

文章编号 1004-924X(2013)09-2303-06

## 基于解析分区法设计闪耀全息凹面光栅

谭鑫<sup>1\*</sup>, 沈晨<sup>1,2</sup>, 吴娜<sup>1,2</sup>, 张方程<sup>1</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>

(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:**研究了制备闪耀凹面光栅的离子束刻蚀工艺,提出了用“解析分区法”设计闪耀凹面光栅的衍射效率。该方法能通过确定离子束入射角,在实验前定量给出平行离子束刻蚀后光栅衍射效率的设计结果。经过理论设计计算出所需波长衍射效率较高的凹面闪耀光栅中心闪耀角,利用刻蚀模拟软件 BLAZING 计算出离子束刻蚀参数及光刻胶掩模参数;以计算结果为依据,利用全息-离子束刻蚀工艺制作出尺寸为 45 mm×40 mm<sup>2</sup>,曲率半径为 224 mm 的凹面闪耀光栅,其中中心闪耀角约为 9.21°,峰值衍射效率为 54.8% @ 300 nm,250 nm 处衍射效率为 50%,与“解析分区法”计算结果符合较好。实验结果表明,利用“解析分区法”进行凹面闪耀光栅衍射效率设计的方法简单易行,能够有效指导平行离子束刻蚀闪耀凹面光栅工艺,完成高衍射效率凹面闪耀光栅的制作。

**关键词:**凹面光栅;闪耀光栅;分区法;衍射效率;离子束刻蚀

**中图分类号:** O436.1    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2303

## Design of diffraction blazed concave grating by partitioned space calculated method

TAN Xin<sup>1\*</sup>, Shen Chen<sup>1,2</sup>, WU Na<sup>1,2</sup>, ZHANG Fang-cheng<sup>1</sup>, Bayanheshige<sup>1</sup>

(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: xintan.grating@gmail.com

**Abstract:** Ion beam etching technology was researched for fabricating blaze concave gratings, and a partitioned space calculated method was proposed to calculate the diffraction efficiency of a blaze concave grating. The method can calculate the diffraction efficiency quantitatively without experimentation by confirming an incidence angle. The blazed angle of the blaze concave grating with a given wavelength was calculated based on the partitioned space calculated method, and ion beam etching parameters and a mask parameter were calculated by etching software BLAZING. On the basis of these parameters, a concave grating with a size of 45mm×40mm was fabricated by holographic ion beam

**收稿日期:** 2013-03-15; **修订日期:** 2013-05-18.

**基金项目:** 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2010AA1221091001); 国家重大科学仪器设备开发专项资金资助项目 (No. 2011YQ120023); 中国科学院重大科研装备研制项目 (No. ZBYZ2008-1, No. YZ201005); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20070523, 20086013)

etching. The focus blazed angles measured by an Atomic Force Microscope (AFM) are  $9.21^\circ$ , the efficiencies of the gratings measured by a concave grating diffraction efficiency instrument are about 54.8% at 300 nm and 50% at 250 nm. The grating substrate has a smooth blazed groove profile with 1 200 groove/mm. The results are in agreement with that partitioned space calculated well. It means that partitioned space calculated method is suitable for designing and calculating the efficiency of blaze concave gratings and it can direct the fabrication of the blaze concave gratings by the ion beam etching technology.

**Key words:** concave grating; blazed grating; partitioned space method; diffraction efficiency; ion beam etching

## 1 引言

衍射光栅是一种应用广泛的高分辨率色散光学元件,在现代光学仪器中占有重要地位<sup>[1-3]</sup>。

用凹面光栅作衍射光栅相对于平面光栅更有利于光谱仪器紧凑。凹面光栅的制作方式主要是机械刻划和全息-离子束刻蚀。机械刻划光栅制作凹面光栅的历史较长<sup>[4-6]</sup>,但由于凹面光栅曲率半径的限制及刻划光栅自身的缺点,使得机械刻划凹面光栅逐渐被发展起来的全息凹面光栅所替代。早期全息凹面光栅主要利用干涉曝光的方式在凹面基底上获得干涉条纹后进行镀膜来制作<sup>[7,8]</sup>,此类光栅为正弦型结构,衍射效率较低;随着离子束刻蚀技术引入全息光栅的制作工艺,利用平行离子束流对光刻胶图形向基底进行转移制作的全息-离子束刻蚀光栅具有更高的衍射效率,其槽形结构为三角形<sup>[9]</sup>。这种全息-离子束刻蚀凹面光栅存在闪耀角,虽然闪耀角沿凹面基底表面变化,但其衍射效率明显高于正弦槽形的凹面光栅。目前,此种类型的闪耀凹面光栅衍射效率分布与闪耀角及闪耀角变化之间关系尚无定量计算。

本文以工作波段 200~800 nm,线密度为 1 200 lp/mm,入臂为 200 mm,出臂为 188 mm,尺寸为 45 mm×40 mm 的 IV 型凹面光栅的设计制作为例,提出了基于“解析分区法”计算闪耀角沿凹面基底表面变化的凹面闪耀光栅衍射效率的计算方式,计算了此种凹面闪耀光栅的衍射效率,并利用平行离子束制做了凹面闪耀光栅,通过实测衍射效率与模拟计算衍射效率的对比验证了“解析分区法”衍射效率计算方式及设计结果。

## 2 凹面闪耀光栅衍射效率“解析分区法”计算

用全息-离子束刻蚀法制作闪耀光栅时,闪耀角  $\varphi$  由离子束入射角即离子束与基片法线的夹角  $\theta$  决定,可用经验公式表示。而在刻蚀凹面闪耀光栅时,平行离子束使得凹面各处闪耀角不同,如图 1 所示。为计算此种闪耀角变化的凹面闪耀光栅的衍射效率,利用“解析分区法”建立直角坐标系  $\sigma\text{-}xyz$ ,将凹面光栅在  $xoy$  平面上的投影划分为 16 个(分区越多,模拟结果越真实)相同的矩形,如图 2 所示,每个矩形对应的区域近似为闪耀角一致的光栅,每个区域的闪耀角取区域中心处,每个区域的衍射效率以区域中心闪耀角计算,整个光栅的衍射效率采用算术平均法计算。

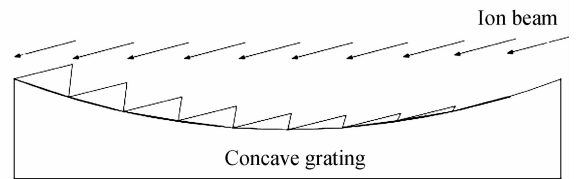


图 1 平行离子束流刻蚀凹面基底

Fig. 1 Concave substrate fabricated by parallel ion beam

设闪耀角为直线  $L$  (离子束流方向向量) 与球面各点切面的夹角  $\varphi$ ,  $L$  与凹面光栅下底面(中心点的切面)的夹角为  $\theta$ ,简便起见,将离子束入射角当作刻蚀后能够形成的闪耀角(实际上存在  $3^\circ$  的差异),其不影响最终的计算结果。(因为刻蚀时离子束是平行直线系,故不同区域的闪耀角可看成平行直线系与球面各点切面的夹角)。

设光栅凹面的方程为:

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2, \quad (1)$$

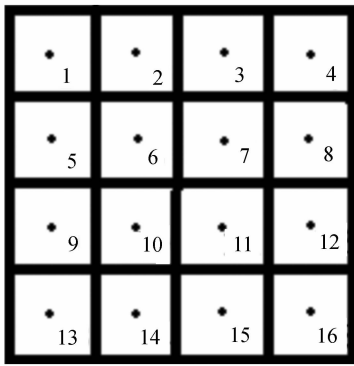


图2 光栅基底分区示意图

Fig.2 Subarea of concave substrate

其中: $R$ 为曲率半径。

$L$ 的方向向量为:

$$l = (0, \cos \theta, \sin \theta). \quad (2)$$

球面上的点 $(x, y, z)$ 的切面的法向量为:

$$n = (-x, -y, R - z). \quad (3)$$

则闪耀角 $\varphi$ 的余角为两向量的夹角:

$$\sin \varphi = \cos \langle n, l \rangle. \quad (4)$$

故各区域闪耀角均可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin\left(\frac{n \cdot l}{|n| |l|}\right) = \\ &= \arcsin\left(\frac{-y \cos \theta + (R - z) \sin \theta}{R}\right) = \\ &= \arcsin\left[\left(1 - \frac{z}{R}\right) \sin \theta - \frac{y}{R} \cos \theta\right]. \end{aligned} \quad (5)$$

以式(5)计算出的不同区域闪耀角为基础,利用PCgrate衍射效率计算软件可计算出各区域的衍射效率,再进行算术平均,即可得到闪耀角不一

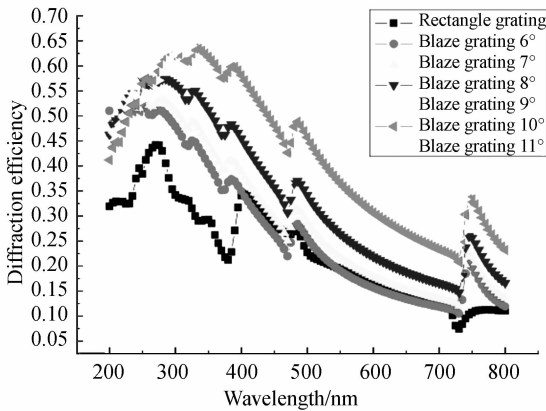


图3 1200 lp/mm IV型凹面光栅,-1级衍射光衍射效率  
Fig.3 Calculated grating efficiencies in -1 order of a 1200 lp/mm IV concave grating as functions of the wavelength

致的凹面闪耀光栅衍射效率。

图3给出了矩形槽凹面光栅及中心闪耀角 $6 \sim 10^\circ$ 的闪耀凹面光栅的衍射效率曲线。图3中衍射效率采用PCgrateSX6.4计算获得。由图3可以看出,矩形槽的凹面光栅衍射效率明显低于闪耀凹面光栅。

### 3 凹面闪耀光栅的平行离子束刻蚀

全息-离子束刻蚀凹面闪耀光栅制作涉及多步工艺<sup>[10-15]</sup>,其工艺流程如图4所示。

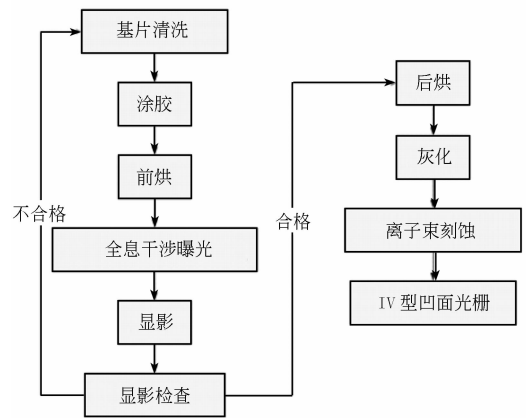


图4 全息离子束刻蚀凹面光栅工艺流程

Fig.4 Fabrication process for concave holographic ion beam etched grating

如图3所示,对工作波段为 $200 \sim 800 \text{ nm}$ ,波长为 $250 \text{ nm}$ 处能够获得最高衍射效率的凹面闪耀光栅,其中心闪耀角约 $9^\circ$ 。

利用BLAZING软件进行闪耀角 $9^\circ$ 光栅的离子束刻蚀参数及掩模参数模拟,获得的模拟结果如表1及表2所示。

表1 离子束刻蚀参数模拟结果

Tab.1 Parameters of simulated ion beam etching

入射角 /( $^\circ$ )	能量 /eV	Ar 气量 / $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	CHF3 气量 / $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	截止时间 /min
11.4	300	7.2	2.1	17

表2 光刻胶掩模参数

Tab.2 Parameters of simulated photoresist grating

槽深/nm	占宽比	侧壁倾角/( $^\circ$ )
$127 \pm 10$	0.4~0.6	$73 \pm 5$

通过分波前方式全息曝光-显影获得如图 5 所示光刻胶掩模,其槽深为 133 nm,占宽比为 0.47,侧壁倾角为  $70^\circ$ ,满足离子束刻蚀对光刻胶掩模需求。

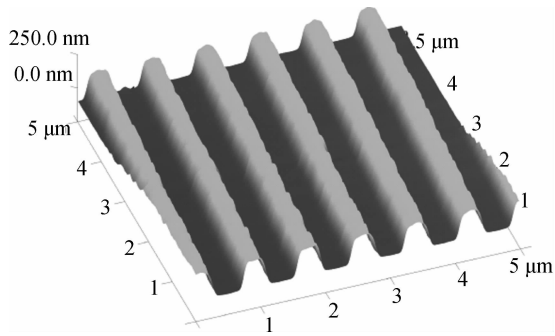


图 5 凹面光栅光刻胶掩模 AFM 照片

Fig. 5 AFM photograph of a photoresist concave grating

将如图 5 所示的光栅依照表 1 所列参数进行离子束刻蚀,所使用设备为口径 150 mm 阴极灯丝离子源,其束流均匀性为  $\pm 5\%$ 。

## 4 实验结果及讨论

工艺条件可控的情况下,在 K9 基底上利用平行离子束流制作了衍射效率如图 6 所示的闪耀凹面光栅,其线密度为 1 200 lp/mm,中心闪耀角  $9.21^\circ$ ,尺寸为 45 mm  $\times$  40 mm。

利用原子力显微镜 (AFM) 对其进行槽形测试,所使用原子力显微镜为美国 Veeco 公司型号为 Demison Icon,与式 (5) 计算获得的闪耀角对比,实际测试过程中由于 AFM 设备针尖夹具与光栅基底边缘的相互干涉,无法测试如图 2 所示 16 个分区,所以将 1、5 分区,2、6 分区,4、8 分区,9、13 分区,10、14 分区,11、15 分区,12、16 分区合并成 8 个分区进行测试并重新计算,现将闪耀角计算值与实测值对比列于表 3。

由表 3 测量结果可知,沿凹面基底的曲面,凹面光栅的闪耀角是变化的,最大闪耀角位置与最小闪耀角位置之差约  $8.97^\circ$ ,这一偏差是由凹面基底的曲率半径引起的。通过表 3 的对比可知,刻蚀工艺过程产生的最大相对误差为 4.8%。

图 6 所示为“解析分区法”设计计算的衍射效率、刻蚀后测试得到的闪耀角模拟计算衍射效率与刻蚀后光栅全口径测试衍射效率的对比结果。

所使用的衍射效率测试设备为多功能凹面光栅测试仪,为长春光机所自研检测设备,已经过国家计量院标定。

表 3 各区域闪耀角计算值与实测值

Tab. 3 Results of Calculated and measured blazed angles ( $^\circ$ )

计算值	实测值
4.666 31	4.93
7.543 14	7.31
10.416 24	11.01
13.292 85	13.11
4.666 31	4.72
7.543 14	7.49
10.416 24	10.31
13.292 85	13.69

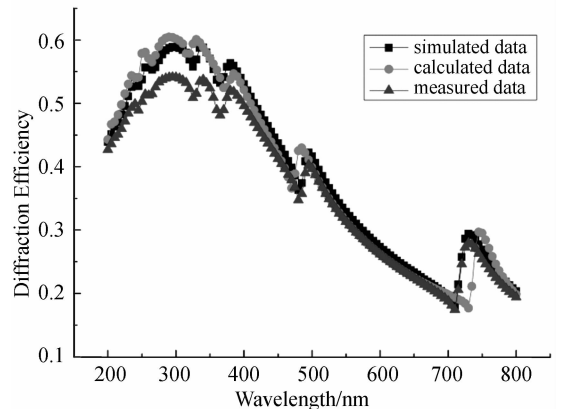


图 6 凹面光栅衍射效率理论设计值、模拟计算值与实测值

Fig. 6 Calculated, simulated and measured grating efficiencies in  $-1$  order of concave grating as functions of the wavelength

由图 6 可知,刻蚀工艺过程产生的 4.8% 的相对误差对于衍射效率的影响较小,不超过 2%;从理论设计衍射效率曲线可知,中心波长为  $9^\circ$  的闪耀凹面光栅其峰值衍射效率出现在 300 nm,达到 60%,实际制作的衍射效率峰值也在 300 nm 处,达到 54.8%;比较关注的 250 nm 处衍射效率达到 50%。

## 5 结 论

对闪耀凹面光栅的离子束刻蚀工艺进行了深入分析,提出了“解析分区法”闪耀凹面光栅衍射效率设计方法,并给出了定量的计算方式。利用现有平行离子束刻蚀设备实现了闪耀凹面光栅的制作,并与理论设计值进行了对比验证。

### 参考文献:

- [1] ELENA S, SANTIAGO D A R C. New optical mountings of the spectral devices with concave diffraction gratings and high entrance slit [J]. *SPIE*, 2863:197-205.
- [2] LOEWEN E G, POPOV E. *Diffraction Gratings and Applications* [M]. Marcel Dekker, 1997.
- [3] 庄夔,刘桂琴,李永贵.全息光栅[J]. *光学精密工程*, 1981, 12(05): 226-230.
- ZHUANG X, LIU G Q, LI Y G, Holographic Gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1981, 12(05): 226-230. (in Chinese)
- [4] MCCOY R P, DYMOND K F, FRITZ G G. A far and extreme ultraviolet limb imaging spectrograph for DMSP satellites [J]. *SPIE*, 1992, 1745: 310-321.
- [5] HUNTER W R, SEELY J F, KOWALSKI M P, *et al.*. Grazing-incidence efficiencies in the 28-42-Å wavelength region of replicas of the Skylab 3600-line/mm concave grating with multilayer and gold coatings [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (25): 6411-6415.
- [6] 巴音贺希格,高健翔,齐向东.机械刻划长焦距凹面金属光栅的研制[J]. *光学精密工程*, 2006(14): 391-395.
- BAYANHESHIGE, GAO J X, QI X D. Manufacturing for ruling concave metal grating with a long focal length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006(14): 391-395. (in Chinese)
- [7] SOKOLOVA E A. Concave diffraction gratings recorded in counterpropagating beams [J]. *J. Opt. Technol.*, 1999, 66 (12):1085-1088.

制作了波段为 200~800 nm,线密度为 1 200 lp/mm,入臂为 200 mm,出臂为 188 mm,尺寸为 45 mm×40 mm 的凹面闪耀光栅,其峰值衍射效率达到了 54.8%,250 nm 处衍射效率达到 50%。通过对“解析分区法”计算闪耀角与实测闪耀角,“解析分区法”计算衍射效率与实测衍射效率进行对比可知,实验结果与“解析分区法”设计结果符合较好,“解析分区法”衍射效率设计方法能够有效指导闪耀凹面光栅的制作。

- [8] SOKOLOVA E A. New-generation diffraction gratings [J]. *J. Opt. Technol.*, 2001,68(8):584-589.
- [9] YOSHIKI Y. Concave saw-tooth slot for grating manufacturing method-involves usage of concave replica process to make replica of concave slots of saw-tooth for grating [J]. *Japanese patent*, 1996, (33):218178(in Japanese)
- [10] AOYAGI Y, NAMBA S. Blazed ion-etched holographic gratings [J]. *Opt. Acta.*, 1976, 23 (9): 701-707.
- [11] MAYTRE D. Selected papers on diffraction gratings [J]. *Washington, SPIE*, 1993.
- [12] 谭鑫,刘颖,徐向东,等.13.9 nm Lamina 分束光栅的研制 [J]. *光学精密工程*, 2009, 12 (1): 33-37.
- TAN X, LIU Y, XU X D, *et al.*. 13.9 nm Lamina grating as beam splitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 12(01):33-37. (in Chinese)
- [13] LIU Y, TAN X, LIU ZH K. Soft X-ray holographic grating beam splitter including a double frequency grating for interferometer pre-alignment [J]. *Optics Express*, 2008(16):14761-14770.
- [14] TAN X. Fabrication of high-efficiency ultraviolet blazed gratings by use of direct Ar<sub>2</sub>-CHF<sub>3</sub> ion-beam etching through a rectangular photoresist mask [J]. *SPIE*, 2011, 8191: 1117-1129.
- [15] 吴娜,谭鑫,巴音贺希格,等.闪耀全息光栅离子束刻蚀工艺模拟及实验验证 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9):33-41.
- WU N, TAN X, BAYINHEXIGE, *et al.*. Simulation of ion beam etching process in ion beam etched holographic grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):33-41. (in Chinese)

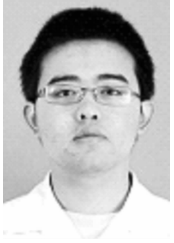
## 作者简介:



**谭 鑫**(1981—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,2003年、2008年中国科学技术大学分别获学士、博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术研究。E-mail: xintan\_grating@gmail.com



**张方程**(1957—),男,河北宁津人,实验师,1979年7月长春光机所工作至今,主要从事镀膜及相关工艺研究。E-mail: zhangfangcheng@ciomp.ac.cn



**沈 晨**(1992—),男,安徽池州人,硕士研究生,2012年于中国科学技术大学获学士学位,主要从事衍射光学元件精密加工研究。E-mail: shenchen@gmail.com



**巴音贺希格**(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2002年于中国科学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研究。E-mail: bayin888@sina.com



**吴 娜**(1983—),女,吉林长春人,博士研究生,2007年于长春理工大学获学士学位,主要从事衍射光学元件精密加工研究。E-mail: chinagrating\_wuna@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)