

## 锯齿槽闪耀光栅制作误差对衍射效率的影响

葛建平<sup>1</sup>, 沈为民<sup>1</sup>, 刘全<sup>2</sup>, 陈明辉<sup>2</sup>

- (1. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 与矩形槽和正弦槽光栅相比, 锯齿槽光栅具有高的衍射效率, 可采用全息离子束刻蚀和单点金刚石车削两种方法制造。首先, 介绍了这两种方法的制造误差。然后, 分析了这些制造误差对用于可见近红外和长波红外成像光谱仪的光栅衍射效率的影响, 指出闪耀角误差、槽顶角误差和刻刀圆弧半径是影响锯齿槽光栅衍射效率的关键因素。为制作高质量成像光谱仪用光栅奠定了理论基础和指导。

**关键词:** 锯齿槽光栅; 全息离子束刻蚀; 单点金刚石车削; 误差; 衍射效率

**中图分类号:** O43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1557-05

## Effect of fabrication errors on the diffraction efficiency of sawtooth blazed grating

Ge Jianping<sup>1</sup>, Shen Weimin<sup>1</sup>, Liu Quan<sup>2</sup>, Chen Minghui<sup>2</sup>

- (1. Modern Optical Technology Institute of Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Information Optics Engineering Institute of Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** Compared with rectangular and sinusoidal grating, sawtooth grating has higher diffraction efficiency. It can be fabricated by holographic ion-beam etching and single point diamond turning (SPDT) technology. First, the errors in fabrication process with the two methods were introduced. Secondly, effect of these fabrication errors on the diffraction efficiency of sawtooth grating used in NIR and long-wave infrared imaging spectrometer was analyzed. It is indicated that blaze angle error, vertex angle error and burin radius are the main factors in diffraction efficiency. This provides a theoretical foundation and instruction for fabricating high-quality grating used in imaging spectrometer.

**Key words:** sawtooth grating; holographic ion-beam etching; SPDT; error; diffraction efficiency

收稿日期: 2012-10-22; 修订日期: 2012-11-20

基金项目: 国防科工局专项课题

作者简介: 葛建平(1986-), 男, 硕士生, 主要从事光栅衍射效率方面的研究。Email: sd.jianping.ge@163.com

导师简介: 沈为民(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学仪器与光学设计及空间光学方面的研究。

Email: swm@suda.edu.cn

## 0 引言

衍射光栅作为光谱仪器的核心元件<sup>[1]</sup>,其衍射效率直接影响其光能利用率。光栅的衍射效率取决于两个因素<sup>[2-4]</sup>,即使用条件和光栅自身结构参数。使用条件主要包括入射光的波长、入射角、偏振态和衍射光的衍射级次;光栅自身结构参数主要有光栅周期、槽形和槽形参数、材料的折射率等。通常,光谱仪器中光栅的使用条件是固定的,要获得理想的衍射效率,需要通过优化设计光栅槽结构参数来实现。但是,由于制作技术的原因,实际制作的光栅,其结构参数往往会偏离优化设计结果,导致实际衍射效率与设计结果下的衍射效率出现偏差。为了评估这些偏差的影响,有必要分析光栅槽结构参数误差对光栅衍射效率的影响,以指导改进制作工艺,制作出符合要求的光栅。

Drew A. Pommet 研究了一维大周期矩形槽光栅的制作误差对衍射效率的影响<sup>[5]</sup>;曹召良研究了亚波长周期矩形槽光栅的制作误差对衍射效率的影响<sup>[6]</sup>;孟凡涛研究了亚波长周期金属偏振光栅矩形槽结构参数误差对其偏振性能的影响<sup>[7]</sup>。鲜见有关锯齿槽光栅制作误差对其衍射效率影响的报导。文中通过分析全息离子束刻蚀和金刚石车削两种方法在制作锯齿槽光栅过程中可能出现的误差,利用衍射光栅设计分析软件,详细分析了实际制作过程中各种误差对光栅衍射效率的影响。

## 1 光栅制作误差分析

### 1.1 全息离子束刻蚀法对槽形的影响

全息离子束刻蚀法制作闪耀光栅主要有两个步骤<sup>[8]</sup>:第一步通过全息曝光、显影得到光刻胶掩模;第二步通过离子束刻蚀得到光栅成品。通常光栅掩模的槽形是矩形或正弦形,对于正弦形掩模,闪耀角 $\alpha$ 与离子束入射角 $\beta$ 的经验公式为<sup>[3]</sup>:

$$\alpha \approx \beta - 3^\circ \quad (1)$$

对于矩形掩模,闪耀角与离子束入射角的经验公式为<sup>[2]</sup>:

$$\alpha \approx k\beta \quad (2)$$

其中,比例系数 $k$ 取决于与基板和光刻胶的刻蚀速率之比。离子束入射角利用近似的经验公式得出,并且

实际加工出的掩模槽形往往介于矩形和正弦形之间,导致光栅的闪耀角出现较大的误差。

光栅掩模的好坏和离子束刻蚀时间的长短也会影响到闪耀光栅的质量。根据制作经验和前人的分析<sup>[3,9]</sup>,浅槽、占空比大的光栅掩模和离子束小角度入射会导致光栅槽顶角大于 $90^\circ$ 。刻蚀时间过长会造成光栅平顶和闪耀面弯曲现象。刻蚀时间短,掩模与基底材料不同会导致锯齿槽的不连续。

图1为光栅槽形误差的模型图。图1(a)为闪耀角误差和顶角误差的模型图, $\alpha$ 为闪耀角, $\Delta\alpha$ 为闪耀角的误差量, $\gamma$ 为光栅的槽顶角。图1(b)为光栅平顶的模型图, $l$ 的大小用来表征光栅平顶的严重程度;图1(c)为锯齿槽不连续的模型图, $m$ 为锯齿槽的间隔量;图1(d)为闪耀面弯曲的模型图, $\Delta h$ 为弯曲面到理想面的最大距离,用来表征闪耀面的弯曲程度。

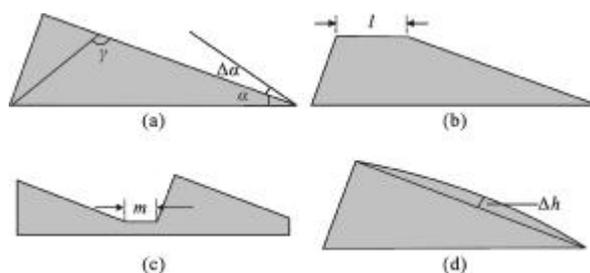


图1 槽形误差的模型图

Fig.1 Model of the groove errors

根据目前的工艺水平,闪耀角为 $3.9^\circ$ 的大周期锯齿槽光栅,闪耀角误差可控制在 $0.5^\circ$ 以内。槽顶角一般可控制在 $90^\circ$ 到 $130^\circ$ 之间,但也有可能达到 $150^\circ$ 。光栅平顶误差可保持在 $1/5$ 光栅周期内。槽形的不连续误差相对较小,可保持在 $1/10$ 光栅周期内。

### 1.2 单点金刚石车削法对槽形的影响

单点金刚石精密数控车削技术是利用金刚石刀具对材料进行数控车削加工,直接得到符合光学质量要求的光学零件。加工后的表面可不经抛光直接使用,主要存在两个方面的误差,即表面粗糙度和槽形误差<sup>[10]</sup>。

工件加工表面形成轮廓峰和轮廓谷,它们之间的距离即为表面粗糙度,如图2所示。在接近理想加工状态时可预估表面粗糙度的峰-谷值为<sup>[10-11]</sup>:

$$PV = \frac{f^2}{8R} \quad (3)$$

式中： $R$  为刻刀圆弧半径； $f$  为进刀量。目前，金刚石车削技术加工出的元件表面粗糙度可优于  $0.01 \mu\text{m}$ ，其精度从微米、亚微米量级正逐步发展到纳米量级。

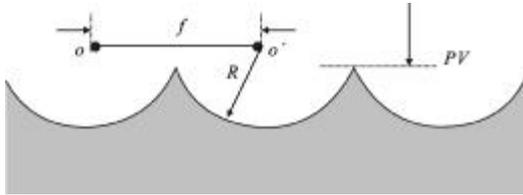


图 2 衍射元件的表面粗糙度  
Fig.2 Surface roughness of the diffractive element

由于刀具的刀尖不是一个无穷小的点，而是有一定大小的圆弧形状，导致两个锯齿槽之间产生一个圆弧形状的过渡区，如图 3 所示，这种现象叫做遮挡效应。遮挡效应引起光栅槽形两方面的变化：槽顶角大于  $90^\circ$  (图 3 中的钝角  $\gamma$ )；锯齿槽不连续，设间隔量为  $n$ 。

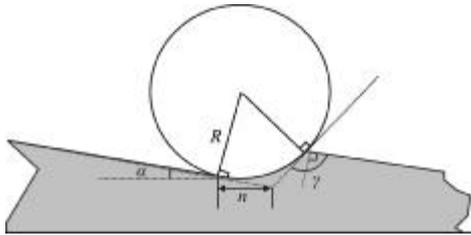


图 3 刀具的遮挡效应  
Fig.3 Blocking effect caused by the burin

由几何关系可得刻刀圆弧半径和槽顶角之间的关系式为：

$$\tan \frac{\gamma}{2} = \frac{-R \cos(\alpha + \gamma) [\tan \alpha - \tan(\alpha + \gamma)]}{\Delta \tan \alpha} \quad (4)$$

刻刀圆弧半径和两锯齿槽的间隔量  $n$  之间的关系式为：

$$n = R \cot \frac{\gamma}{2} \cos \alpha \quad (5)$$

式中： $\alpha$  为光栅的闪耀角； $\gamma$  为光栅槽顶角； $R$  为刻刀圆弧半径； $\Lambda$  为光栅周期。根据公式(4)和(5)得出刻刀圆弧半径由  $5 \mu\text{m}$  增大到  $20 \mu\text{m}$  时，槽顶角和锯齿槽的间隔量随刻刀圆弧半径的变化情况，如图 4 所示，此时选用的光栅闪耀角为  $5.5^\circ$ ，周期为  $50 \mu\text{m}$ 。由图 4 可知，光栅顶角和锯齿槽的间隔量随着刻刀圆弧半径的增大而增大。

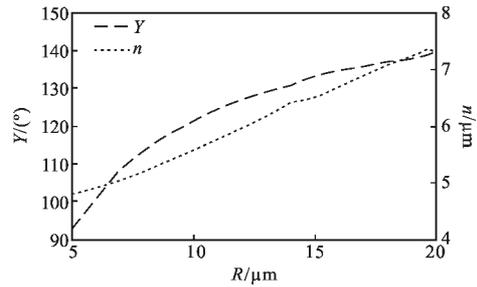


图 4 槽顶角和锯齿槽的间隔量随刻刀圆弧半径变化  
Fig.4 Vertex angle and groove interval as functions of burin radius

## 2 槽形误差影响分析

### 2.1 全息离子束刻蚀误差影响分析

成像光谱仪中，光由空气入射到光栅表面，光栅基底为石英或 K9 玻璃，光栅表面为铝反射膜。按照可见近红外光栅的使用条件，优化设计得到的光栅结构参数如表 1 所示。

表 1 可见近红外锯齿槽光栅指标参数

Tab.1 Index parameters of NIR sawtooth grating

Parameter	Value
Waveband/ $\mu\text{m}$	0.4 - 1.0
Incident angle/ $^\circ$	35.1
Grating period/ $\mu\text{m}$	4.95
Blazed angle/ $^\circ$	3.9
Material	Aluminum
Diffraction order	-1

光栅衍射效率可分为相对衍射效率和绝对衍射效率<sup>[12]</sup>，文中计算的结果为绝对衍射效率，即单色入射光在给定光谱级次中的衍射光通量与入射光通量之比。锯齿槽光栅的衍射效率在闪耀波长  $\lambda_0$  处的峰值衍射效率可以达到 85% 以上。随着波长偏离  $\lambda_0$ ，衍射效率降低，在  $2/3 \lambda_0$  到  $9/5 \lambda_0$  的波段范围内，衍射效率仍可在 45% 以上<sup>[13]</sup>。

GSolver 是基于严格耦合波理论，可用于分析各种复杂周期性结构的光栅设计软件。利用该软件计算存在上述误差下光栅的衍射效率。图 5(a)~5(e)分别为闪耀角误差、顶角误差、光栅平顶、锯齿槽不连续和闪耀面弯曲对衍射效率的影响。由图 5(a)可见，减小光栅的闪耀角会使衍射效率曲线向短波方向移动，增大光栅的闪耀角会使衍射效率曲线向长波方向移动。当闪耀角比设计值小  $0.4^\circ$  时，衍射效率曲线的峰值由  $600 \text{nm}$  偏移到了  $550 \text{nm}$  处，当闪耀角比设计值大  $0.4^\circ$  时，

衍射效率曲线的峰值由 600 nm 偏移到了 650 nm 处。闪耀角误差导致衍射效率曲线的偏移,光谱端点处衍射效率变化最大,0.4°的误差可导致光谱两 endpoints 处的衍射效率值出现 10%到 20%的偏差。

由图 5(b)可见,槽顶角  $\gamma$  由 90°增大到 150°的过程中,虽然光谱端点处衍射效率变化不大,但是中心区域波段的衍射效率降低了10%到 20%。由图 5(c)和 5(d)可见,光栅平顶误差小于  $\Delta/5$ 、锯齿槽间的不连续量小于  $\Delta/10$  时,误差对光栅衍射效率的影响较小,基本保持在 10%以内。由图 5(e)可见,闪耀面的弯曲也会降低光栅的衍射效率,弯曲程度越严重,衍射效率降低的就越多, $\Delta h=50$  nm 时,中心波段的衍射效率降低 5%到 10%。

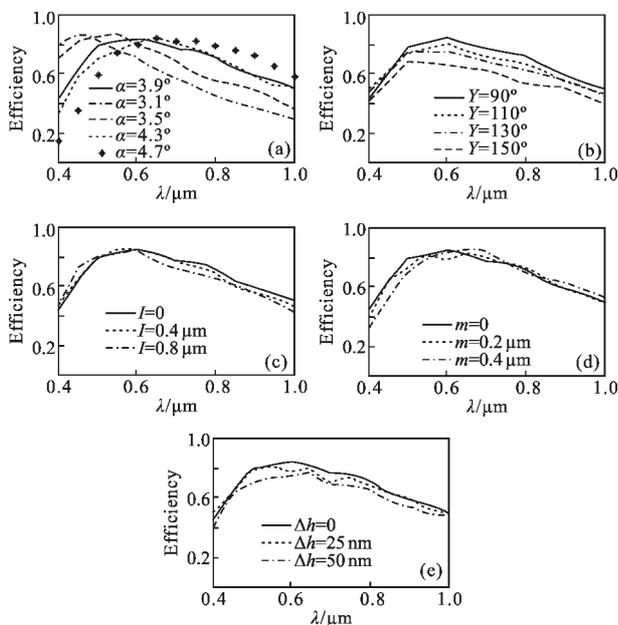


图 5 制作误差对衍射效率的影响

Fig.5 Effect of fabrication errors on the diffraction efficiency

由上述分析可以得出,在当前的加工技术条件下,光栅的闪耀角和槽顶角是影响衍射效率的两个关键因素。在制作光栅时,应尽量把闪耀角误差控制在 0.4°以内,槽顶角保持在 130°以内,否则光栅的衍射效率会与设计结果下的衍射效率偏差较大。

### 2.2 单点金刚石车削误差影响分析

对于槽密度低于 100 lp/mm 的光栅难以用全息法制作<sup>[2]</sup>,可采用单点金刚石车削法直接在金属表面制作。以用于 8~10.5 μm 波段的红外光栅为例,按照光栅的使用条件优化设计得到光栅结构参数如表 2 所示。

表 2 长波红外锯齿槽光栅指标参数

Tab.2 Index parameters of long-wave infrared sawtooth grating

Parameter	Value
Waveband/μm	8 - 10.5
Incident angle/(°)	0
Grating period/μm	50
Blaze angle/(°)	5.5
Material	Gold
Diffraction order	-1

采用半径 5、8、10 μm 的刻刀制作光栅时,光栅槽顶角可利用公式 (4) 得出,分别为 92.2°、113.6°、121.5°;锯齿槽的间隔量 n 可利用公式(5)得出,分别为 4.79、5.21、5.57 μm。图 6 中实线为无误差下的衍射效率曲线,点划线、虚线和冒号线分别是刻刀圆弧半径为 5、8、10 μm 时光栅的衍射效率曲线。使用圆弧半径为 10 μm 的刻刀制作光栅,得到的光栅衍射效率将比理想状况低 10%到 15%。

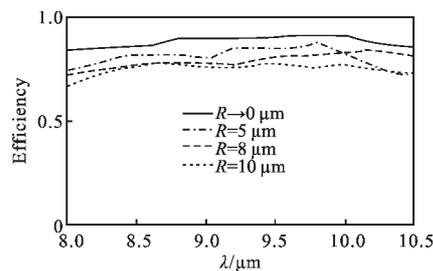


图 6 刻刀圆弧半径对衍射效率的影响

Fig.6 Effect of burin radius on the diffraction efficiency

图 7 中的冒号线为刻刀圆弧半径为 R=10 μm、进刀量 f=5 μm 时光栅的衍射效率曲线,由公式(3)可计算出表面粗糙度, PV=0.3125 μm。理想状况 PV=0 与表面粗糙度 PV=0.3125 μm 时光栅的衍射效率曲线基本重合,误差保持在 5%左右。

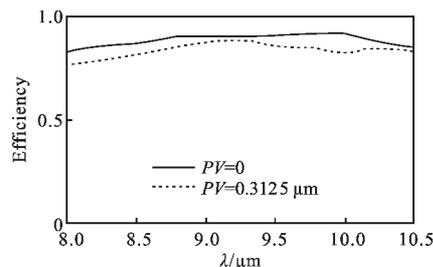


图 7 表面粗糙度对衍射效率的影响

Fig.7 Effect of surface roughness on the diffraction efficiency

由上述分析可得,采用圆弧半径为  $10\ \mu\text{m}$  的刻刀刻划光栅时,遮挡效应引起的槽形误差显著降低了光栅的衍射效率。表面粗糙度( $PV=0.3125\ \mu\text{m}$ )对衍射效率的影响很小,而且当今单点金刚石车削技术的 PV 值可以达到纳米量级<sup>[13]</sup>。因此,应选择小口径刻刀,减小遮挡效应对光栅衍射效率带来的负面影响。

### 3 结 论

分析了全息离子束刻蚀法和单点金刚石车削法在制作光栅时出现的槽形误差。利用光栅计算分析软件 G Solver 计算并分析了不同误差下光栅的衍射效率。全息离子束刻蚀法制作光栅时,闪耀角和槽顶角误差是影响衍射效率的两个关键因素。对于  $3.9^\circ$  的可见近红外光栅,应尽量把闪耀角误差控制在  $0.4^\circ$  以内,槽顶角保持在  $130^\circ$  以内。单点金刚石车削法制作光栅时,槽形误差主要来源于刻刀圆弧半径引起的槽顶角误差和锯齿槽的不连续,应选择小口径刻刀刻划,以减小误差,提高光栅的衍射效率。

### 参考文献:

- [1] Kou Jietao, Bayanheshig, Tang Yuguo, et al. Testing process and result revising on instrument for plane grating diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0705002-1-0705002-6. (in Chinese)  
寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国, 等. 平面光栅效率仪测量过程分析与结果修正[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0705002-1-0705002-6.
- [2] Sun Ting, Jiao Mingyin, Zhang Yuhong. Comparison analysis on the diffractive efficiency of single-layer and double-layer harmonic diffractive optical element [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 622-624. (in Chinese)  
孙婷, 焦明印, 张玉虹. 单层与双层谐波衍射元件的衍射效率对比分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 622-624.
- [3] Wang Haibin. The design and fabrication of convex blazed grating[D]. Suzhou: Soochow University, 2010. (in Chinese)  
汪海滨. 凸面闪耀光栅的设计及其制作[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [4] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)  
季轶群, 沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 285-287.
- [5] Pommet Drew A, Grann Eric B, Moharam M G. Effects of process errors on the diffraction characteristics of binary dielectric gratings[J]. Appl Opt, 1995, 34(14): 2430-2435.
- [6] Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu. Analysis of fabrication error of sub-wavelength dielectric gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(1): 76-80. (in Chinese)  
曹召良, 卢振武. 亚波长介质光栅的制作误差分析 [J]. 光子学报, 2004, 33(1): 76-80.
- [7] Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao, et al. Effect of profile error on performance of sub-wavelength wire-wired polarizer [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 951-955. (in Chinese)  
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 面形误差对亚波长金属光栅偏振器性能的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 951-955.
- [8] Chen Gang, Wu Jianghong, Liu Quan. Study on the profile evolution of the photoresist grating mask and its law [J]. Optical Technique, 2008, 34(1): 133-136. (in Chinese)  
陈刚, 吴建宏, 刘全. 全息光栅光刻胶掩模槽形演化及其规律研究[J]. 光学技术, 2008, 34(1): 133-136.
- [9] Johnson L F. Evolution of grating profiles under ion-beam erosion[J]. Appl Opt, 1979, 18(15): 2559-2574.
- [10] Liu Lin. Study on fast speed optical system of uncooled MWIR imager [D]. Suzhou: Soochow University, 2010. (in Chinese)  
刘琳. 中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [11] Wang Yongjian, Yuan Jiahu, Fan Bin, et al. Methods of edge figuring in digital controlled fabrication of optical surface [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 92-96. (in Chinese)  
万勇建, 袁家虎, 范斌, 等. 光学加工中边缘问题的数控处理方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 92-96.
- [12] Christopher Palmer. Diffraction Grating Hand-book[M]. Sixth ed. New York: Newport Corporation, 2005.
- [13] Mouroulis P, Wilson D W, Maker P D, et al. Convex grating types for concentric imaging spectrometers [J]. Appl Opt, 1998, 37(31): 7200-7208.