影监测技术对占宽比的调控仍然可以顺利进行。

因此,严格控制甩胶厚度,并准确获知厚度值,对精确控制全息光栅槽深和占宽比都是很有利的。如果在槽底残胶为零之前或者之后栅脊胶层有减薄现象,都会使相应的显影监测曲线部分地变得复杂,将分别影响对槽底残胶刚好为零或者获得期望占宽比的最佳显影终止点的判断,这进一步说明了最佳曝光量的重要意义。

总之,在显影阶段,由于先实现了光栅槽底干净无残胶,之后再对占宽比进行调整,最终还能够保证获得期望的光栅槽深,并维持较好的矩形沟槽轮廓,使复杂的工艺目标被分解并分阶段实现,这种工艺策略是很合理和有效的。如果改变曝光量对占宽比进行调控,就不能保证在整个显影过程中栅脊胶层没有减薄现象,则控制好占宽比后必然丧失对槽深的精确控制。

#### 4 扩大调控槽形能力的途径

对光栅槽形的调控能力包括两个方面:一是槽形几何参量可调控的范围,二是这些几何参量可控制的精度。

槽形几何参量可调控的范围包括三个方面:一

是光栅槽深有一个可控范围,槽深太大会导致栅脊坍塌,太小则使实时监测难以进行;二是光栅占宽比有一个可实现范围,占宽比太小也会导致栅脊坍塌,太大的占宽比主要受限于光刻胶感光灵敏度、干涉光强、干涉条纹稳定度,以及光栅基底周围的背景光噪声强度;三是光栅槽深与占宽比之间有一定制约关系,槽越深,要保证槽底干净、无残胶,只能牺牲占宽比,如果槽深较浅,则容易获得较大的占宽比。事实上,这种调控能力还和光栅周期有关,周期大者更易于控制。对  $1200\ \text{lp/mm}$  的光栅,实验证实目前我们的工艺能精确控制的最大槽深为  $1\ \mu\text{m}$ ,占宽比在  $0.2\sim 0.6$  范围内。图 5 展示的是我们获得的一组占宽比从大到小的矩形全息光栅,槽底都干净无残胶。

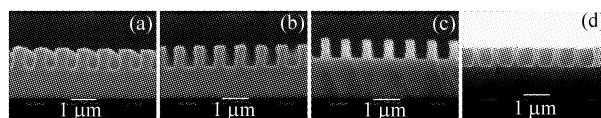


Fig. 5 SEM photographs of 4 samples. Their corresponding duty cycles are 0.52, 0.40, 0.35 and 0.27, respectively

全息光栅槽形的几何参量可控制的精度严重依赖于各个工艺条件的稳定性,用全息法制作矩形光栅,这种依赖关系表现得尤为显著。第 2 节中指出了精确控制光栅槽深的方法。第 3 节中阐述了在一定范围内调控占宽比的方法,可是控制精度还存在较大的波动性。为了分析清楚曝光和显影工艺条件对占宽比的影响,我们统计了一部分矩形全息光栅实验样片的资料,如图 6 所示,我们把占宽比设定为横轴,曝光和显影时间均设定为纵轴,由于曝光和显影的时间取值范围重叠在一起,为了便于比较,我们把二者分成上下两图,见图 6(a)和图 6(b),两图中横坐标相同者为同一块样片。这些样片都在实时潜像监测曲线的线性上升区末端停止曝光,都在槽底残胶为零时刻停止显影,没有进行显影过程中的占宽比调整,即光栅的占宽比是保证槽底残胶刚好为零的条件下自然形成的。从图中可以得出,最佳曝光量漂移的补偿波动范围基本在  $60\ \text{s}$  内,而对应的最佳显影补偿时间相差非常大,最长的显影时间是最短显影时间的 10 倍,所得占宽比的波动范围比较大,从 0.22 到 0.46 不等。值得注意的是,随着占宽比的减小,最佳补偿显影时间明显地呈现增大趋势,这是因为,虽然所有样片都获得最佳曝光量,但是随着干涉条纹稳定性变差,不同样片的明暗条纹中心处对应的已曝光的感光剂分子浓度之差<sup>[5]</sup>却变小(即明条纹中心处实际曝光量减小,而暗条纹中心处

实际曝光量增大),结果是显影刻蚀速率变小,最佳显影时间增大,同时占宽比减小。可见,条纹不稳定将导致最佳曝光和显影时间明显波动,继而影响占宽比的控制精度。

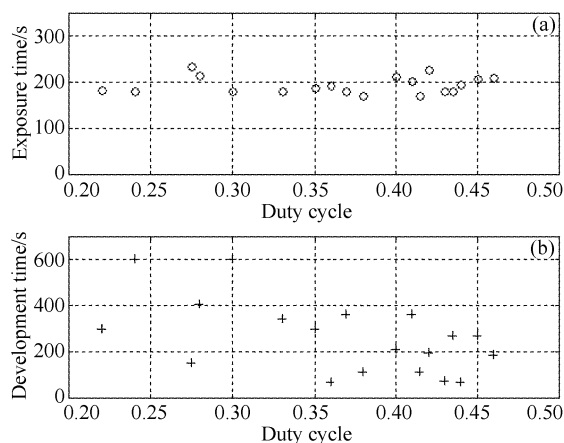


Fig. 6 Statistical graphs of experimental samples. (a) The optimal exposure times vary within 60 s, and (b) their development times can differ up to a factor of 10. The same duty cycle value corresponds to the same sample. Poor stability of the interference pattern results in a longer development time and a smaller duty cycle

在第3节中讨论到,从光栅槽底残胶为零到栅脊被完全刻蚀的过程中,显影监测曲线变化平缓,缺乏明显特征,操作者只能根据曲线斜率与与最后一个峰值的相对距离判断停显时间,因此占宽比的控制精度严重依赖于不同样片显影监测曲线的一致性,曲线的重复度越高,占宽比的控制才越精确。事实上,在相同的初始光刻胶厚度、曝光和显影优化控制方法下,导致监测曲线不一致的主要原因就是干涉条纹的不稳定性。可见,要提高占宽比的控制精度,首要问题就是要提高干涉条纹稳定性和对比度。

**结论** 借助实时的监测技术能够制作出矩形的全息光栅,这使得工艺制作的目标可以明确为对光栅槽深和占宽比的控制。实验结果揭示,只要在甩胶过程中对光刻胶厚度进行准确的控制,通过潜像监测曲线优化得到最佳曝光量,然后合理地利用显影监测曲线的特征找出光栅槽底残胶为零的最佳显影终止时刻,就能得到矩形、槽底干净、无残胶和期望槽深的全息光栅沟槽形状;如果在光栅槽底残胶为零后继续显影,就能适度减小占宽比,在此期间仍能保

持槽深不变。理论分析的结果也证实了这种槽深和占宽比的控制方法是很有有效的。

对 1200 lp/mm 的全息光栅,目前工艺可调控的槽深和占宽比的范围基本能够满足全息光栅或掩模的需求,并能保证 70 mm×70 mm 面积范围内沟槽具有较好的均匀性。在后续工作中,对 1480 lp/mm 的光栅采用这种控制方法仍然是很成功的。这项技术通过精确控制矩形光栅的槽形,使精确调控光栅的衍射效率成为了可能。

最后指出,全息干涉系统的性能决定了对光栅槽形的调控能力,其中主要表现为,干涉条纹稳定性的波动严重影响了对占宽比的调控精度。为了扩大对光栅槽形的调控能力,只有从根本上提高干涉条纹稳定性和对比度。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Shaoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng *et al.*. *Diffraction Gratings* (衍射光栅). Beijing: China Machinery Press, 1986 (in Chinese)
- 2 Zhang Haitao, Gong Mali, Zhao Dazun *et al.*. Design and error analysis of trapeziform grating for high density optical disk storage. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1): 92~98 (in Chinese)
- 3 Wei Hongbo, Li Lifeng. All-dielectric reflection gratings: a study of physical mechanism for achieving high-efficiency. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6255~6260
- 4 Li Yigui, Chen Di, Zhu Jun *et al.*. Sub wavelength gratings based on a new microfabrication technology. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8): 1008~1010 (in Chinese)
- 5 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(6): 851~858 (in Chinese)
- 6 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling for in-situ monitoring curves during development of photoresist gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(8): 1146~1150 (in Chinese)
- 7 Zhao Jinsong. *In-Situ Monitoring Techniques in Fabrication of Holographic Gratings* (全息光栅制作中的实时监测技术). Ph. D. dissertation, Tsinghua University, 2003 (in Chinese)
- 8 Li L, Xu M, Stegeman G I *et al.*. Fabrication of photoresist masks for submicrometer surface relief gratings. *Proc. SPIE*, 1987, **835**: 72~82
- 9 Britten J A, Boyd R D, Shore B W. In-situ end-point detection during development of submicrometer grating structures in photoresist. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(2): 474~479
- 10 KAPPA is a grating simulation software written by Li Lifeng one of the authors