

高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用

郑志忠^{1,2,3*}, 杨忠^{1**}, 修连存^{2,3***}

¹南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211100;

²中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

³江苏三深光谱感知技术研究院有限公司, 江苏 南京 211135

摘要 利用矢量衍射理论,对矩形槽型光栅和三角槽型光栅分别进行衍射效率分析,结果表明三角槽型光栅的衍射效率比矩形槽型光栅高出 1 倍左右。基于五轴超精密单点金刚石车床切削工艺,计算了金刚石刀头移动误差、移动间隔标准偏差范围、光栅刻线位置的加工偏差,并分析了刀头磨损对光栅衍射效率的影响。在此基础上,成功研制了曲率半径为 70 mm、刻线密度为 60 line/mm、直径为 52 mm 的凸面闪耀光栅,在 1000~2500 nm 光谱范围内,其最大相对衍射效率大于 80%,平均相对衍射效率大于 60%。实际飞行高光谱数据表明,基于该光栅研制的短波红外成像光谱仪满足地质遥感技术要求。

关键词 光栅; 成像光谱; 凸面光栅; 衍射效率; 超精密加工; 短波红外

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1205002

Development and Application of Shortwave Infrared Convex Blazed Grating with High Diffraction Efficiency

Zheng Zhizhong^{1,2,3*}, Yang Zhong^{1**}, Xiu Liancun^{2,3***}

¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

²Nanjing Center of Geological Survey, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

³Jiangsu Sansheng Institute of Intelligent Spectral Sensing Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211135, China

Abstract In this study, the diffraction efficiency analysis of a rectangular groove grating and a triangular groove grating was performed using the vector diffraction theory. Accordingly, the diffraction efficiency of the triangular groove grating was found to be about one time higher than that of the rectangular groove grating. Based on a new five-axis ultra-precision single-point diamond lathe cutting technique, the diamond tool-head movement errors, the movement spacing standard deviation range and the machining deviation of grating line position are determined and the effect of tool-head wear on grating diffraction efficiency was also analyzed. On this basis, a convex blazed grating with curvature radius of 70 mm, groove density of 60 line/mm, and diameter of 52 mm was developed. And the peak relative diffraction efficiency is larger than 80% and the average relative diffraction efficiency is larger than 60% in the 1000-2500 nm spectral region. The actual hyperspectral data obtained during the flight shows that the shortwave infrared imaging spectrometer developed using the proposed convex grating meets the requirements of geological remote-sensing technology.

Key words gratings; imaging spectrometry; convex grating; diffraction efficiency; ultra-precision machining; short wave infrared

OCIS codes 050.2770; 050.1950; 050.1965

1 引 言

成像光谱技术是一种成像技术与光谱技术相结

合的新型探测技术,已广泛应用于军事和民用领域^[1]。与其他光谱段相比,1000~2500 nm 的短波红外(SWIR)具有独特的探测优势,许多分子基团的合频和一级倍频均位于该波段区间,SWIR 是目

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-19; 录用日期: 2020-03-25

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ050250)、国家重点研发计划课题(2016YFF0103602)

* E-mail: zhengzz_js@126.com; ** E-mail: YangZhong@nuaa.edu.cn; *** E-mail: xiuliancun@china.com

前热门的探测谱段之一^[1-2]。光谱特性是物质固有的理化属性,通过光谱,能够快速对地物进行定性或定量分析。通常地物反射光的能量在 SWIR 波段较弱,且该波段的探测器噪声水平普遍较高,导致光谱成像数据质量不高。因此,研制高性能的 SWIR 成像光谱仪非常迫切^[1]。Offner 型成像光谱仪具有光学相对孔径大、色散线性度好、结构紧凑及成像质量佳等优点。凸面光栅作为 Offner 型成像光谱仪的核心分光器件,直接影响探测灵敏度和信噪比^[1],对仪器的整体性能起着关键作用。

凸面光栅的研制始于 20 世纪 90 年代,美国 PHILIPS 实验室和 HeadWall 公司、德国蔡司公司及日本日立公司等较早开始了基于全息技术制作凸面光栅的研究。经过近三十年的发展,基于全息法制作凸面光栅的技术已经逐渐成熟。HeadWall 公司于 2005 年推出的商业化全息凸面光栅小型成像光谱仪在世界范围内已得到广泛应用。在国内,凸面光栅研究起步较晚。2009 年兰卫华等^[3]分析了凸面闪耀光栅的衍射效率。Liu 等^[4-5]采用全息离子刻蚀法制作了闪耀角为 4.3° 、刻线密度为 200 line/mm、口径为 35 mm、曲率半径为 72 mm 的凸面闪耀光栅,其光谱响应范围为 400~800 nm,平均一级衍射效率大于 35%,最高衍射效率达 54%。2003 年, Wilson 等^[6]采用电子束直写技术制作了凸面闪耀光栅,写入速度达到 $1\sim 2\text{ cm}^2/\text{h}$ 。2005 年美国航空和宇宙航行局(NASA)火星轨道探测器(MRO)搭载的小型成像光谱仪(CRISM)光栅在波长 633 nm 处的相对效率大于 90%,零级波前误差小于 $\lambda/4$ 。印度月船一号上 M3 成像光谱仪的分光系统采用的是利用电子束直写技术制作而成的凸面双闪耀光栅,其在 SWIR 波段的最高衍射效率

大于 60%,实现了波长 430~3000 nm 的宽谱段探测^[7]。2017 年, Xu 等^[8]论证了基于五轴超精密单点金刚石车床切削改造工艺制作凸面闪耀光栅的可行性,但多自由度机械运动会使误差的控制变得复杂,需要进行机械误差测量及补偿。

经过多年发展,基于全息技术制作凸面光栅的工艺已较为成熟,将全息技术与离子束刻蚀相结合可制作凸面闪耀光栅,但是全息法在低刻线密度的光栅制作上没有优势^[9]。用电子束直写技术制作光栅,技术复杂度高,需要专业和昂贵的软硬件设备,通常此技术仅限于制作曲率半径较大或接近平面的凸面光栅。用精密单点金刚石车床切削技术制作光栅是一种近年来发展起来的新型加工方法,此技术易控制闪耀角,在制作高衍射效率光栅上有较大优势。

针对 SWIR 成像光谱仪对凸面闪耀光栅的技术要求,本文从系统指标出发,利用光栅矢量衍射理论对不同光栅表面结构的衍射效率进行分析,仿真出凸面闪耀光栅的衍射效率曲线,并选择衍射效率较高的三角形槽作为光栅表面结构。鉴于刻线密度较低,采用超精密单点金刚石车床机械切削工艺对光栅样品进行加工,并对其进行详细的指标检测。所制作的凸面闪耀光栅已成功应用于小型 SWIR 成像光谱仪系统中,并在遥感调查中得到应用。

2 Offner 型凸面光栅分光原理

典型的 Offner 型成像光谱仪的分光系统由 2 块凹面反射镜和 1 块凸面衍射光栅组成,它是在反射式 Offner 中继光学系统的基础上发展起来的一种新型光谱成像系统,为平面对称系统。分光系统、前置镜头和 SWIR 相机组成一套完整的成像光谱仪系统^[2]。系统组成结构如图 1 所示。

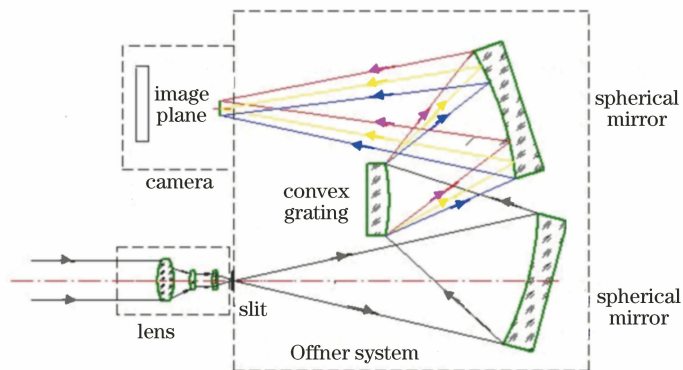


图 1 Offner 成像光谱仪示意图

Fig. 1 Diagram of Offner imaging spectrometer

根据地质遥感的应用需求,SWIR 成像光谱仪须满足表 1 所示的技术指标,对应的光栅指标如表 2 所示。

表 1 成像光谱仪指标参数

Table 1 Specifications of imaging spectrometer

Parameter	Content
Wavelength range	1000-2500 nm
Spectral resolution	10 nm
Focal length	130 mm
F number	F/2.2
Linear dispersion	7.5 nm/pixel
Slit dimension	Height: 12 mm, width: 25 μm
Detector array size	320 pixel×256 pixel
Detector pixel size	30 μm×30 μm

表 2 凸面光栅参数

Table 2 Parameters of convex grating

Parameter	Content
Wavelength range	1000-2500 nm
Curvature radius	70 mm
Diameter	52 mm
Groove density	60 line/mm
Diffraction order	+1
Incident angle	30°
Diffraction efficiency /%	Above 60%
Intensity ratio of stray light	Below 0.1%

3 凸面闪耀光栅衍射效率分析

为了提高光栅的衍射效率,伍德于 1910 年提出通过改变光栅沟槽的形状来控制光在各衍射级次中的能量分布,即“闪耀”光栅技术。如果光栅的刻槽面与光栅的法线不平行,即两者之间存在一个小夹角 θ_b (闪耀角,如图 2 所示)时,光栅能够将零级光谱能量转移到需要的级次光谱上,实现该级次的“闪耀”。

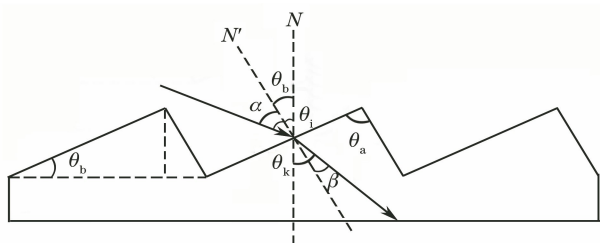


图 2 闪耀光栅结构示意图

Fig. 2 Schematic of blazed grating

图 2 中, N 为光栅法线, N' 为光栅刻槽面的法线(即闪耀面法线), θ_i 为光波入射角, θ_k 为衍射角。根据光栅方程:

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_k) = k\lambda, \quad (1)$$

选择合适的闪耀波长 λ_b ,由(1)式可推导出闪耀角 θ_b 为

$$\theta_b = \arcsin \frac{k\lambda_b}{2d}, \quad (2)$$

式中: k 为衍射级次; d 为光栅周期。

矢量衍射理论是分析和计算光栅衍射效率的重要理论之一,常用的分析方法有积分法、微分法、严格耦合波法等。严格耦合波分析(RCWA)将求解衍射效率的问题转换为求解特征函数的问题,在光栅区域求解麦克斯韦方程的严格解,现已被广泛用于分析光栅衍射效率。基于严格耦合波理论,对矩形槽型和三角形槽型表面结构光栅的衍射效率进行数值分析,可计算凸面闪耀光栅 +1 级衍射光的效率。

3.1 矩形浮雕结构的衍射效率分析

根据光栅参数要求,将衍射效率主波长设为 1600 nm,光栅入射角 θ_i 为 30°,计算光栅刻槽深度 h 、脊宽 a 和光栅周期 d 。在矩形浮雕结构光栅中,最具代表性的是 Lamina 槽型结构^[3],如图 3 所示。

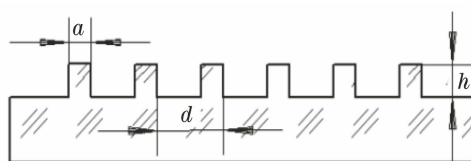


图 3 Lamina 槽型光栅的结构

Fig. 3 Structure of Lamina groove grating

Lamina 槽型光栅的衍射效率取决于光栅槽的结构参数 ρ 和衍射光波的相位差 $\Delta\varphi$ 。为使光栅偶级次衍射效率为 0,结构参数 $\rho = a/d = 1/2$,对于光栅 +1 级衍射,有 $\Delta\varphi = -\pi$,此时可得到最大的衍射效率^[3]。利用严格耦合波理论,仿真得到 Lamina 槽型光栅在不同槽深下的衍射效率曲线,如图 4(a) 所示,其中 TE 为横电波, TM 为横磁波。

图 4(b)为当槽深为 490 nm 时的光栅衍射效率。波长为 1000~2500 nm 时,最大衍射效率为 40.5%,平均衍射效率大于 30%。

3.2 三角形槽型光栅的衍射效率分析

三角形槽型光栅的表面结构如图 2 所示。将光栅参数代入(2)式可计算得到闪耀角 $\theta_b = 2.75^\circ$ 。根据选择的闪耀角进行仿真,得到三角槽型光栅不同顶角 θ_a 下的效率曲线,如图 5(a)所示,可以看出,当顶角为 80°左右时,衍射效率最高。

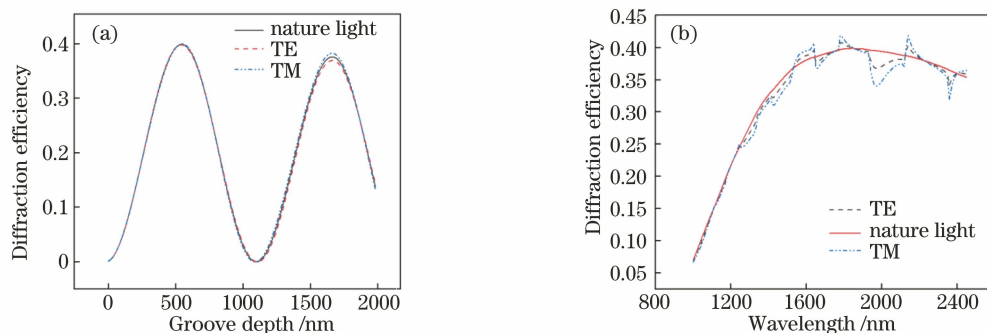


图 4 矩形槽型凸面光栅的衍射效率仿真曲线。(a)不同槽深下;(b)不同波长下
Fig. 4 Simulation curves of diffraction efficiency of rectangular groove convex grating.
(a) Under different groove depths; (b) under different wavelengths

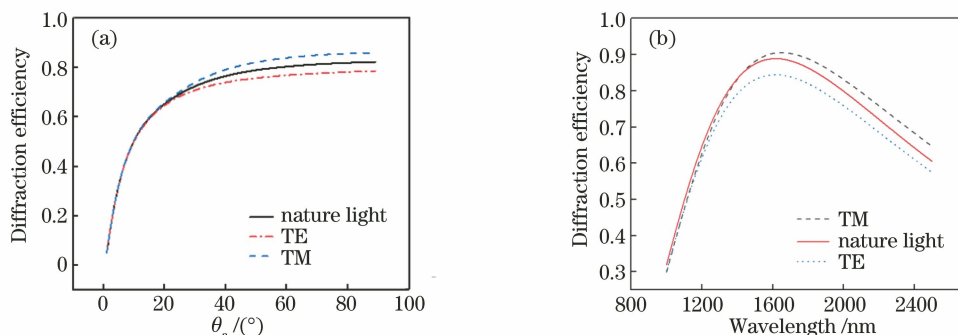


图 5 三角形槽型凸面光栅的衍射效率仿真曲线。(a)不同顶角下;(b)不同波长下
Fig. 5 Simulation curves of diffraction efficiency of triangular groove convex grating.
(a) Under different angles; (b) under different wavelengths

图 5(b)是顶角为 80° 时不同波长的衍射效率曲线。从图 5 可以看出,当 $\theta_b = 2.75^\circ$ 时,顶角在 $50^\circ \sim 85^\circ$ 内能够达到较高的衍射效率,最大衍射效率为 88.9%;SWIR 光谱区间两端的衍射效率分别为 31% 和 60.5%,平均衍射效率大于 65%。

表 3 为不同表面槽型光栅的衍射效率,可以看出,在最大衍射效率处,三角形槽型结构的衍射效率较矩形浮雕结构高出 1.19 倍,整体平均衍射效率高出 1.16 倍。虽然矩形浮雕结构的制作较易实现^[4-5],但考虑到衍射效率对仪器的重要性,选择衍射效率更高的三角形槽型表面结构。

表 3 不同表面槽型光栅的衍射效率

Table 3 Diffraction efficiency of gratings with different groove types %

Structure	Maximum	Average	At initial wavelength	At terminal wavelength
Rectangular groove	40.5	30	7	32
Triangular groove	88.9	65	31	60.5

4 凸面闪耀光栅的制造

选择超精密五轴单点金刚石车床作为凸面闪耀光栅的加工设备,对加工设备进行温度补偿,可以较好地实现闪耀角的控制,从而获得高衍射效率光栅。加工过程如图 6 所示。

机械切削加工过程中受机械轴系误差、位置测量误差、伺服控制误差、光栅基底材料热膨胀及环境因素等影响^[8],导致光栅常数 d 发生变化,进而导致波前相位变化并产生鬼线。同时,光栅常数 d 的

变化也是杂散光引入的主要因素。对于具有均匀等距刻槽的理想光栅,当其中一个刻槽偏离 $\Delta\delta$ 时,入射平面波经光栅衍射后沿自准直方向反射,从而产生了波前相位差。瑞利公差要求波前相位差小于 $\lambda/4$,考虑整个 Offner 分光系统波前相位差要求,凸面光栅的波前相位差应小于 $\lambda/10$,则

$$\Delta\delta < \frac{\lambda}{20\sin\theta}, \quad (3)$$

式中: θ 为自准条件下的入射角。

对于光栅方程,有

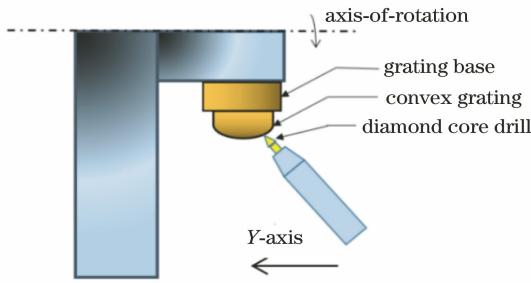


图 6 凸面光栅加工示意图

Fig. 6 Process diagram of convex grating

$$2d \sin \theta = k\lambda. \quad (4)$$

则(3)式可写成

$$\Delta\delta < \frac{d}{10k}. \quad (5)$$

周期性误差会使光谱主线两侧出现鬼线,杂散光增强,影响仪器信噪比。鬼线强度公式可由光谱理论推导^[11],表达式为

$$p_g = \left(\frac{\pi\Delta\delta \sin \theta}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{\pi k \Delta\delta}{\lambda} \right)^2. \quad (6)$$

在光栅参数中,要求值小于 0.1%,即可得

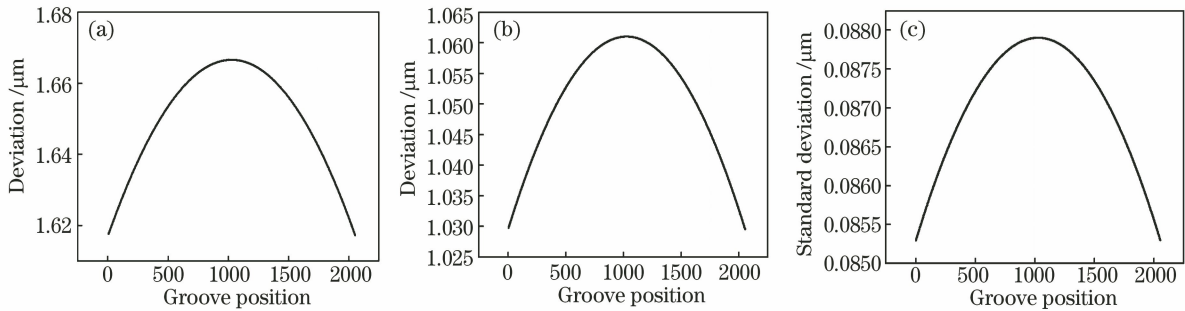


图 7 不同情况下的机床沿 Y 轴的偏差曲线。(a)波前影响下;(b)鬼线影响下;(c)杂散光影响下的标准偏差

Fig. 7 Deviation curves along Y-axis of machine under different conditions. (a) Under effect of wavefront;

(b) under effect of ghost line; (c) standard deviation under effect of stray light

在机床自身精度满足要求的情况下,仍需考虑长周期时间内环境的稳定性和热控制、刀具磨损、附加自由度引起的机床误差。加工过程的循环时间较长,不足以将形状误差保持在允许范围内,需通过温度控制和长期漂移实验来解决。该光栅的毛坯材料采用 6061 铝,但 6061 铝中的夹杂物会使金刚石刀头磨损^[8,10]。金刚石刀尖存在圆角且切削过程中刀头存在磨损,这会导致光栅底部残留圆角。图 8 为残留圆角 R 对光栅衍射效率的影响,其中 P 为光栅刻线周期, W 为残留角弦长。

基于上述模拟分析,采用穆尔纳米技术公司生产的 350FG 超精密机床作为加工设备,其 X、Y、Z 轴的直线度在全行程范围内小于 $0.3 \mu\text{m}$ 。配置的静压旋转工作台 B 轴和主轴内轴定位精度达

$$\Delta\delta < \frac{\lambda}{10\pi k \sin \theta} = \frac{d}{5\pi k}. \quad (7)$$

光栅刻线位置的无规律误差会给光栅应用引入杂散光,直接影响光栅的信噪比,杂散光强度占比由刻槽位置的方均根误差决定^[11],表达式为

$$p_{\text{stray}} = \left(\frac{4\pi\Delta\delta \sin \theta}{\lambda} \right)^2, \quad (8)$$

式中: p_{stray} 为杂散光强度; $\Delta\delta$ 为刻槽位置的方均根误差。

由于凸面光栅表面为圆曲面,故有

$$Z(y) = \sqrt{R'^2 - y^2}, \quad (9)$$

$$d_{\text{prog}}(y) = d \cos \theta = d \frac{\sqrt{R'^2 - y^2}}{R'}, \quad (10)$$

式中: $d_{\text{prog}}(y)$ 为等间距光栅周期 d 在机床 Y 轴方向的投影; R' 为光栅曲率半径。

将光栅参数代入(5)、(7)、(10)式即可得到在波前杂散光和鬼线影响下机床沿 Y 轴的加工偏差,结果如图 7 所示,可以看出,满足要求的沿 Y 轴的加工偏差须优于 $1.062 \mu\text{m}$,移动间隔标准偏差须优于 $0.088 \mu\text{m}$ 。

$\pm 1.0''$, B 轴轴向和径向运动精度小于 $0.1 \mu\text{m}$, C 轴轴向和径向运动精度小于 12.5 nm 。为了提高 SWIR 波段的反射率,须在加工后的凸面光栅表面镀制金膜,图 9 为采用本文工艺制作出的凸面光栅实物。

5 凸面光栅测试

5.1 光栅表面质量

光栅衍射波面相位差决定了光栅的光谱线质量和分辨本领,测量光栅衍射波面时常采用标准平面或球面与实际波面相比较的方式,干涉法是目前常用的波面测量方法之一。选用干涉仪(ZyGo,型号为 VerifireTM),通过凸面光栅 0 级光实现对光栅表面质量的测试。测试结果如图 10 所示,表面面型峰

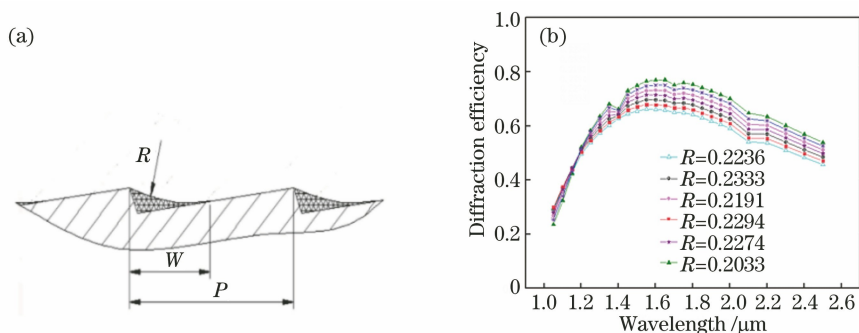


图 8 金刚石刻刀残留圆角对光栅衍射效率影响。(a)残留圆角示意图;(b)不同残留圆角影响下的光栅衍射效率
Fig. 8 Influence of residual fillet of diamond grave on diffraction efficiency of grating. (a) residual fillet diagram;
(b) diffraction efficiency of grating with different residual fillet

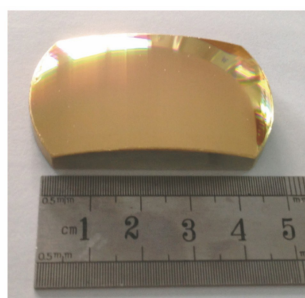


图 9 研制的凸面光栅实物

Fig. 9 Real picture of developed convex grating

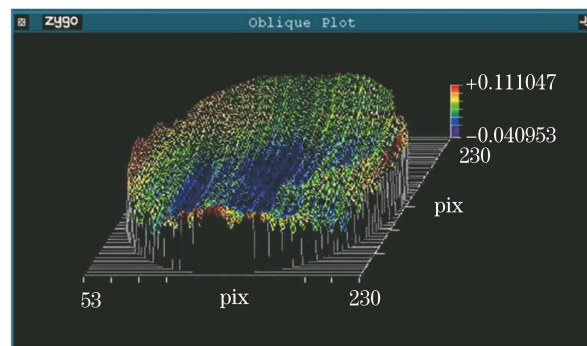


图 10 凸面光栅零级光波前形貌图

Fig. 10 Topography of zero-order optical wavefront of convex grating

谷值(PV)为 0.152λ ,方均根(RMS)为 0.027λ ,其中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

5.2 光栅刻槽测试

采用原子力显微镜 (AFM, Bruker, 型号为 Dimension Icon)对光栅刻槽进行扫描,得到光栅局部剖面图,如图 11 所示。光栅闪耀角为 2.773° ,光栅脊线较尖锐且截面光滑平整,与理论槽型光栅接

近。表 4 为刻槽间距的测量数据。对测量值进行统计,得到刻槽的平均间距为 $16.674 \mu\text{m}$,最大刻槽偏离为 $\Delta d = 0.056 \mu\text{m}$,满足鬼线和波前要求的偏差约束。刻槽位置的方均根误差 $\Delta \bar{\delta} = 0.037 \mu\text{m}$,将其代入(8)式得到 p_{stray} 为 0.077% 。

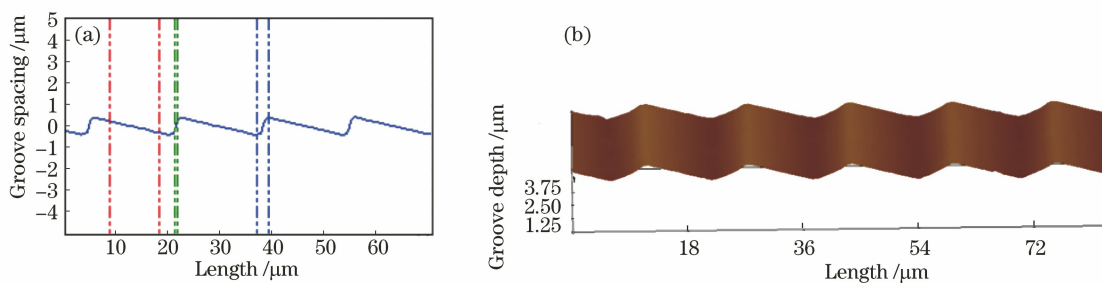


图 11 凸面光栅表面剖面图。(a)凸面光栅表面轮廓;(b)凸面光栅 AFM 形貌图

Fig. 11 Profile of convex grating surface. (a) Surface profile of convex grating; (b) profile of convex grating

5.3 衍射效率测试

在给定波长和一级衍射级次下对光栅进行衍射效率测量,度量方法是将一块与被测光栅孔径相同且镀有相同金膜的反射镜作为参考,记录同一波长条件下的反射能量并计算两次测得的比值。光栅具

有很强的偏振效应,其效率受偏振方向的影响,导致垂直于刻槽的偏振光与平行于刻槽的偏振光效率不同,因此在自然光条件下进行效率测量。图 12 为光栅衍射效率测量装置,该装置由卤素光源、单色仪、光栅座、积分球测光装置、锁定放大器等组成。其中

表 4 刻槽周期数据列表

Table 4 Data list of groove spacing

No.	$d / \mu\text{m}$	No.	$d / \mu\text{m}$	No.	$d / \mu\text{m}$	No.	$d / \mu\text{m}$
1	16.698	11	16.664	21	16.652	31	16.652
2	16.626	12	16.713	22	16.668	32	16.646
3	16.708	13	16.619	23	16.624	33	16.674
4	16.699	14	16.722	24	16.623	34	16.616
5	16.705	15	16.685	25	16.714	35	16.644
6	16.670	16	16.706	26	16.684	36	16.696
7	16.654	17	16.629	27	16.700	37	16.670
8	16.685	18	16.646	28	16.655	38	16.678
9	16.696	19	16.729	29	16.723	39	16.701
10	16.639	20	16.695	30	16.701	40	16.642

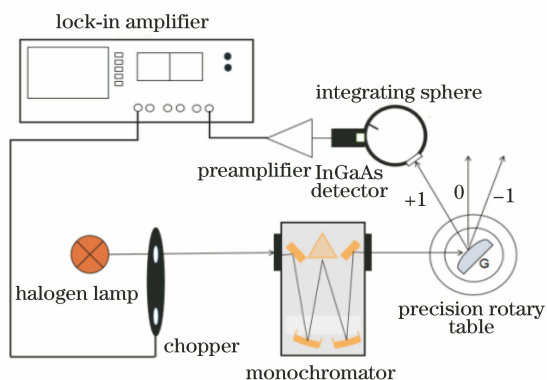


图 12 光栅衍射效率测试装置示意图

Fig. 12 Diagram of grating diffraction efficiency testing device

光栅单色仪焦距为 300 mm, 光栅刻线密度为 300 line/mm, 光谱范围设定为 1000~2500 nm。

测量时单色仪狭缝为 0.05 mm, 光谱带宽约为 0.6 nm, 该值小于凸面光栅的理论带宽。将平面镜和凸面光栅分别置于精密旋转台上, 在光谱范围内以步长 50 nm 进行扫描测量, 分别记录能量值 E_λ 。光栅相对衍射效率定义为

$$\eta_\lambda = \frac{E_{\text{grating}, \lambda}}{E_{\text{mirror}, \lambda}} \quad (11)$$

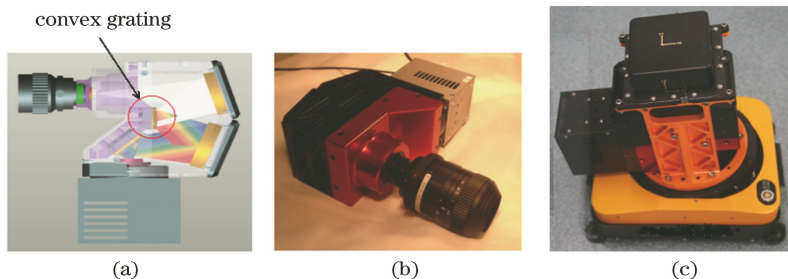


图 14 所设计的系统。(a)成像光谱仪系统结构;(b) SWIR 成像光谱仪;(c)小型机载高光谱系统
Fig. 14 Proposed system. (a)Structure of imaging spectrometer; (b) SWIR imaging spectrometer; (c) small airborne hyperspectral system

图 13 为测得的光栅效率曲线。最高相对衍射效率在波长 1600 nm 附近, 达 81.6%。起始波长 1000 nm 处的衍射效率大于 30%, 终止波长 2500 nm 处的衍射效率大于 50%, 平均效率大于 60%, 与前述理论分析结果接近。

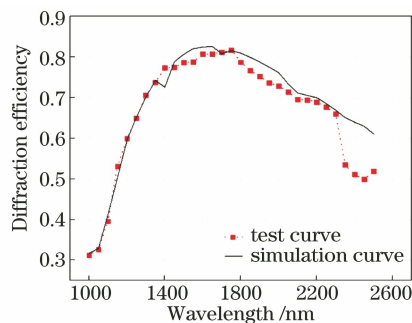


图 13 凸面闪耀光栅衍射效率曲线

Fig. 13 Diffraction efficiency curve of convex blazed grating

6 成像光谱实验与分析

将制作的凸面闪耀光栅作为分光器件, 研制了一套完整的 SWIR 成像光谱仪, 开发了配套的图像数据采集软件, 以此集成了机载高光谱遥感成像系统, 如图 14 所示。

于 2017 年 11 月在甘肃迭部县开展遥感调查飞行,该遥感系统的地面分辨率约为 1 m,飞行面积约为 60 km²。图 15(a)为截取的高光谱图像数据立方体片段,图 15(b)、(c)分别为不同地物的辐亮度光谱曲线和信噪比 (SNR) 曲线 (平均反射率 $\bar{\rho} =$

30%)。图 15 中地物清晰可辨;辐亮度光谱曲线平滑;信噪比在波长 1000 nm 处大于 1000:1,2200 nm 处接近 100:1。从 2018 年至今,该遥感系统已经在国内多个测区开展应用,累计调查面积超 3000 km²。

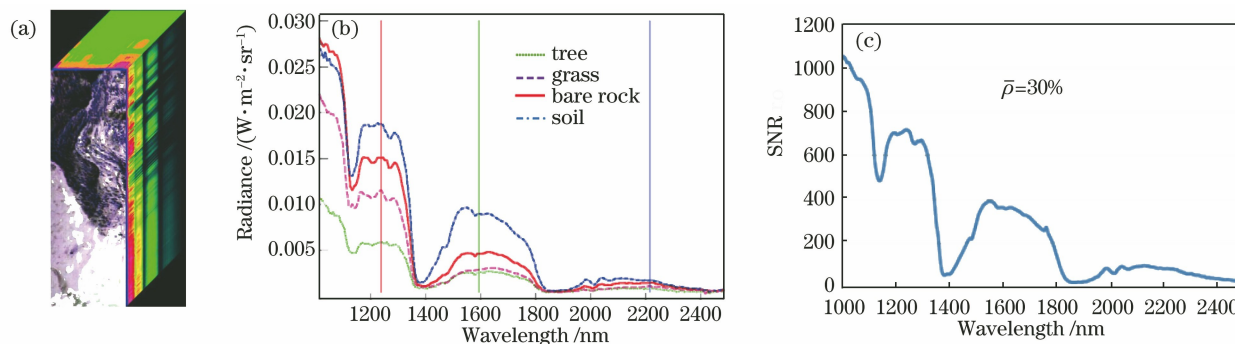


图 15 飞行实验获取的高光谱数据与 SNR 曲线。(a)高光谱图像立方体;(b)典型地物辐亮度光谱曲线;(c) SNR 曲线

Fig. 15 Hyperspectral data and SNR ratio curve obtained from flight experiment. (a) Hyperspectral image cube;

(b) radiance spectral curve of typical ground objects; (c) SNR curve

7 结 论

根据短波红外光谱仪对凸面闪耀光栅的性能要求,通过理论分析和仿真计算,得出三角槽型光栅的衍射效率较高。对研制的凸面光栅表面面型、微结构及其衍射效率进行测试,结果表明,表面面型规整,实际测得的衍射效率与仿真的结果接近,在 1000~2500 nm 光谱区域内,最大衍射效率大于 80%,平均衍射效率大于 60%。将基于该光栅的短波红外成像光谱仪与机载遥感平台集成,飞行获得的图像清晰,光谱质量好,可以满足地质遥感应用的要求。研制的凸面光栅具有低密度刻线,所提制作方法能较好地控制槽型和刻线误差。但对于高密度刻线(如 500 line/mm)的凸面光栅,误差的控制会变得非常复杂且成本大幅增加。因此,后续仍需对机床和环境的长期热稳定性、五自由度机械误差和补偿进行系统研究,以利于将所提技术推广到更广泛的光栅制作中。

参 考 文 献

- [1] Mouroulis P, Green R O. Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 040901.
- [2] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Design of a SWIR Offner imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(7): 2267-2272.
郑志忠, 杨忠, 修连存, 等. 一种 Offner 型小型短波红外成像光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(7): 2267-2272.
- [3] Lan W H, Wang X, Liu Y N, et al. The convex grating diffractive efficiency calculating and second diffraction suppression [J]. Infrared Technology, 2009, 31(5): 256-258.
兰卫华, 王欣, 刘银年, 等. 凸面光栅的衍射效率计算及其二级光谱抑制[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 256-258.
- [4] Liu Q, Ji Y Q, Wu J H, et al. Study on convex grating in hyperspectral imaging spectrometers [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7494: 74940N.
- [5] Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0313001.
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0313001.
- [6] Wilson D W, Maker P D, Muller R E, et al. Recent advances in blazed grating fabrication by electron-beam lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5173: 115-126.
- [7] Green R O, Pieters C, Mouroulis P, et al. The Moon mineralogy mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116: E00G19.
- [8] Xu D, Owen J D, Papa J C, et al. Design, fabrication, and testing of convex reflective diffraction gratings [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15252-15268.

- [9] Wang H B, Liu Q, Wu J H. Fabrication of convex blazed grating by Ar⁺ ion-beam etching [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405002.
汪海宾, 刘全, 吴建宏. Ar⁺ 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅 [J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405002.
- [10] 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.
- [11] Li X T, Ba Y H X G, Qi X D, et al. Two-dimensional fast Fourier transform method of analyzing the influence of plane grating's line error and surface error on grating's spectral performance [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1105001.
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 刻线误差与面型误差对平面光栅光谱性能影响的二维快速傅里叶变换分析方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1105001.