

# 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制

刘全<sup>1,2,3\*</sup>, 吴建宏<sup>1,2,3</sup>, 郭培亮<sup>1</sup>, 陈新华<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;

<sup>2</sup>苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>3</sup>苏州大学教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 基于严格耦合波分析, 研究凸面闪耀光栅的衍射特性; 采用全息光刻-离子束刻蚀法制作中心周期为  $2.45\ \mu\text{m}$ 、曲率半径为  $51.64\ \text{mm}$ 、口径为  $17\ \text{mm}$  的凸面闪耀光栅, 闪耀角为  $6.4^\circ$ , 顶角为  $141^\circ$ 。结果表明, 在整个可见-近红外波段, 所制作光栅的 1 级衍射效率大于  $40\%$ , 在闪耀波长处 1 级衍射效率大于  $75\%$ 。

**关键词** 光栅; 凸面闪耀光栅; 全息光刻; 离子束刻蚀; 衍射效率

**中图分类号** O438.1; TN29

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0313001

## Fabrication of Convex Blazed Grating with High Diffraction Efficiency

Liu Quan<sup>1,2,3\*</sup>, Wu Jianhong<sup>1,2,3</sup>, Guo Peiliang<sup>1</sup>, Chen Xinhua<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>3</sup>Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** The diffraction characteristics of the convex blazed grating are investigated by using rigorous coupled-wave analysis. The convex blazed grating with a central period of  $2.45\ \mu\text{m}$ , a curvature radius of  $51.64\ \text{mm}$ , and an aperture of  $17\ \text{mm}$  is fabricated by using holographic lithography-scanning ion beam etching method. The blazed angle is  $6.4^\circ$ , and the vertex angle is  $141^\circ$ . The results show that the first-order diffraction efficiency of the proposed grating is greater than  $40\%$  in the whole visible and near-infrared band, and the first-order diffraction efficiency at blaze wavelength is greater than  $75\%$ .

**Key words** gratings; convex blazed grating; holographic lithography; ion beam etching; diffraction efficiency

**OCIS codes** 050.2770; 090.2890; 220.4000

## 1 引言

高光谱遥感技术是新一代对地观测技术, 其特有的兼具成像和光谱探测的优点使其广泛应用于地质调查、大气与环境遥感监测、精细农业、医用光谱成像分析、军事目标侦查等军用与民用领域<sup>[1-6]</sup>。按照分光的不同机理, 高光谱遥感成像光谱仪主要分

为色散式、滤波式、干涉式三大类。其中, 色散式成像光谱仪的技术成熟度高, 广泛应用于航空、航天和近地遥感平台; 干涉式成像光谱仪具有视场大、光通量大、实时性好等特点, 在弱辐射探测方面具有明显优势<sup>[7-8]</sup>。

凸面光栅成像光谱仪具有高成像质量、无谱线弯曲、无梯形畸变、光谱响应函数均匀一致等优点,

**收稿日期:** 2018-09-26; **修回日期:** 2018-11-12; **录用日期:** 2018-12-04

**基金项目:** 高分辨率对地观测系统重大专项(GFZX04061502)、国家重点研发计划(2016YFB0500501)、国家自然科学基金(60907017)、上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题基金(2014ADL02)、江苏高校优势学科建设工程(YX40000212)

\* **E-mail:** liuquan@suda.edu.cn

能够获取具有高分辨率的光谱图像。为了使凸面光栅成像光谱仪具有高性能,要求凸面光栅具有高衍射效率。凸面光栅可以分为两类:一类是 Laminar 光栅,即矩形槽光栅,其制作相对简单,但是衍射效率偏低,影响成像光谱仪的性能;另一类是闪耀光栅,其制作难度大,优点是衍射效率高,可以保证成像光谱仪的高性能。凸面闪耀光栅的制作方法主要分为两种:一种是电子束直写法,其优点是能够在任意凸面上实现任意空间频率的闪耀光栅槽形,但是受限于制作成本、制作光栅的面积等;另一种是全息离子束刻蚀法,通过全息光刻制作凸面闪耀光栅掩模,再通过离子束倾斜刻蚀获得凸面闪耀光栅槽形,其优点是在全息光刻时平衡系统像差,实现像差校正全息凸面闪耀光栅的制作,同时该方法在实现较大面积光栅制作时也具有特别的优势。目前,国际上能够采用电子束直写法制作凸面闪耀光栅的只有美国喷气推进实验室(JPL)<sup>[9]</sup>;能够采用全息离子束刻蚀法制作凸面闪耀光栅的有德国 Zeiss 公司和美国 Headwall Photonics 公司,具体工艺细节一直没有公开。

本文针对高光谱遥感领域急需的凸面闪耀光栅进行深入研究,对全息离子束刻蚀法进行优化,制作具有高衍射效率的凸面闪耀光栅。

## 2 衍射效率分析

本实验中用于高光谱成像仪的凸面闪耀光栅的中心周期为  $2.45 \mu\text{m}$ ,工作在可见-近红外波段  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  (自然光),入射角为  $7^\circ$ 。采用严格耦合波理

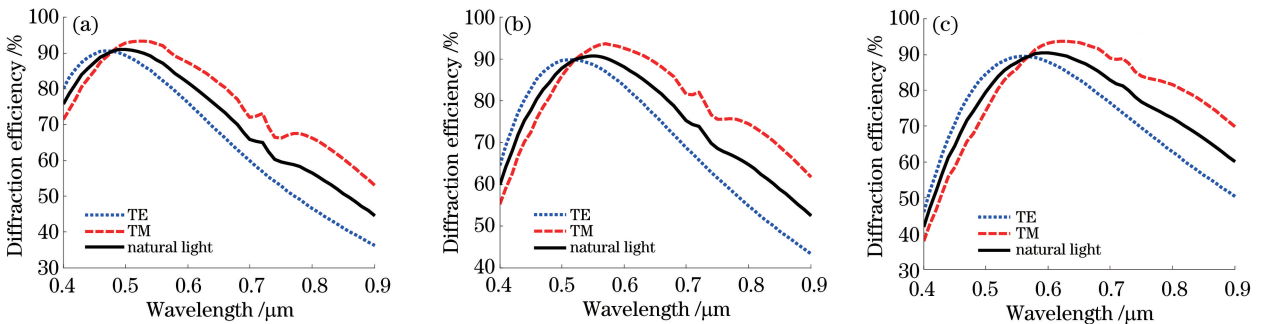


图 2 不同闪耀角时衍射效率与波长的关系。(a)  $\beta=5.9^\circ$ ;(b)  $\beta=6.5^\circ$ ;(c)  $\beta=7.1^\circ$

Fig. 2 Relationship between diffraction efficiency and wavelength with different blaze angles.

(a)  $\beta=5.9^\circ$ ; (b)  $\beta=6.5^\circ$ ; (c)  $\beta=7.1^\circ$

图 3 所示为不同波长时闪耀角  $\beta$  对衍射效率的影响。由图 3(a)可知,当闪耀角大于  $7.2^\circ$  时,1 级衍射效率小于  $40\%$ 。由图 3(b)可知,当闪耀角为  $5.7^\circ \sim 7.1^\circ$  时,1 级衍射效率大于  $70\%$ 。由图 3(c)可

知,当闪耀角小于  $5.6^\circ$  时,1 级衍射效率小于  $40\%$ 。结合不同闪耀角时波长与衍射效率的关系可以发现,当闪耀角为  $5.9^\circ \sim 7.1^\circ$  时,在可见-近红外波段内,1 级衍射效率大于  $40\%$ 。

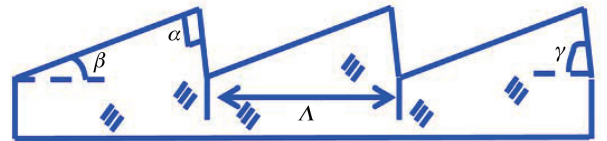


图 1 凸面闪耀光栅示意图

Fig. 1 Schematic of convex blazed grating

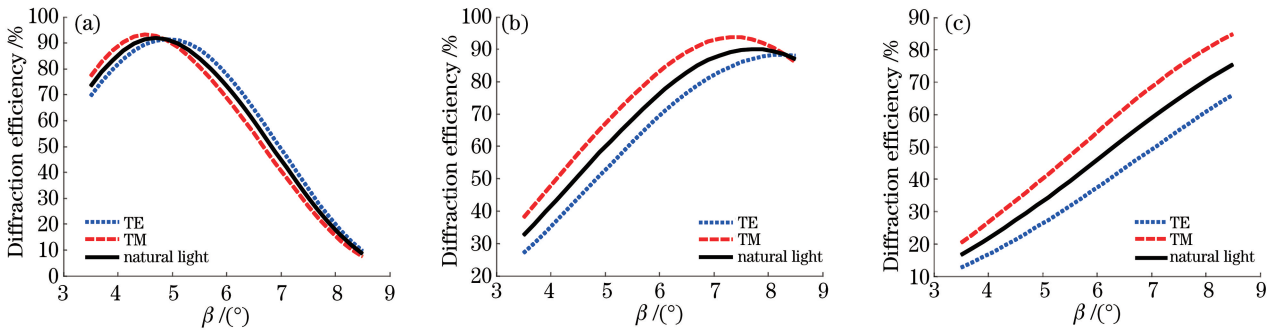


图 3 不同波长时衍射效率与闪耀角的关系。(a)  $\lambda=0.4 \mu\text{m}$ ; (b)  $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ ; (c)  $\lambda=0.9 \mu\text{m}$

Fig. 3 Relationship between diffraction efficiency and blaze angle with different wavelengths.

(a)  $\lambda=0.4 \mu\text{m}$ ; (b)  $\lambda=0.65 \mu\text{m}$ ; (c)  $\lambda=0.9 \mu\text{m}$

### 3 凸面闪耀光栅制作

凸面闪耀光栅制作流程如图 4 所示。首先,将一层厚度适当的光刻胶均匀涂布到凸面基底上;其次,用氩离子激光(波长为 413.1 nm)进行全息曝光、显影,形成光刻胶光栅掩模,通过调节曝光量和显影时间,有效控制光刻胶光栅掩模的槽形;最后,采用转动扫描刻蚀工艺<sup>[12-13]</sup>,利用光刻胶光栅对离子束的遮挡效应,使基片的不同位置先后被刻蚀,形成三角形结构的闪耀光栅。

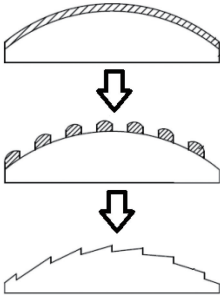


图 4 凸面闪耀光栅制作工艺流程

Fig. 4 Fabrication process of convex blazed grating

本实验在凸面基片上制作全息光刻胶光栅掩模,图 5 所示为凸面闪耀光栅掩模的原子力显微镜 (AFM) 测试结果。由图 5 可知,光刻胶光栅掩模的高度约为 740 nm,占宽比约为 0.85。为了获得理想

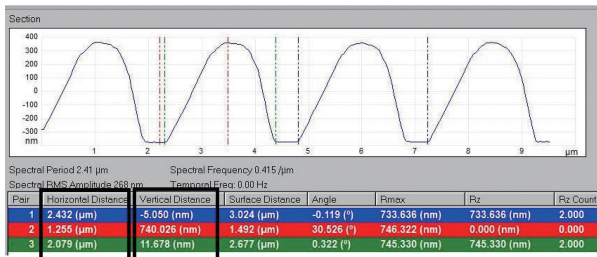


图 5 凸面闪耀光栅掩模的 AFM 测试结果

Fig. 5 AFM test result of convex blazed grating mask

的像质,在全息记录中需要采用 4 m 光路进行全息光刻,这给光栅的制作带来了很大的挑战。

为了突破凸面几何形状的限制,采用转动扫描刻蚀工艺。图 6 为扫描离子束刻蚀原理图。离子束垂直入射,在凸面基片的外侧设置与其同心的球面挡板。该球面挡板中心的法线方向与离子束入射方向之间的夹角为  $\theta$ ,转动中心为凸面基片的球心。使凸面基片相对于入射离子束和球面挡板转动,利用凸面基片上的光刻胶光栅掩模进行扫描刻蚀,以保证凸面上的刻蚀均匀性。

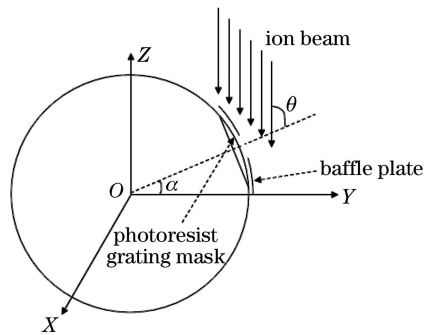


图 6 扫描离子束刻蚀原理图

Fig. 6 Schematic of scanning ion beam etching principle

通过实验优化了刻蚀角度  $\theta$ ,采用图 5 所示的光刻胶光栅掩模完成了闪耀角为  $6.4^\circ$  的凸面闪耀光栅的制作,AFM 测试结果如图 7 所示。由图 7 可

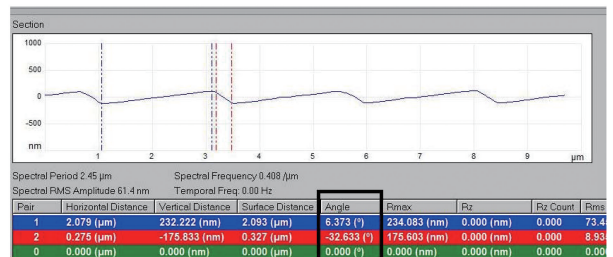


图 7 凸面闪耀光栅的 AFM 测试结果

Fig. 7 AFM test result of convex blazed grating

知,反闪耀角约为  $32.6^\circ$ ,相应的顶角为  $141^\circ$ 。

### 4 测量与分析

凸面闪耀光栅衍射效率的测量系统主要由光源、前置光学系统、色散系统、探测器等组成,整个测量系统的光路结构如图 8 所示。光源发出的光束首先经过由准直透镜组、小孔、滤光片、分束镜和抛物面镜等组成的前置光学系统,透镜 1 将光束会聚在

其焦平面上,经过小孔滤波后,该光束被透镜 2 准直为平行光束;孔径光阑用于控制光束口径;滤光片将复色光转变为单色光;分束器将光束分为两路,一路经过抛物面镜会聚到光电二极管,以监测光源稳定性,另一路为测量光路,光束经过抛物面镜以适当的孔径角耦合到后面的色散系统中,以保证入射光束充满整个凸面闪耀光栅。色散系统选用 Offner 型同心结构,还原了待测凸面闪耀光栅的实际工作条件。

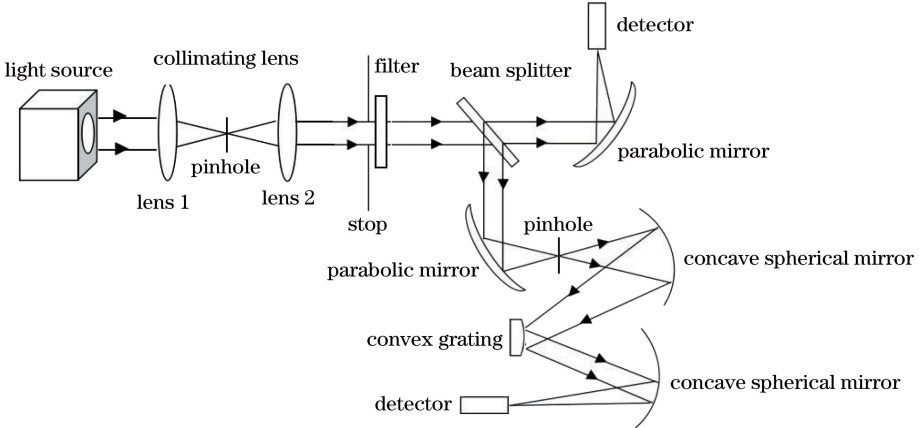


图 8 衍射效率的测量系统光路结构

Fig. 8 Optical path structure of measurement system of diffraction efficiency

选用 Thorlabs 公司生产的 6 个滤光片进行测试,中心波长分别为  $0.41, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.89 \mu\text{m}$ ,测量结果如表 1 所示。图 9(a)所示为所制作的凸面闪耀光栅的衍射效率与波长的关系,其中凸面闪耀光栅衍射效率的理论值根据图 7 分析所得。由表 1 和图 9(a)可知,在可见-近红外波段,1 级衍射效率大于  $40\%$ ,在闪耀波长处,1 级衍射效率大于  $75\%$ 。

通过比较凸面闪耀光栅衍射效率的理论值和实验值可知,实验结果与理论值仅存在少量不一致。上述偏差的成因主要包括所制作的凸面闪耀光栅的槽形顶角比较圆滑,以及反闪耀边上部出现不同程度的弯曲等。图 9(b)所示为顶角为  $90^\circ$  的理想槽形的衍射效率与波长的关系。可以发现,实际槽形的顶角偏离  $90^\circ$ ,造成衍射效率的峰值明显减小,而对整个波段的两端影响较小。

表 1 衍射效率的测量结果

Table 1 Measurement results of diffraction efficiency

Wavelength / $\mu\text{m}$	0.41	0.50	0.60	0.70	0.80	0.89
Diffraction efficiency / %	51.71	69.51	69.69	61.78	55.57	43.04

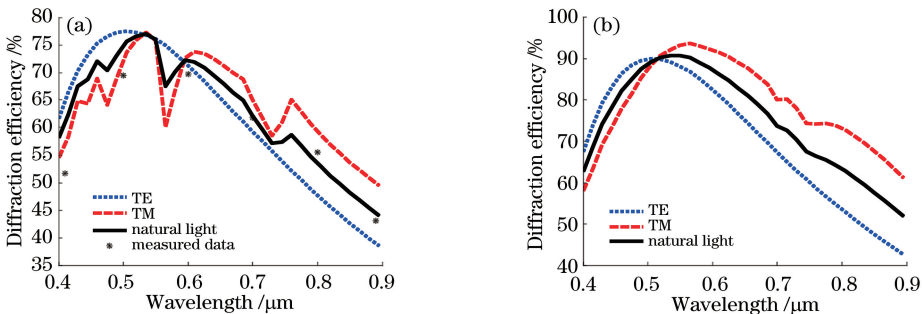


图 9 凸面闪耀光栅的衍射效率与波长的关系。(a)实际槽形;(b)理想槽形

Fig. 9 Relationship between diffraction efficiency of convex blazed grating and wavelength.

(a) Achieved blazed grating; (b) ideal blazed grating



## 5 结 论

通过分析凸面闪耀光栅的衍射特性,考察了实际光栅槽形对衍射效率的影响。结果表明,实际槽形的顶角大于  $90^\circ$ ,导致衍射效率的峰值明显减小,但对整个波段的两端影响较小。为了获得理想的像质,采用 4 m 光路进行全息光刻,制作了高质量的凸面光刻胶光栅掩模。采用球面遮挡板结合转动扫描刻蚀工艺,解决了刻蚀凸球面时槽形闪耀角不一致的难题,制作出闪耀角为  $6.4^\circ$ 、顶角为  $141^\circ$  的凸面闪耀光栅,保证了凸面上光栅槽形的一致性。经表面镀银,利用凸面闪耀光栅衍射效率测量系统,选用 Offner 型同心结构作为色散系统,还原了待测凸面闪耀光栅的实际工作条件,并测量了其衍射效率。在可见-近红外波段,所制作光栅的 1 级衍射效率大于 40%,并成功应用于高光谱成像仪。

## 参 考 文 献

- [1] Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4056: 50-65.
- [2] Pearlman J S, Barry P S, Segal C C, *et al.* Hyperion, a space-based imaging spectrometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1160-1173.
- [3] He C, Feng Z K, Yuan J J, *et al.* Advances in the research on hyperspectral remote sensing in biodiversity and conservation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1628-1632.  
何诚,冯仲科,袁进军,等.高光谱遥感技术在生物多样性保护中的应用研究进展[J].光谱学与光谱分析,2012,32(6):1628-1632.
- [4] Ma Y P, Zhang W, Liu D X. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(1): 37-40, 59.  
麻永平,张炜,刘东旭.高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析[J].上海航天,2012,29(1):37-40,59.
- [5] Liu L X, Li M Z, Zhao Z G, *et al.* Recent advances of hyperspectral imaging application in biomedicine[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207017.
- [6] Zeng S, Kuang R Y, Chen Y B. Hyperspectral characteristic band selection and spectral classification of five typical vegetation in Poyang Lake[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 123002.  
曾帅,况润元,陈彦兵.鄱阳湖5种典型植被高光谱特征波段选择与光谱分类识别[J].激光与光电子学进展,2017,54(12):123002.
- [7] Mouroulis P. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration[J]. Optical Engineering, 2000, 39(3): 808-816.
- [8] Wang Y M, Lang J W, Wang J Y. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010008.  
王跃明,郎均慰,王建宇.航天高光谱成像技术研究现状及展望[J].激光与光电子学进展,2013,50(1):010008.
- [9] Mouroulis P, Wilson D W, Maker P D, *et al.* Convex grating types for concentric imaging spectrometers[J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7200-7208.
- [10] Liu Q, Wu J H. 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.
- [11] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [12] Liu Q, Wang H B, Sun P, *et al.* Fabrication of the convex blazed grating[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7848: 78480V.
- [13] Wang H B, Liu Q, Wu J H. Fabrication of convex blazed grating by  $\text{Ar}^+$  ion-beam etching[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405002.  
汪海宾,刘全,吴建宏. $\text{Ar}^+$ 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅[J].光学学报,2011,31(4):0405002.