

文章编号: 0258-7025(2008)02-0183-04

# 低密度台阶形闪耀光栅的制作

贾 伟 周常河 戴恩文 底彩慧

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 介绍了制作低密度闪耀光栅的过程,在制作时,对传统的制作过程进行了改进,有效提高了制作质量。以  $40\ \mu\text{m}$  闪耀光栅为例介绍了制作的过程,得到了良好的光栅表面形貌,并且闪耀级次的衍射效率达到了 70% 以上。相比传统的制作方法,效率提高了 5%~10%。对比了理论上的衍射效率,分析了实验误差,发现把存在对准误差的光栅进行处理将会有效地提高其衍射效率,为进一步提高闪耀光栅的衍射效率提供了依据。

**关键词** 衍射与光栅;闪耀光栅;低密度;衍射效率

**中图分类号** O 436.1 **文献标识码** A

## Fabrication of Low-Density Blazed Gratings

Jia Wei Zhou Changhe Dai Enwen Di Caihui

(Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The process of fabricating low-density blazed gratings is presented. Some novel improvements have been reported, which lead to gratings with better quality. In experiment,  $40\ \mu\text{m}$  period blazed gratings with uniform surface are obtained, and the diffraction efficiency of the first order is more than 70%. Compared with traditional method, the efficiency is increased by 5%~10%. Finally, the efficiency of experimental results is compared with theory value, and the reasons of experimental errors are given. It is found that if tips introduced by experiment errors can be removed, the efficiency will be increased greatly, which provide bases on getting better gratings and higher diffraction efficiency.

**Key words** diffraction and gratings; blazed grating; low-density; diffraction efficiency

## 1 引 言

高密度闪耀光栅因其极高的衍射效率等特点,已经在脉冲压缩、脉冲放大以及光谱分析等方面得到了广泛的应用<sup>[1~6]</sup>,其制作方法也日趋成熟。另一方面,虽然利用衍射光学理论设计并加工二元光学光栅的报道较多<sup>[7~9]</sup>,但是利用二元光学工艺技术加工低密度闪耀光栅的实验报道并不常见。事实上,低密度闪耀光栅有其独特的优点<sup>[10]</sup>,在飞秒激光整形技术中,它可以用来分束产生多脉冲,在提高分束效率的同时也不会引入太大的色散,而且还可以任意调节多脉冲之间的时间间隔;它可以用于飞秒腔内压缩,从而替代棱镜对,大大简化激光腔内空

间;另外它还可以用于脉冲腔外压缩,如果要求的压缩不是很大时,将是很不错的选择。因此有必要对低密度闪耀光栅的制作进行深入研究。

低密度闪耀光栅的制作一般采用湿法刻蚀的方法,这是由于低密度闪耀光栅的闪耀角很小(一般在  $5^\circ$  以内,甚至小于  $1^\circ$ ),而一般机械刻画的方法只适用于闪耀角比较大的高密度闪耀光栅的制作。湿法刻蚀一般只能刻蚀台阶形光栅,用以模拟具有平滑斜面的闪耀光栅。本文为了尽可能地提高衍射效率,在制作过程中需要光栅形貌与理想台阶接近一致,介绍了  $40\ \mu\text{m}$  闪耀光栅的制作过程,并分析实验误差。

收稿日期:2007-06-27;收到修改稿日期:2007-09-10

基金项目:上海市科学技术委员会项目(06SP07003, 0652NM005)资助课题。

作者简介:贾 伟(1981—),男,山东人,博士研究生,主要从事脉冲压缩与脉冲测量技术的研究。E-mail:jw81@163.com

导师简介:周常河(1965—),男,研究员,博士生导师,研究方向为微结构与微光学以及飞秒测量与飞秒微加工。

E-mail:chazhou@mail.shcnc.ac.cn

## 2 低密度闪耀光栅的制作

一般台阶形闪耀光栅包括反射式和透射式两种。台阶形闪耀光栅的参数主要包括:光栅周期  $d$ , 闪耀波长  $\lambda$ , 台阶数  $m$ , 台阶深度  $h$  以及台阶宽度  $w$  等。对于理想的台阶形闪耀光栅, 每个台阶的深度和宽度都是相等的, 并满足<sup>[11]</sup>

$$w = d/m, \quad (1)$$

对反射式闪耀光栅有

$$kmh = \pi, \quad (2)$$

对透射式闪耀光栅有

$$(n-1)kmh = 2\pi, \quad (3)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波矢,  $n$  为基片的折射率。这样理想台阶形闪耀光栅的闪耀级次衍射效率为<sup>[11]</sup>

$$\eta = \left[ \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) / \left(\frac{\pi}{m}\right) \right]^2 = \text{sinc}^2\left(\frac{1}{m}\right). \quad (4)$$

在光栅制作过程中, 要想得到接近理论计算的衍射效率, 必须对误差进行严格控制。因此制作时需要考虑两方面的情况, 一是在每次刻蚀时, 要尽量控制刻蚀的深度; 二是在每次套刻时, 把对准误差减小到最低。而理论分析指出, 对准误差对效率的影响起主要作用, 所以对套刻对准误差的控制显得尤为重要。

湿法刻蚀闪耀光栅的步骤为: ①在切割好的铬片上刻蚀一定密度的光栅, 其周期为闪耀光栅的周期, 其深度  $H_1$  为

$$H_1 = mh/2, \quad (5)$$

②对做好的光栅进行匀胶, 用两倍密度的光栅模板进行套刻, 套刻时要注意严格对准, 刻蚀深度  $H_2$  为

$$H_2 = mh/4, \quad (6)$$

③进行重复匀胶套刻更高密度的光栅, 程序如前所述, 深度  $H_i$  为

$$H_i = mh/2^i, \quad (7)$$

式中  $i$  为第  $i$  次刻蚀。

为了尽可能地降低误差, 对这种方法做了两方面的改进, 分别对应于深度误差和对准误差的控制。其一, 这种方法一个比较大的缺点是, 先制作密度较低的光栅, 然后在此基础上套刻密度较高的光栅。而光栅制作的难度随密度的提高而增加, 考虑到在低密度光栅上进行匀胶等工艺的不稳定性, 在此基础上进行高密度光栅的刻蚀难度肯定更大。因此对套刻程序进行了改进, 先刻蚀高密度的光栅, 在此光栅上制作相对容易的低密度光栅, 从而提高了制作的质量和成品率。其二, 在实验中发现, 严格对准其实是很难做到的, 经常会出现对不准的情况, 这时可

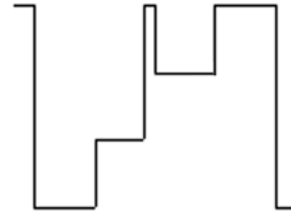


图 1 对准误差引起的尖峰

Fig. 1 Tips caused by alignment errors

能有“尖峰”产生, 如图 1 所示。

另外, 对准有误差时也可能出现凹陷的缝隙。这两种情况都会使光栅效率降低, 但对于图 1 中所示的情况, 把做好的光栅在 HF 液体中浸泡 3 min 就会很好地消除尖峰, 得到较好的台阶形貌。在进行套刻时, 虽然从光刻机显微镜中看到标记是对准的, 但最后的刻蚀结果却总是不能令人满意, 经常会在第三个台阶上出现凹陷的缝隙。这有三种可能的原因, 一是匀胶工艺不够成熟, 二是模板标记制作有误差, 三是光刻机系统误差。为了避免这种情况, 将刻蚀了一定周期光栅的基片匀胶曝光, 在曝光时将模板偏移一点距离, 这样就不再有缝隙出现了, 但是也有可能就会出现如图 2(a) 所示的情况, 从而出现尖峰, 对此可以经过在 HF 液体中浸泡, 从而消除尖峰, 得到如图 2(c) 所示的形貌。和有缝隙的光栅比较, 经过这样处理后光栅效率至少会提高 5%。另外, 一般在第一次刻蚀光栅后会吧基片上的铬去掉然后套刻, 而现在将其保留到套刻结束, 因为有铬存在时标记衬比度比较高, 在显微镜下对准很容易。

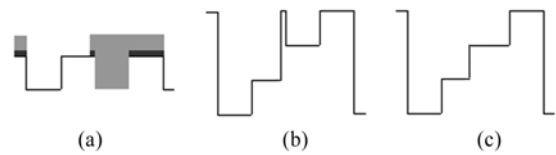


图 2 尖峰的消除。(a) 显影后; (b) 刻蚀并将光刻胶与铬掩模去除; (c) 浸泡在 HF 中 3 min  
Fig. 2 Removal of the tips. (a) after development; (b) after etching, removing photoresist and Cr film; (c) in HF for 3 min

下面以四台阶  $40 \mu\text{m}$  透射式闪耀光栅为例介绍其制作过程, 如图 3 所示。对应的入射波长为  $532 \text{ nm}$  的绿光, 玻璃的折射率为  $1.517$ , 因此可以算得每个台阶的深度为  $257.3 \text{ nm}$ , 宽度为  $10 \mu\text{m}$ 。使用的胶是 Shipley 公司生产的 1805 胶, 显影液用固态 NaOH 和去离子水以质量比为  $5:1000$  的比例配制。另外, 使用的掩模板分别是  $20 \mu\text{m}$  和  $40 \mu\text{m}$  周期的铬光栅, 且在模板光栅周围有四个对准标记, 标记

的线宽为 $5\ \mu\text{m}$ 。当标记对齐时,两个模板的光栅条纹刚好是严格对准的。

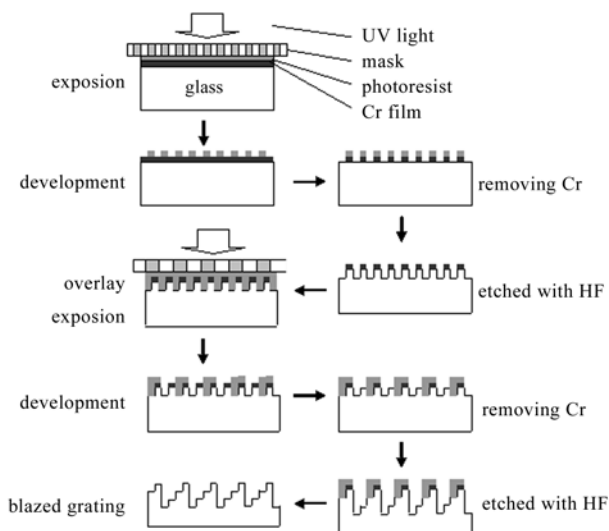


图 3 低密度闪耀光栅的制作流程

Fig. 3 Fabrication process of low-density blazed gratings

首先,将切好的铬片在光栅周期为 $20\ \mu\text{m}$ 的掩模板下进行曝光,然后进行显影、去铬。曝光和显影的时间要控制好,一般得到的占空比(即光栅未刻蚀和刻蚀的宽度比)等于1或稍微大于1(不超过1.2)最好,这样在套刻时可以降低对准偏移所产生的影响。另外,在曝光和显影后一般会在烘干机上烘烤几分钟到十分钟,以达到稳定图形的作用。最后是腐蚀,在腐蚀时时间要控制得非常精确,因为几秒间就会造成几十甚至上百纳米的误差。

然后就是匀胶的过程,这一过程要求非常严格。首先将腐蚀后的片子用丙酮和乙醇把剩余的胶溶解掉,然后再对片子进行细致的擦洗,一般选用基片专用的洗涤剂DH1和DH2配上加热的去离子水在超声波中清洗。清洗后的片子要用大量去离子水冲洗,然后放在烘干机上将残余水分烘干。在匀胶前要等基片温度降到常温,否则胶会因为温度太高而分布不均匀。匀胶时,先把胶小心地滴在基片上,并完全覆盖整个片子后再旋转基片,一般要先低速旋转 $5\sim 10\ \text{s}$ ,然后再以 $3500\ \text{r/s}$ 的转速旋转 $20\ \text{s}$ 。最后将匀好胶的基片在 $90\ ^\circ\text{C}$ 下烘烤 $15\ \text{min}$ 。匀胶是很复杂的过程,要得到没有气泡、没有杂质、圆晕的表面需要不断地实验摸索。因此选择先刻蚀较难的 $20\ \mu\text{m}$ 光栅,然后再匀胶套刻较容易的 $40\ \mu\text{m}$ 光栅。值得注意的是,在匀胶前并未将剩余的铬去除,这是为了下一步套刻时方便对准。

接下来就是套刻过程,套刻工艺中最重要的莫过于标记对准了。在实验中发现,当标记对准时得到的结果却不是很满意,总是出现凹陷的缝隙,而当标记偏移一点时,可以消除缝隙的出现,得到较好的光栅形貌。即使可能会出现尖峰,也可以进行弥补(图2)。事实上,也可以尽量对准标记,然后在曝光和显影时控制时间,做到占空比稍微大于1,这样也同样可以得到很好的效果。另外需要注意的是,在曝光和显影后烘烤基片是非常必要的。

最后是腐蚀、去胶、去铬的过程。

### 3 实验结果

图4(a)所示是四台阶 $40\ \mu\text{m}$ 透射式闪耀光栅的扫描图像,其中每个台阶的深度差不多相等,约为 $260\ \text{nm}$ ;台阶宽度不太一致,第一、三、四台阶宽度基本相等,第二台阶的宽度相对大些。用波长为 $532\ \text{nm}$ 的绿光垂直照射光栅,得到一级衍射光很亮,而零级光很弱,图4(b)所示为衍射光照片,其中最大光斑就是闪耀级次。衍射效率的计算考虑到基片反射的部分,因此用一级光的强度比上通过基片的总光强,得到最高衍射效率为 $72\%$ 。

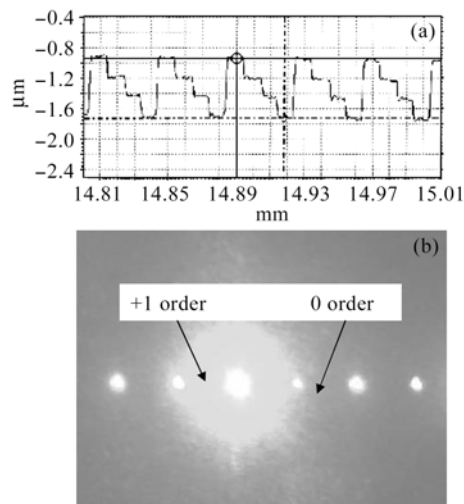


图 4 周期 $40\ \mu\text{m}$ 透射式闪耀光栅

(a) 扫描图像;(b) 衍射光照片

Fig. 4 Transmission-type blazed grating with  $40\ \mu\text{m}$

(a) scanning picture; (b) diffraction pattern

根据理论计算的结果,四台阶闪耀光栅的衍射效率由式(4)计算为 $81.07\%$ 。可以看出理论与实验值有近 $10\%$ 的误差。对实验误差的分析可以通过叠加相位矢量法<sup>[12]</sup>进行研究,但是对于不规则表面的积分计算非常复杂,将采用简化的逐层分析法<sup>[13]</sup>,即认为每次刻蚀的光栅都将入射光衍射到无

穷多个级次上,而最终的+1级衍射是通过每一层衍射的不同级次的组合形成的,而其衍射效率是所有这些组合效率的叠加。当只有刻蚀深度误差时<sup>[13]</sup>,衍射效率为

$$\eta_1 = \frac{8}{\pi^2} \cos^2 \left( \frac{\delta_1}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\delta_2}{2} \right), \quad (8)$$

式中  $\delta_1 = 2\pi\Delta_1/H$ ,  $\delta_2 = 2\pi\Delta_2/H$  为深度误差,  $\Delta_1, \Delta_2$  分别为两次刻蚀时产生的绝对深度误差。测得绝对深度误差约 50 nm, 因此可知, 深度误差使衍射效率降低至 77% 左右。当只有对准误差时, 衍射效率的表达变得比较复杂,

$$\eta_1 = \frac{8}{\pi^2} \times \left| \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{1}{4n-1} \frac{1}{4n+2} 2\pi\delta \exp[i(4n+2)] \right\} \frac{4}{\pi} + 1 \right|^2, \quad (9)$$

式中  $\delta = \Delta x/d$  为对准误差,  $\Delta x$  为对准时的绝对偏移误差, 测得的绝对偏移误差约为 1  $\mu\text{m}$ , 因此可知, 由于对准偏移误差导致衍射效率降至 67%。

由此可以看出, 对准误差 ( $\delta = 0.025$ ) 要比深度误差 ( $\delta_1 = \delta_2 = 0.05$ ) 对衍射效率的影响严重得多。综合两种情况, 计算得到衍射效率应为 64%, 而测量得到的结果为 72%。其原因在于对偏移引起的尖峰进行了处理, 从而将效率提高了 5%~10%, 降低了对准误差对效率的影响。

由分析可知, 为了提高衍射效率, 需要从套刻对准和深度刻蚀两方面进行改进。尤其是套刻对准问题, 如果误差较大严重影响光栅的衍射效率。为此针对两种情况分别进行了有效的改进, 并得到了比一般制作方法高 5%~10% 的衍射效率。

## 4 结 论

以 40  $\mu\text{m}$  周期的透射式闪耀光栅为例, 详细介绍了低密度台阶形闪耀光栅的制作方法, 给出了光栅的表面形貌图和衍射效率, 并分析了误差。实验得到了表面形貌良好的台阶形闪耀光栅, 测量得到衍射效率为 72%, 比计算得到的 64% 要高, 原因是对偏移引起的尖峰进行了处理, 降低了对准误差对效率的影响。

## 参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3):219~221
- 2 C. Rouyer, É. Mazataud, I. Allais *et al.*. Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti:sapphire/Nd:glass chain [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):214~216
- 3 O. E. Martinez. Grating and prism compressors in the case of finite beam size [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(7):929~934
- 4 Bayanheshig, Gao Jianxiang, Qi Xiangdong *et al.*. Design and manufacture for select frequency oscillation grating in the zero-order coupling output of 9.77  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):301~305  
巴音贺希格, 高键翔, 齐向东 等. 9.77  $\mu\text{m}$  激光器零级耦合输出选频振荡光栅的设计和研制 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):301~305
- 5 Su Jia, Zhang Yinchao, Zhao Yuefeng *et al.*. Optical design of double grating monochromator of a pure rotational Raman-lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):94~98  
苏 嘉, 张寅超, 赵曰峰 等. 双光栅纯转动拉曼测温激光雷达单色仪的光学设计 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):94~98
- 6 Wang Dapeng, Wei Sui. Phase modulation properties of digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1255~1260  
王大鹏, 韦 穗. 数字微镜器件的相位调制性质 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1255~1260
- 7 Shunquan Wang, Changhe Zhou, Yanyan Zhang *et al.*. Deep-etched high-density fused-silica transmission gratings with high efficiency at a wavelength of 1550 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(12):2567~2571
- 8 Shunquan Wang, Changhe Zhou, Huayi Ru *et al.*. Optimized condition for etching fused-silica phase gratings with inductively coupled plasma technology [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(21):4429~4434
- 9 Bo Wang, Changhe Zhou, Shunquan Wang *et al.*. Polarizing beam splitter of a deep-etched fused-silica grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10):1299~1301
- 10 Jiangjun Zheng, Changhe Zhou, Enwen Dai. Double-line-density gratings structure for compression and generation of double femtosecond laser pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(4):979~984
- 11 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999  
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 12 R. Magnusson, T. K. Gaylord. Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(6):806~809
- 13 Ye Jun, Xu Qiao, Hou Xiyun *et al.*. Study of diffraction efficiency of binary optics elements with layer by layer analysis method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10):1350~1355  
叶 钧, 许 乔, 侯西云 等. 二元光学元件衍射效率的逐层分析法研究 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(10):1350~1355