

Ar⁺ 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅

汪海宾^{1,2} 刘 全^{2*} 吴建宏²

¹ 江苏科技大学数理学院, 江苏 镇江 212003
² 苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006

摘要 凸面闪耀光栅是研制高光谱分辨率超光谱成像系统的关键器件之一。由于要求的闪耀角度一般较小, 制作工艺难度大, 其衍射效率与理论值有较大差距, 一直制约其应用。针对上述问题与难点进行了分析, 通过光刻胶光栅掩模制作和 Ar⁺ 离子束刻蚀等工艺制作了凸面闪耀光栅。针对离子束大掠入射刻蚀凸球面时槽形闪耀角不易一致的难题, 利用转动扫描刻蚀实现了球面上的闪耀光栅刻蚀, 最终制作出了约 4.3° 闪耀角的凸面闪耀光栅, 在 400~800 nm 波段范围内, 其+1 级衍射光效率均值达 40% 以上。

关键词 衍射光栅; 凸面闪耀光栅; 全息光刻; Ar⁺ 离子束刻蚀; 衍射效率

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0405002

Fabrication of Convex Blazed Grating By Ar⁺ Ion-Beam Etching

Wang Haibin^{1,2} Liu Quan² Wu Jianhong²

¹ School of Mathematics and Physics, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

² Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Convex blazed grating is one of the most important devices in hyperspectral imaging spectrometers. The major application obstacle is the huge gap between the diffraction efficiency which is obtained from the experiment and that in theory. The bottleneck lies in the small blazing angles required in the manufactory. To solve this problem, a convex blazed grating is made by adopting an argon ionbeam to directly etch the substrate through a photoresist mask. Considering the potential inconsistent blazing angles across the whole convex grating area with big glancing angle, the blazed grating etching of spherical surface is realized by using a circular scanning etching. A grating of a small blazing angle of 4.3° is fabricated. The average efficiency of the first order diffracted beams is more than 40% in the visible wavelength range.

Key words diffraction grating; convex blazed grating; holographic lithography; Ar⁺ ion-beam etching; diffraction efficiency

OCIS codes 050.1940; 050.1950; 120.6200; 220.4000

1 引 言

衍射光栅是现代光学器件中一种重要的光学元件, 它广泛应用于光谱仪、真空紫外与软 X 射线谱仪^[1,2]、偏振分束器^[3]、滤波器^[4~6]以及探测器^[7]等。凸面光栅超光谱成像仪, 因具有相对孔径大、成像质量高、结构紧凑和适用光谱范围宽等优点, 可以有效

地获得高分辨率的光谱图像, 在航天遥感和军事应用领域有着广泛的应用^[8,9]。而高的光谱分辨能力是发展新一代光谱成像仪的需要和必然趋势, 研究表明凸面光栅光谱成像系统是实现大相对孔径和高分辨率光谱成像的有效途径^[10]。具有高衍射效率的凸面光栅是研制高光谱分辨率超光谱成像系统的

收稿日期: 2010-07-02; 收到修改稿日期: 2010-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(60907017)和江苏省科技支撑计划项目(BE2009047)资助课题。

作者简介: 汪海宾(1978—), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事衍射光学器件制作方面的研究。

E-mail: haibinwang1978@sina.com

导师简介: 吴建宏(1960—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全息学及光信息处理等方面的研究。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liuquan@suda.edu.cn

关键器件之一。

如何提高凸面光栅的衍射效率一直是摆在研究人员面前的难题。光栅的衍射效率是由其槽形决定,闪耀槽形光栅相对于其它槽形光栅具有更高的衍射效率^[11]。目前全息离子束刻蚀法是制作高质量光栅的重要方法,但是在常规的刻蚀系统下使用离子束刻蚀凸面光栅会受到凸面几何形状的限制,无法做到对表面光栅槽形的精确控制以及均匀性的控制,制作工艺难度大。这个问题导致光栅的衍射效率极大的降低,成为长久以来摆在研究人员面前的难题,从而限制了凸面闪耀光栅的应用。本文针对上述问题与难点进行了分析,对刻蚀机工件台进行改造,制作出了具有较高衍射效率的凸面闪耀光栅。

2 全息光栅掩模对闪耀角的影响

1976年日本科学家 Aoyagi 等^[12]提出了正弦形光刻胶光栅掩模的 Ar⁺ 离子束斜入射刻蚀制作闪耀光栅的方法,如图 1 所示。Ar⁺ 离子束以掠入射角 β 轰击光栅掩模和基底,利用掩模对离子束的遮挡效果,使基底的不同位置先后被刻蚀,光刻胶光栅掩模刻尽后就能在基底材料上得到三角形槽形。离子束对材料的刻蚀速率依赖于入射角,通过改变离子束掠入射角 β ,即可改变光刻胶与基底材料的刻蚀速率,从而获得不同的闪耀角。

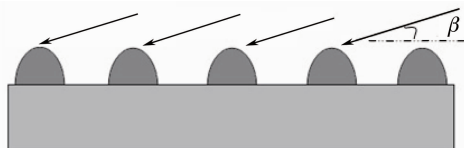


图 1 Ar⁺ 离子束刻蚀正弦形光刻胶光栅掩模

Fig. 1 Sinusoidal photoresist mask by Ar⁺ ion-beam etching

为了获得理想的闪耀光栅槽形,必须对光刻胶光栅掩模进行恰当的倾斜刻蚀。首先,研究光刻胶光栅掩模槽形是正弦形的情况(图 2),根据闪耀角 θ_s 与槽

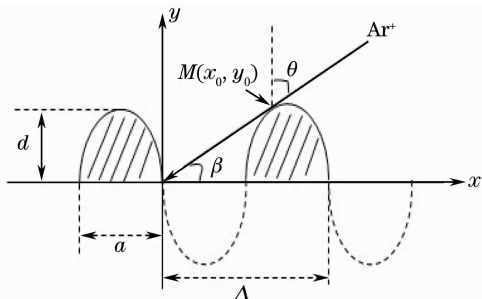


图 2 正弦形掩模示意图

Fig. 2 Diagram of sinusoidal mask

形和离子束入射角的经验公式^[13], $\theta_s \approx \beta - 3^\circ$ 。该光栅的占宽比为 $f = a/\Lambda = 0.5$,光栅的轮廓可以用方程 $y = -d \times \sin(2\pi x/\Lambda)$ 来表示,图中所示的切线通过原点,且 $\Lambda/2 < x_0 < 3\Lambda/4$ 。通过计算可得到

$$\tan \beta = \frac{y_0}{x_0} = 1.365 \frac{d}{\Lambda}.$$

其次,研究光刻胶光栅掩模槽形是矩形时的情况(图 3),闪耀角 θ_s 与槽形和离子束入射角可以用公式^[14] $\theta_s \approx k\beta$ 求得,正比例系数 k 取决于基板和光刻胶的刻蚀速率系数之比,实验中在固定的刻蚀参数条件下, $k \approx 0.5$ 。同样光栅的占宽比 $f = a/\Lambda = 0.5$,图中所示的切线通过原点,且 $x_0 = \Lambda/2$ 。通过计算可得到

$$\tan \beta = \frac{y_0}{x_0} = 2 \frac{d}{\Lambda}.$$

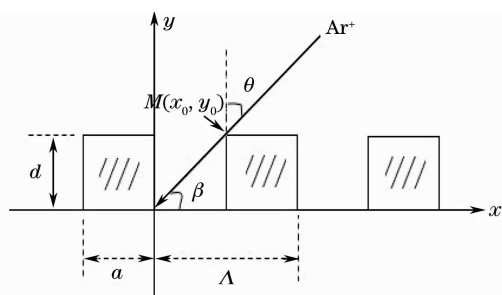


图 3 矩形掩模示意图

Fig. 3 Diagram of rectangular mask

在实验中使用波长为 413.1 nm 的氩离子激光,采用全息光刻制作光刻胶光栅掩模,在制作过程中采用显影实时监测的办法,来控制掩模槽形的变化^[15]。图 4 是实验中得到的典型光刻胶光栅掩模。

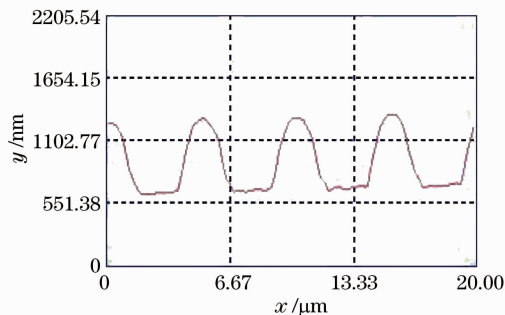


图 4 光刻胶光栅掩模槽形原子力显微镜(AFM)图

Fig. 4 AFM photograph of the photoresist grating mask groove

3 实验与讨论

研究的凸面光栅是在超光谱成像仪中使用的,光栅口径为 32.55 mm,凸面半径为 71.78 mm,空间频率为 200 lp/mm,工作波段为 400~800 nm,入

射角为 35° , 要求在工作波段内均具有较高的衍射效率。根据对其衍射效率分析可知^[11], 在闪耀角约为 4° 时, 凸面闪耀光栅的 +1 级衍射光的效率均值超过 50%, 最大可达约 80%。

3.1 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅

图 5 给出了离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅的装置示意图。 Ar^+ 离子束垂直入射, 为了在不同的掠入射角 β 下刻蚀, 特别设计并制作了可旋转的样品平台。刻蚀过程中, 在下端电机的带动下通过旋转

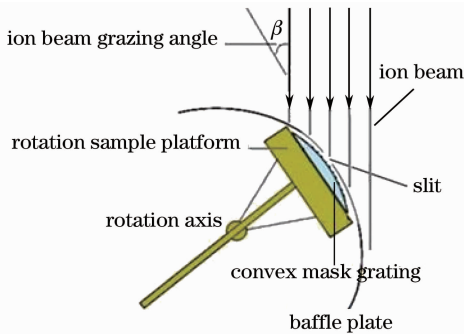


图 5 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅示意图

Fig. 5 Fabrication of convex blazed grating by ion-beam etching

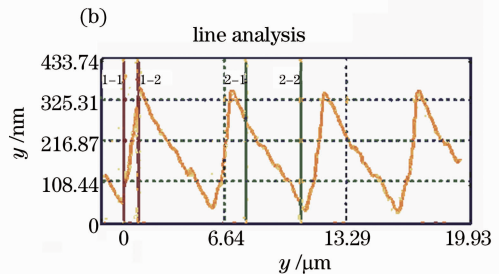
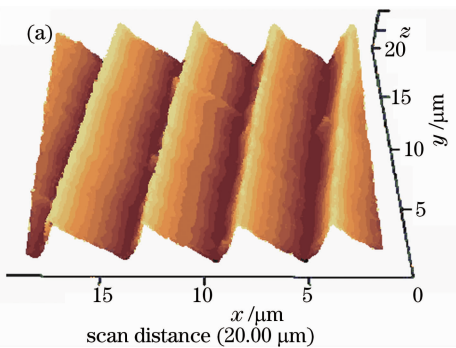


图 6 凸面闪耀光栅槽形 AFM 图

Fig. 6 AFM photograph of the convex blazed grating grooves

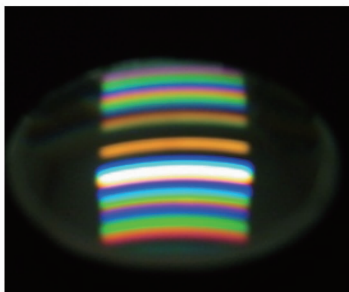


图 7 离子束刻蚀制作的凸面闪耀光栅

Fig. 7 Convex blazed grating by ion beam etching

综合上面的实验结果, 可以得出采用上述方案制作小角度 ($4^\circ \sim 5^\circ$) 闪耀光栅是可行的。不过也发现使用 Ar^+ 离子束刻蚀制作小角度闪耀光栅, 实际

轴来回摆动, 让部分离子束穿过挡板中间的狭缝到达光栅表面, 进行扫描刻蚀, 同时保证了刻蚀的均匀性。

所有的实验都采用了固定的离子束流密度和离子能量, 分别为 0.67 mA/cm^2 和 500 eV , 工作压强约为 $2.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 在这组参数下离子束的均匀性和稳定性都比较好。

对槽形进行分析和研究, 离子束刻蚀制作 4° 闪耀角光栅, 对于正弦形光栅掩模, 需要的槽深为 352 nm , 需涂布约 400 nm 厚的光刻胶。对于矩形光栅掩模, 需要的槽深为 449.7 nm , 需涂布约 500 nm 厚的光刻胶。根据图 4 可知, 实验中制作的光栅掩模是介于正弦形和矩形之间的, 理论上, 离子束掠入射角度应介于 $7^\circ \sim 8^\circ$ 之间, 光刻胶需涂布约 500 nm 。

实验发现槽形演化并非按照上述简单的几何关系进行, 通过多次实验优化得出最佳的掠入射角为 5.5° 。用 Ar^+ 离子束刻蚀制作出了凸面闪耀光栅, 经原子力显微镜对其槽形进行扫描, 如图 6 所示。测量得出制作的凸面闪耀光栅闪耀角约为 4.3° , 反闪耀角约为 18.7° 。制作完成的凸面闪耀光栅镀上铝反射膜后, 如图 7 所示。

得到的槽形结构与期望的还存在一定差距, 例如闪耀边和反闪耀边局部会出现不同程度的弯曲、槽形表面不光滑、反闪耀角角度偏小等, 这些对衍射效率均有不同程度的影响。可能存在的原因有在理论分析时忽略了离子束刻蚀时的刻面效应和再沉积效应等。

3.2 衍射效率测量与分析

按照图 8 所示的装置来测量凸面闪耀光栅的衍射效率。实验中选用了不同波长的激光器作为单色光源, 使用功率计测量出 +1 级衍射光的强度, 对比各自入射光的强度计算出绝对衍射效率。测量结果如表 1 所示。

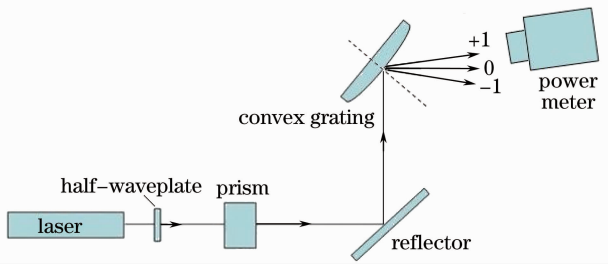


图 8 测量衍射效率实验装置示意图

Fig. 8 Experimental setup for measuring the diffraction efficiency

表 1 给出了凸面闪耀光栅实验测得的+1 级衍射效率。图 9 给出了凸面闪耀光栅衍射效率与波长的关系曲线,图中理论值是根据严格耦合波理论自行编写的程序^[16,17]和实验得到的实际光栅槽形计算所得的。将图 9 中理论曲线和实验曲线作对比,发现实验数值与理论数值基本吻合,但还是有一点

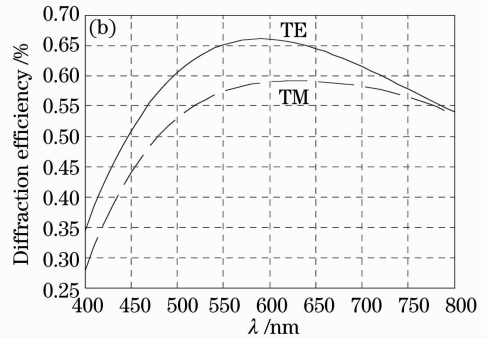
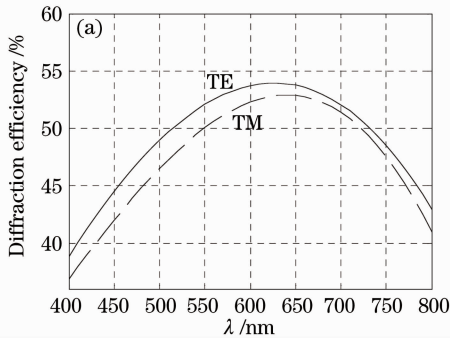


图 9 凸面闪耀光栅衍射效率与波长的关系。(a)实验值,(b)理论值

Fig. 9 Relation between wavelength and diffraction efficiency of convex blazed grating. (a) experimental value, (b) theoretical value

4 结 论

通过显影实时监测的办法,制作出符合刻蚀的光刻胶光栅掩模。针对离子束大掠入射刻蚀凸球面时槽形闪耀角不易一致的难题,利用转动扫描刻蚀工艺,实现了球面上的闪耀光栅刻蚀,最终制作出了闪耀角为 4.3° 、反闪耀角为 18.7° 的凸面闪耀光栅。表面镀铝后,实验测量了其衍射效率,在可见光范围内达 40% 以上。对比实验结果与理论结果,数值基本上吻合,但还是有一点偏差。主要是由于光栅(反)闪耀角度的误差,表面不光滑和弯曲等,造成了实验光栅槽形对理论设计槽形的偏离,从而影响了效率值。今后,有待进一步对所使用的刻蚀装置进行改造,例如通过对刻蚀角度、光栅掩模与挡板之间距离的精确控制,来优化光栅的实际槽型,从而提高光栅的衍射效率。

偏差。这种情况的产生,主要是由于制作样品的光栅闪耀边和反闪耀边局部出现不同程度的弯曲、槽形表面不是很光滑以及反闪耀角角度偏小等原因,从而造成了效率值的下降。当然在测量中,由于使用的部分波长激光器能量不稳定,造成了读数有偏差,虽然采取多次测量取平均的方法,但也难免会出现一些误差,从而影响效率测量值。

表 1 衍射效率测量结果

Table 1 Results of the diffraction efficiency measurement

| Wavelength /nm | TE /% | TM /% |
|----------------|-------|-------|
| 413.1 | 40.23 | 38.61 |
| 441.6 | 42.58 | 39.25 |
| 488 | 48.17 | 44.63 |
| 514.5 | 50.54 | 48.97 |
| 532 | 52.67 | 51.29 |
| 632.8 | 53.62 | 52.13 |
| 780 | 44.17 | 42.73 |

参 考 文 献

- Zhu Weizhong, Wu Yanqing, Chen Min *et al.*. Optimized design of transmission grating used for 13.4 nm soft X-ray interference lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1225~1230
朱伟忠, 吴衍青, 陈敏等. 13.4 nm 软 X 射线干涉光刻透射光栅的优化设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1225~1230
- Li Hailiang, Wu Jian, Zhu Xiaoli *et al.*. Fabrication and study of 2000 lp/mm X-ray self-standing transmission gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2650~2655
李海亮, 吴坚, 朱效立等. 2000 lp/mm X 射线镂空透射光栅的制备研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2650~2655
- Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2690~2695
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东等. 亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2690~2695
- Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
王振华, 吴永刚, 桑田等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- Fu Xiaoyong, Yi Kui, Shao Jianda *et al.*. Design of single-

- material guided-mode resonance filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 9~11
- 6 Fu Xiaoyong, Yi Kui, Shao Jianda *et al.*. Design of internal Brewster guided-mode resonance filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 462~464
- 7 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
杨一粟, 黄永清, 黄辉等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 8 Shen Zhong, Ge Zhijiang, Zhang Liantai. The principle of the spaceborne hyper-spectrum imager[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(2): 28~34
沈中, 葛之江, 张连台. 航天超光谱成像仪原理分析[J]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(2): 28~34
- 9 Shen Zhong, Ge Zhijiang, Zhang Liantai. The principle and development of the spaceborne hyper-spectrum imaging technology[J]. *Spacecraft Engineering*, 2001, **10**(4): 45~52
沈中, 葛之江, 张连台. 航天超光谱成像技术原理及其发展现状[J]. *航天器工程*, 2001, **10**(4): 45~52
- 10 Ji Yiqun. Hyperspectral Imaging Systems with a Convex Grating [D]. Suzhou: Soochow University, 2009
季轶群. 凸面光栅超光谱成像系统[D]. 苏州: 苏州大学, 2009
- 11 Liu Quan, Ji Yiqun, Wu Jianhong *et al.*. Study on convex grating in hyperspectral imaging spectrometers[C]. *SPIE*, 2009, **7494**: 74940N
- 12 Y. Aoyagi, S. Namba. Blazed ion-etched holographic gratings [J]. *Opt. Acta*, 1976, **23**: 701~707
- 13 Fu Xinding, Zheng Yanfang, Cheng Lizhi *et al.*. Microfabrication of holographic blazed grating by reactive ion beam etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 1985, **5**(1): 43~49
傅新定, 郑延芳, 陈莉芝等. 反应离子束微细加工全息闪耀光栅研究[J]. *光学学报*, 1985, **5**(1): 43~49
- 14 Lin Hui. Multilayer-Coated Gratings in the Extreme-Ultraviolet Wavelength Region: Fabrication of Bare Grating Substrates and Measurement and Analysis of Diffraction Efficiency[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. 41~44
林慧. 极紫外多层膜光栅的浮雕衬底制作及衍射效率测量与分析[D]. 北京: 清华大学, 2008. 41~44
- 15 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. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1146~1150
- 16 Liu Quan, Wu Jianhong. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(2): 31~34
刘全, 吴建宏. 光栅的标量衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(2): 31~34
- 17 Wang Haibin, Wu Jianhong, Liu Quan. Diffraction characteristics of convex rectangular grating[J]. *Laser Journal*, 2010, **31**(4): 15~17
汪海宾, 吴建宏, 刘全. 凸球面矩形槽光栅的衍射特性[J]. *激光杂志*, 2010, **31**(4): 15~17