

## 光谱巡天科学级紫外光栅的研制

陈力斯<sup>1,2,3\*</sup>, 胡中文<sup>1,2</sup>, 邱克强<sup>4</sup>, 姜海娇<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>4</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027

**摘要** 不同于国际上其他空间项目采用光栅切换的光谱获取方式,中国空间巡天望远镜采用近焦面拼接光栅的方式获取大视场、宽波段无缝光谱,波长覆盖范围为 250~1000 nm,光谱分辨率  $R \geq 200$ 。国内紫外透射衍射光栅的天文应用尚在起步阶段,制作难度高,且不能从国外获得。经过多年努力,光栅性能在近期获得了较大提升。本文针对紫外光栅的科学应用性能和使用条件,分析了衍射光栅制作参数的优化,给出了衍射效率随入射角、入射光偏振态以及光栅槽形结构参数的变化规律。相关数据对在轨流量定标具有借鉴价值。通过选用不同的光栅结构参数对衍射效率特性进行分析,发现了紫外光栅峰值波长与顶角投影在每个周期上的比值之间的近似线性表达关系。本文讨论了满足科学需求的参数许可域,并将其用于控制光栅制作参数。多次试验后,光栅槽形结构参数和形状得到了精确控制,获得了性能优异的衍射光栅。制作的光栅线密度为 333 line/mm,闪耀角为  $12.51^\circ$ ,峰值效率波长控制在 315 nm,紫外波段实测峰值衍射效率为 72.3%,平均效率为 65.1%。该光栅的槽形、波前质量等均控制在较高水平,衍射波前质量均方根(RMS)达到 0.06 $\lambda$ ,峰谷值(PV 值)达到了 0.33 $\lambda$ 。采用该光栅可获得良好的成像质量。

**关键词** 光栅; 光谱巡天; 衍射效率; 衍射波前; 像质

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0611002

## 1 引言

国内衍射光栅制作技术可以满足多个学科领域的应用需求,但国产紫外透射光栅在以弱光观测为特征的天文科学应用方面鲜有应用。本文基于我国载人航天工程空间巡天望远镜的科学需求<sup>[1]</sup>,介绍了光谱巡天的关键器件——紫外光栅的研制情况。2 m 级空间巡天望远镜的光学系统采用焦比为 14 的离轴三反结构,视场为 1.1 平方度的巡天相机作为该望远镜的主要载荷,其功能之一是实现从紫外到近红外波段的无缝光谱巡天;该望远镜的观测波长范围为 250~1000 nm,平均光谱分辨率不小于 200,最小光谱分辨率不小于 180。

国际上已经有多个实现无缝光谱观测的空间光谱仪器,它们的色散元件主要采用多个棱栅或反射光栅切换的工作方式。哈勃空间望远镜上搭载的

WFC3 配置了 3 块棱栅来获取无缝光谱,这 3 块棱栅分别是工作在红外波段<sup>[2]</sup>的棱栅 G102(800~1150 nm)和 G141(1100~1700 nm)以及工作在紫外波段<sup>[3]</sup>的棱栅 G280(200~400 nm),它们可实现分辨率为 70@300 nm、210@1000 nm 和 130@1400 nm 的无缝光谱观测。詹姆斯韦伯太空望远镜上搭载的 NIRISS<sup>[4]</sup>在宽视场无缝光谱和单目标无缝光谱下采用棱栅作为色散元件,星系演化探测器 GALEX 也采用棱栅作为色散元件。EUVE 和 WUPPE 分光偏振计的色散元件是反射光栅。

巡天相机获取的光谱质量及效率不仅与光学系统的成像质量有关,还与系统各组件的性能有关。色散元件作为光谱仪器的核心器件<sup>[5]</sup>,其类型需要合理确定。考虑到棱栅的结构尺寸和质量均较大,会导致零级像恶化,本研究团队将具有偏振相对不敏特点<sup>[6]</sup>的透射光栅作为巡天相机的色散元件,以

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-08-02; 录用日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11927804,11873013)

通信作者: \*lschen@niaot.ac.cn

实现光学系统的紧凑性;同时,采用熔石英作为基底材料,以获得较好的透过率、稳定性和力学性能。巡天相机中的 24 块光栅通过拼接的方式置于望远镜焦平面前的会聚光路中,它们每 8 个为一组分别工作在紫外、可见光和红外三个波段,其中紫外波段光栅的工作波长范围是 255~420 nm,刻线密度为 333 line/mm,所有光栅工作在望远镜的边缘视场;每两块光栅共用一个 CCD 探测器。

不同于国际上的其他空间项目采用光栅切换的光谱获取方式,巡天相机采用近焦面拼接透射光栅的方式获取大视场、宽波段无缝光谱。这样,工作在同一波段的的不同拼接光栅在工作参数上就会有较大差异。巡天相机的工作波段拓展到深紫外波段,对紫外光栅的衍射效率提出了较高要求。另外,巡天相机的光栅工作在会聚光路中,巡天相机的技术指标对其零级光谱和一级光谱有像质与效率要求。巡天相机的光栅需要具有良好的像质和较高的衍射效率,因此,需要合理设计紫外透射光栅并实现光栅制作工艺的控制,从而获得具有优异性能的光栅。

光栅的制作通常需要使用机械刻划、全息记录和复制光栅技术。全息离子束刻蚀制作的光栅由于集成了机械刻划光栅高衍射效率和全息制作光栅无鬼线、低杂散光等优点<sup>[7]</sup>而受到广泛关注。Newport Richardson Gratings 公司一般通过机械刻划和全息记录方式生产母光栅,然后通过复制光栅技术批量制作商业化光栅。对于平面透射紫外光栅,采用复制光栅技术进行制作具有一定的挑战性,需要单独订制。Thorlabs 可以提供刻线密度分别为 300,600,830,1200 line/mm 的商业化透射紫外光栅,其中刻线密度为 300 line/mm 的光栅的峰值衍射效率为 75.0%,其在紫外波段的平均衍射效率为 66.1%,峰值波长为 310 nm<sup>[6]</sup>。应用于空间巡天望远镜中的紫外透射光栅因涉及空间科学等敏感领域无法从国外购买,因此本研究团队拟采用全息离子束刻蚀制作工艺自主研制<sup>[7-9]</sup>。自 1976 年

Aoyagi 等<sup>[10]</sup>首次使用全息离子束刻蚀方法成功制作三角形槽形结构闪耀光栅以来,全息离子束制作闪耀光栅就集中在真空紫外和软 X 射线波段。近年来,研究人员分别针对紫外波段光栅全息离子束刻蚀制作中的掩模工艺<sup>[11-12]</sup>以及光栅的闪耀角精确控制<sup>[13]</sup>、表面均匀性<sup>[14]</sup>、杂散光抑制<sup>[15]</sup>和衍射波前控制<sup>[16]</sup>等进行了深入研究。当紫外光栅的闪耀角较小时,透射衍射效率对槽形参数较为敏感<sup>[13]</sup>,因此,对于应用中的光栅来说,其制作参数的精确控制尤为重要。2016 年,董圣为等<sup>[17]</sup>通过全息离子束刻蚀技术制作了刻线密度为 360 line/mm、闪耀角为 16.8°以及刻线密度为 400 line/mm、闪耀角分别为 35°和 43°的透射闪耀光栅,但他们并未解决沉积物等问题,无法精准地控制槽形与闪耀角。

本文针对空间巡天望远镜紫外光栅的科学应用性能和使用条件,进行了衍射光栅制作参数的优化;选用不同的光栅结构参数分析衍射效率特性,并讨论了满足科学需求的参数许可域(该范围不仅可以作为光栅参数制作的目标,还可以用于判定光栅的实际制作参数是否满足要求),用于控制光栅制作。多次试验后,光栅槽形参数和形状得到了精确控制,制作的高衍射效率光栅具有优异的性能。

## 2 光谱巡天紫外光栅性能的理论分析

巡天相机中的透射光栅以设计的角度插入望远镜焦平面前的会聚光路中,单块光栅的工作原理如图 1 所示,在探测器上可以同时得到目标的零级像和无缝光谱像。光栅的制作质量是影响巡天相机无缝光谱性能最重要的因素之一,巡天相机要求其光栅具有高的衍射波前质量、良好的像质和高的衍射效率。本节主要分析巡天相机中光栅的衍射效率。光栅的衍射效率与光栅的工作条件(包括入射波长、入射角、离面角、入射光的偏振态)有关,同时也与光栅本身的槽形结构参数有关。本节对影响光栅衍射效率的因素进行仿真分析,比较全面地评估巡天相

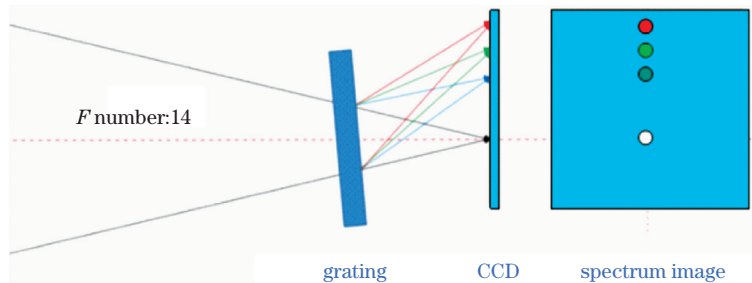


图 1 巡天相机中单块光栅的工作原理

Fig.1 Working principle of grating in Camera of Sky Survey

机中的光栅在不同工作参数下的衍射效率。其中: 2.1 节以紫外波段的高峰值衍射效率和平均效率为设计目标, 并合理设置峰值波长位置和 0 级衍射效率等, 得到了理论光栅结构参数, 同时结合光栅的使用条件对各种情形下的光栅衍射效率进行了仿真分析。将理论光栅结构参数作为光栅制作目标, 2.2 节选用不同的光栅结构参数分析了衍射效率特性, 讨论了满足科学需求的参数许可域, 用于控制光栅制作。

## 2.1 巡天相机紫外光栅性能的仿真研究

本小节根据巡天相机无缝光谱对探测极限星等和光谱效率等的要求, 得到光栅衍射效率的设计目标, 并用该设计目标设计光栅结构参数。

巡天相机的科学技术指标要求能探测到的极限星等为 20~23 等, 其光谱效率和成像质量是影响上述指标(探测极限星等)的重要方面。巡天相机的透射紫外光栅工作在会聚光束下, 其获取的最终的光谱效率由前端望远镜在工作波段内的效率、光栅衍射效率和 CCD 探测器量子效率等因素综合决定。在现有的技术水平下, 工作在紫外波段的探测器的量子效率依然偏低: 一个典型型号的探测器在 250 nm 处的量子效率约为 47%, 在整个紫外波段的峰值量子效率约为 62%。

一般来说, 衍射效率在远离峰值波长处逐渐减小, 故巡天相机透射紫外光栅峰值波长的位置要合适, 同时, 光栅衍射效率要尽可能大。另外, 巡天相机的光栅透射 +1 级衍射光用于实现无缝光谱观测这一科学目标, 因此, 将巡天相机光栅的 +1 级衍射

效率作为主要设计目标, 以满足项目极限星等的要求。考虑到探测器的量子效率以及光栅衍射效率存在 15%~25% 的工艺损失(工艺损失是在实际光栅制作过程中受工艺条件等因素影响而产生的), 透射紫外光栅衍射效率的需求设定为: 光栅在 +1 级紫外波段的平均理论衍射效率不小于 75%、峰值波长为 315 nm、工作波段内的 0 级平均衍射效率小于 5%。

紫外光栅槽形设计就是选取合适的光栅槽形参数, 以满足光栅衍射效率指标要求。光栅的槽形参数是决定光栅衍射效率的重要因素。光栅衍射效率的数值求解主要分为标量衍射理论和矢量波理论两类方法, 其中: 标量衍射理论具有一定的适用条件; 矢量波理论本质上是严格求解麦克斯韦方程, 经常采用积分法与微分法进行求解。微分法以严格耦合波分析(RCWA)为主, 该方法已被广泛应用于光栅衍射效率的仿真计算<sup>[18]</sup>。对于紫外光栅的槽形, 首先考虑常见的标准槽形, 如矩形槽形、三角形槽形(闪耀型)、锯齿型(特指顶角是直角的闪耀型)槽形和正弦型槽形。图 2 给出了入射角为 4° 时, 不同槽形光栅衍射效率的设计结果, 透射 +1 级衍射效率曲线如图 2(a) 所示, 0 级衍射效率曲线如图 2(b) 所示。结果显示: 三角形槽形或锯齿型槽形在工作波段内可以获得较大的 +1 级峰值衍射效率和平均衍射效率; 矩形槽形和正弦型槽形的最大衍射效率小于 45%, 显然不满足光栅设计需求; 三角形槽形或锯齿型槽形的 0 级衍射效率明显低于矩形槽形和正弦型槽形。

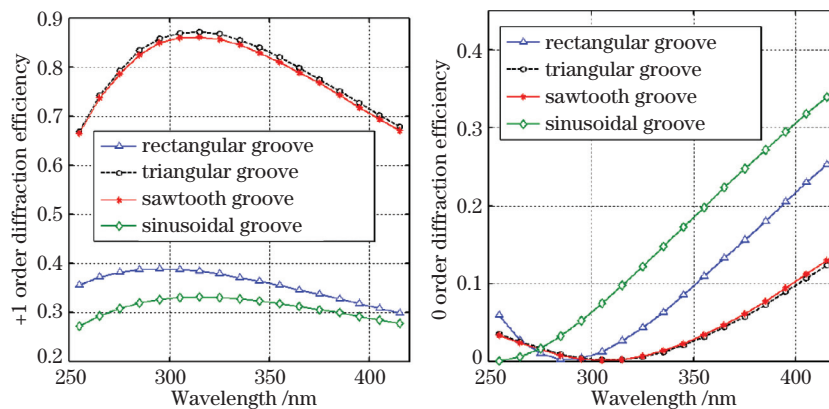


图 2 不同槽形光栅的衍射效率。(a) +1 级衍射效率;(b) 0 级衍射效率

Fig. 2 Diffraction efficiency of gratings with different grooves. (a) +1 order diffraction efficiency; (b) 0 order efficiency

图 2 的设计结果表明: 矩形槽形的最优槽形参数是占空比  $r=0.47$  和槽深  $H=0.11d$  ( $d$  是光栅的周期), 此时, 紫外波段的峰值衍射效率为 0.39; 正弦型槽形的最优槽形参数是槽深  $H=0.12d$ , 此

时, 紫外波段的峰值衍射效率为 0.33; 锯齿型槽形光栅的闪耀角(左底角)为  $12.3^\circ$  时, 其峰值衍射效率为 0.86。对于工作在紫外波段的三角形槽形(闪耀型)光栅, 当闪耀角(左底角)为  $12.3^\circ$ 、反闪耀角

(右底角)为  $88^\circ$  时,其 +1 级平均衍射效率为 0.79, 峰值衍射效率为 0.87, 0 级平均衍射效率为 0.04; 同时,其在 255 nm 处的衍射效率为 0.67, 在 415 nm 处的衍射效率为 0.68。所设计的巡天相机光栅拟采用三角形槽形(闪耀型)方案。

巡天相机中的拼接光栅工作在望远镜焦平面前,不同光栅的工作参数具有较大差异,从节省成本的角度考虑,所有的紫外波段光栅拟采用相同的槽形参数。评估巡天相机中的拼接光栅在不同入射角、不同入射光偏振态下的衍射效率,从而获取目标的高精度理论标准谱,这是实现高质量流量定标的前提。以下的数值仿真验证了各拼接光栅采用上述同一槽形参数是可行的。

图 3(a)给出了紫外波段光栅的 +1 级衍射效率与入射角之间的关系。可以看出,当入射角从

$0^\circ$  变化到  $20^\circ$  时,光栅衍射效率的变化量小于 0.02,变化缓慢。依据标量衍射理论可以证明上述结果。

光栅衍射效率与入射光偏振态的关系同样是需要分析的。根据光栅最优槽形可以得到不同入射光偏振态下光栅的衍射效率。不同的入射光偏振态用入射光的电场方向与入射面的夹角  $\gamma$  来表示。对于 TE 偏振,有  $\gamma=0^\circ$ ,也就是电场方向垂直于由入射波矢和  $z$  轴组成的入射平面;对于 TM 偏振,有  $\gamma=90^\circ$ ,也就是电场方向位于入射波矢和  $z$  轴组成的入射平面内。对于任意偏振态下的入射光,紫外波段光栅的衍射效率如图 3(b)所示。可以看出,对于巡天相机工作中的光栅,入射光的偏振对其衍射效率的影响很小,不同入射光偏振态下衍射效率的变化小于 0.03。

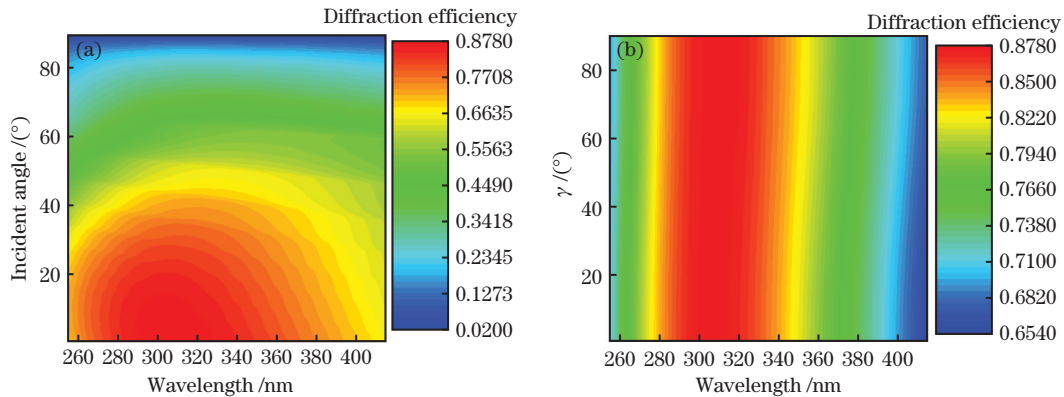


图 3 不同工作参数下光栅的衍射效率。(a)不同入射角下;(b)不同入射光偏振态下

Fig. 3 Diffraction efficiency of grating under different parameters. (a) Under different incident angles; (b) under different polarization states

巡天相机中所有光栅的工作入射角小于  $11^\circ$ , 工作在不同入射角、不同偏振态下的光栅的衍射效率评估结果表明,采用同一槽形参数的方案是可行的。

本小节根据科学目标需求,得出了光栅结构参数,评估了不同入射角、不同偏振态下光栅的衍射效率,这些结果对于在轨流量定标具有一定的借鉴价值。

### 2.2 光栅槽形误差分析

在 2.1 节得到的理论光栅结构参数的基础上,本小节主要分析不同光栅结构参数空间下衍射效率的特性,用于控制光栅的制作。

在光栅设计和制作中,光栅槽形结构表征参数模型主要有两种:第一种光栅参数模型是槽深  $H$  与顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$ ;第二种是对光栅槽形几何形状的直接描述,对于闪耀型衍射光栅,选

取左底角(闪耀角) $\alpha$  和右底角(反闪耀角) $\beta$ ,如图 4 所示。实际上,这两种参数模型在数学表达上是等价的。

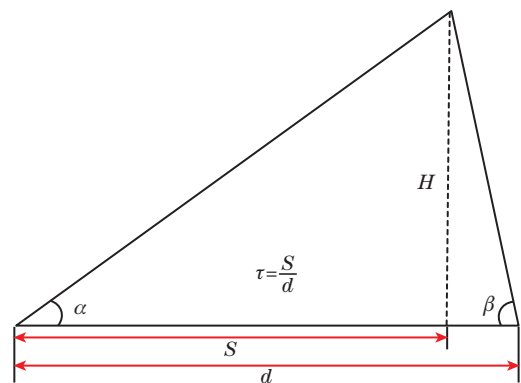


图 4 光栅槽形结构表征参数

Fig. 4 Grating groove characterization parameters

假设光栅的周期为  $d$ ,如果闪耀型衍射光栅的左底角和右底角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ ,则槽深  $H$  和顶角投

影在每个周期上的比值  $\tau$  可以唯一确定,因此

$$\begin{cases} H = \frac{\tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} d \\ \tau = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \end{cases} \quad (1)$$

如果闪耀型衍射光栅的槽深为  $H$ ,顶角投影在每个周期上的比值为  $\tau$ ,则闪耀型衍射光栅的左底角  $\alpha$  和右底角  $\beta$  可以唯一确定,因此

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{H/d}{\tau}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{H/d}{1-\tau}\right) \end{cases} \quad (2)$$

上面给出了同一种槽形的两种不同形状表征参数模型,这两种参数模型在数学表达上是等价的。接下来的数值仿真结果表明第一种光栅槽形形状表征在描述峰值波长上更具优势。从工艺上来说,全息曝光离子束刻蚀和机械刻划本质上是通过控制槽形的角度来控制槽形的,因此第二种光栅槽形形状

表征模型多在工艺制作中使用。

接下来分析紫外光栅衍射效率关键指标与这两组形状表征参数的关系。对于巡天相机中的紫外光栅来说,其峰值衍射效率、峰值波长和波段内平均衍射效率均是关键指标,这里主要分析不同光栅结构参数空间下的平均衍射效率和峰值衍射效率。

显然,光栅在工作波段内的平均衍射效率与光栅的峰值效率、峰值波长位置密切相关。图 5(a)给出了紫外光栅在工作波段内+1 级平均衍射效率与左底角  $\alpha$ 、右底角  $\beta$  的关系,图 5(b)给出了紫外光栅在工作波段内+1 级峰值衍射效率与槽深  $H$ 、顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  的关系。数值仿真结果显示,光栅槽深  $H$  和顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  更适合描述峰值衍射效率和峰值波长,光栅槽形左底角  $\alpha$  和右底角  $\beta$  更适合描述波段内的平均衍射效率。

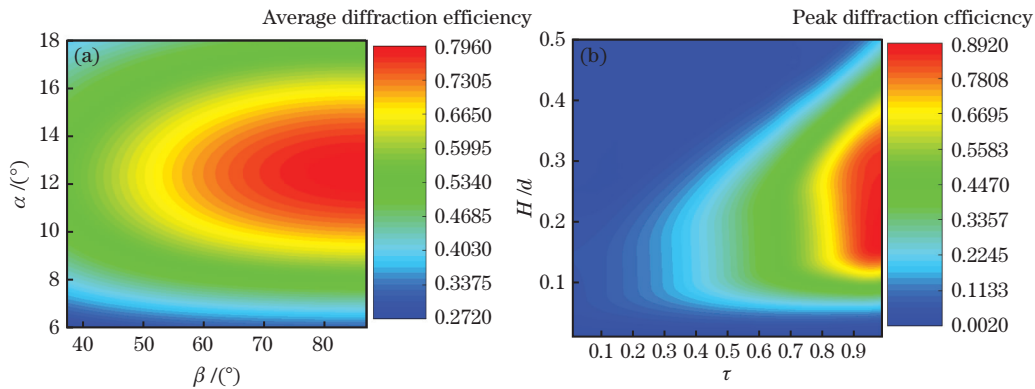


图 5 光栅衍射效率与不同槽形结构表征参数的关系。(a)平均衍射效率与左底角  $\alpha$ 、右底角  $\beta$  的关系; (b)峰值衍射效率与槽深  $H$ 、顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  的关系

Fig.5 Relationship between diffraction efficiency of grating with different characterization parameters of groove. (a) Relationship between average diffraction efficiency with  $\alpha$  and  $\beta$ ; (b) relationship between peak diffraction efficiency with  $H$  and  $\tau$

图 5(b)显示:工作在紫外波段的光栅,其最优槽深在  $0.22d$  附近;当  $H$  接近 0 时,相当于没有刻线条纹,衍射效率接近 0;当  $\tau$  接近 1 时,相当于右底角(反闪耀角)为  $90^\circ$ ,峰值衍射效率较大。

对于峰值波长的位置,图 6 给出了槽深  $H$  在最优槽深附近时,峰值波长与顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  之间的关系。

图 6 显示:当槽深不变时,随着顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  增大,峰值波长向紫外波段偏移;对于在该闪耀槽形下的光栅,峰值波长与顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  近似呈线性关系; $\tau$  的减小和  $H$  的增大都将使峰值波长向可见光波段偏移。

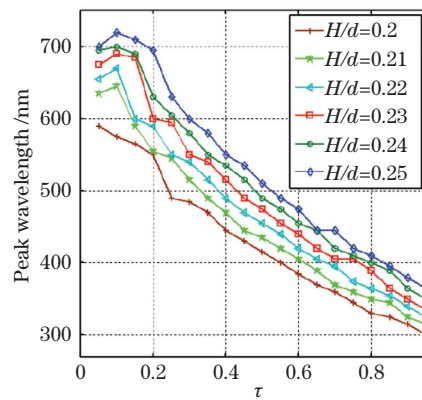


图 6 峰值波长与槽深  $H$ 、顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  之间的关系

Fig.6 Peak wavelength versus  $H$  and  $\tau$

光栅槽形的左底角(闪耀角)和右底角(反闪耀角)表征的模型多在工艺制作中采用,图 7 给出了峰值衍

射效率和平均衍射效率在该参数模型下的等高线图,图中右底角控制在小于 90°是为了工艺制作方便。

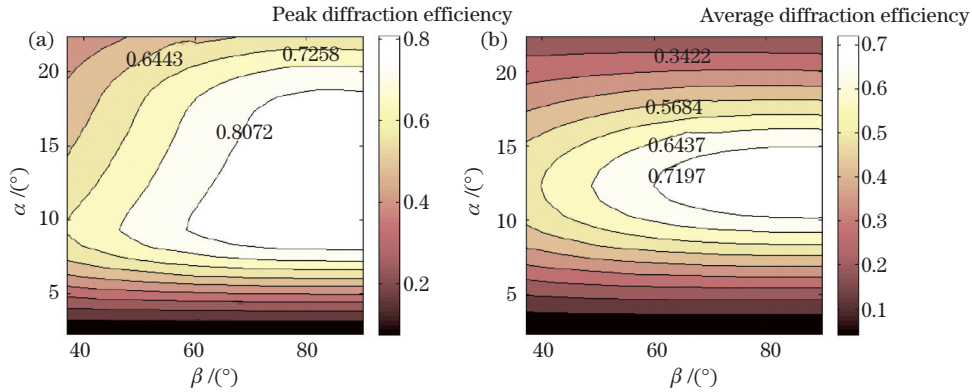


图 7 光栅衍射效率与不同槽形参数的等高线图。(a)峰值衍射效率与左底角、右底角的等高线；(b)平均衍射效率与左底角、右底角的等高线

Fig.7 Contour lines between diffraction efficiency of grating and different groove parameters. (a) Contour lines between peak diffraction efficiency with left and right angles; (b) contour line between average diffraction efficiency with left and right angles

图 7 显示,左底角对衍射效率的影响比右底角更明显。这里讨论左底角  $\alpha$  和右底角  $\beta$  的变化对  $H$  和  $\tau$  的影响。将式(1)中的  $H$  和  $\tau$  分别对左底角  $\alpha$  和右底角  $\beta$  求偏导,有

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \alpha} / \frac{\partial H}{\partial \beta} = \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha} \\ \frac{\partial \tau}{\partial \alpha} / \frac{\partial \tau}{\partial \beta} = -\frac{\sin(2\beta)}{\sin(2\alpha)} \end{cases} \quad (3)$$

在 2.1 节中设计的理论光栅结构参数附近,有  $\frac{\partial H}{\partial \alpha} / \frac{\partial H}{\partial \beta} = 22$  和  $\frac{\partial \tau}{\partial \alpha} / \frac{\partial \tau}{\partial \beta} = -0.17$ 。该结果说明,如果左底角和右底角引入相同的偏差量,则左底角偏差导致的槽深变化量是右底角偏差导致的槽深变化量的 22 倍,右底角偏差导致的顶角投影在每个周期上的比值  $\tau$  的变化量是左底角偏差导致的  $\tau$  的变化量的 5.8 倍。槽深的变化会直接影响峰值效率,峰值效率是影响平均衍射效率的重要因素。图 7 所示的数值仿真结果以及上述分析表明,光栅左底角(闪耀角)对衍射效率的影响比右底角更敏感。

由式(3)可以得到,当左底角  $\alpha$  的理论值较小时,  $\frac{\partial H}{\partial \alpha} / \frac{\partial H}{\partial \beta}$  和  $\frac{\partial \tau}{\partial \alpha} / \frac{\partial \tau}{\partial \beta}$  都较大,  $H$  和  $\tau$  的剧烈变化会导致衍射效率偏离理论设计值。由于巡天相机中应用的紫外光栅的闪耀角较小,因此光栅衍射效率对光栅槽形参数很敏感。

从图 7 可以看到,光栅的槽形参数需要精确控制,左底角(闪耀角)的误差需要控制在小于 1° 的范围内。同时,光栅制作工艺需要进行设计,以获得具

有优异性能的高衍射效率紫外透射光栅。

### 3 巡天相机紫外波段光栅的制作流程及初步测试结果

采用全息-离子束刻蚀技术制作以熔融石英作为基底的闪耀光栅,制作流程如下:全息光刻系统使用光敏材料(光刻胶)记录两相干光束产生的明暗交替的干涉条纹,这一步称为全息曝光;之后进行显影处理,得到均匀的光刻胶光栅掩模;然后利用以  $\text{CHF}_3$  作为工作气体的反应离子束系统垂直刻蚀上一步得到的光刻胶光栅掩模,将光刻胶光栅图形转移到熔融石英基底上,形成梯形槽掩模,也称同质掩模;最后,采用离子束倾斜刻蚀石英同质掩模,获得闪耀光栅槽形<sup>[19-20]</sup>。

在光栅制作工艺中,采用宽光束扫描曝光,以提高光束的大面积均匀性并降低杂散光的水平<sup>[21]</sup>。采用动态曝光方式,即曝光的同时基底作水平运动,在基底移动过程中对干涉条纹进行相位匹配,直至整个基底完全被曝光<sup>[22]</sup>。在该方法中,基底上的每一根光栅条纹都是由多根干涉条纹叠加曝光形成的,条纹上的局部瑕疵被补偿,因此可以得到平滑的光栅条纹,提高了光栅的大面积均匀性并降低了杂散光水平。

衍射波前主要由基底的面形误差和产生光栅图形的双光束干涉光路的像差决定。在光栅制作过程中,尤其是在光刻过程,通过降低光路像差可以减小光栅条纹的周期误差,获得高质量的衍射波前。

巡天相机中的光栅需要具有高质量的衍射波前、良好的像质和高的衍射效率。紫外波段光栅要

求波前质量的峰谷值(PV 值)小于  $0.5\lambda$ , 在前端望远镜系统提供的像质条件(80% 能量集中度半径为  $0.15''$ )下, 其成像质量为: 无缝光谱像质优于  $0.3''$ , 最大值优于  $0.4''$ 。在制作过程中通过对光栅槽形、杂散光和衍射波前等进行控制, 可以获得性能优异的紫外透射光栅。

本文将从 3 个方面测试光栅的性能。首先根据光栅槽形设计结果采用旧的光栅制作工艺制作光栅 G1, 测试后发现其槽形未实现精确控制。3.1 节从光栅槽形的精确控制出发, 对制作工艺进行改进, 并采用改进工艺制作光栅 G2, 测试后发现其槽形得到了精确控制, 说明改进的制作工艺可以精确控制光栅的槽形。3.2 节和 3.3 节分别给出了光栅衍射波前和成像质量的测试结果, 结果显示, 改进的制作工艺可以精确控制光栅槽形, 光栅具有优异的性能, 可以满足空间巡天望远镜紫外光栅的科学需求。

### 3.1 光栅槽形及衍射效率

根据设计结果先后试制了尺寸为  $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的光栅样品 G1 和尺寸为  $50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的光栅样品 G2, 其刻线密度均为  $333\text{ line/mm}$ , 基

底材料均为熔融石英。采用原子力显微镜测试两种光栅样片的槽形<sup>[23]</sup>; 光栅衍射效率测试系统包括 LDLS EQ1500 型超带宽激光白光光源、紫外波段带通滤光片、ACTON SpectroPro 2500i 型单色器、高精度转台、聚焦光学系统、光电探测器等设备; 激光光源采用氮气作为泵浦源, 激光发散出射后由紫外波段带通滤光片和两个紫外增强型离轴抛物面镜调制, 然后进入单色器, 激光经单色器出射后再通过准直透镜入射到测试光栅上, 然后通过聚焦光学系统将衍射光聚焦在光电探测器的靶面上。测试光栅的衍射效率时, 先分别测试未插入光栅时对应波长处入射光和环境光的能量, 然后插入待测光栅, 旋转转台使光电探测器到达衍射光位置再测试衍射光的能量。衍射效率等于衍射光的能量除以入射光的能量。

这里需要指出的是, G1 光栅是一片完整的大片光栅, 无法进行扫描电镜测试。本研究团队对实验同期制作的另一实验片进行扫描电镜测试, 测试结果如图 8(a) 所示。G1 光栅槽形的原子力显微镜测试结果以及 G1 光栅的实测衍射效率分别如图 8(b) 和图 8(d) 所示。G1 光栅的原子力显微镜测试和实

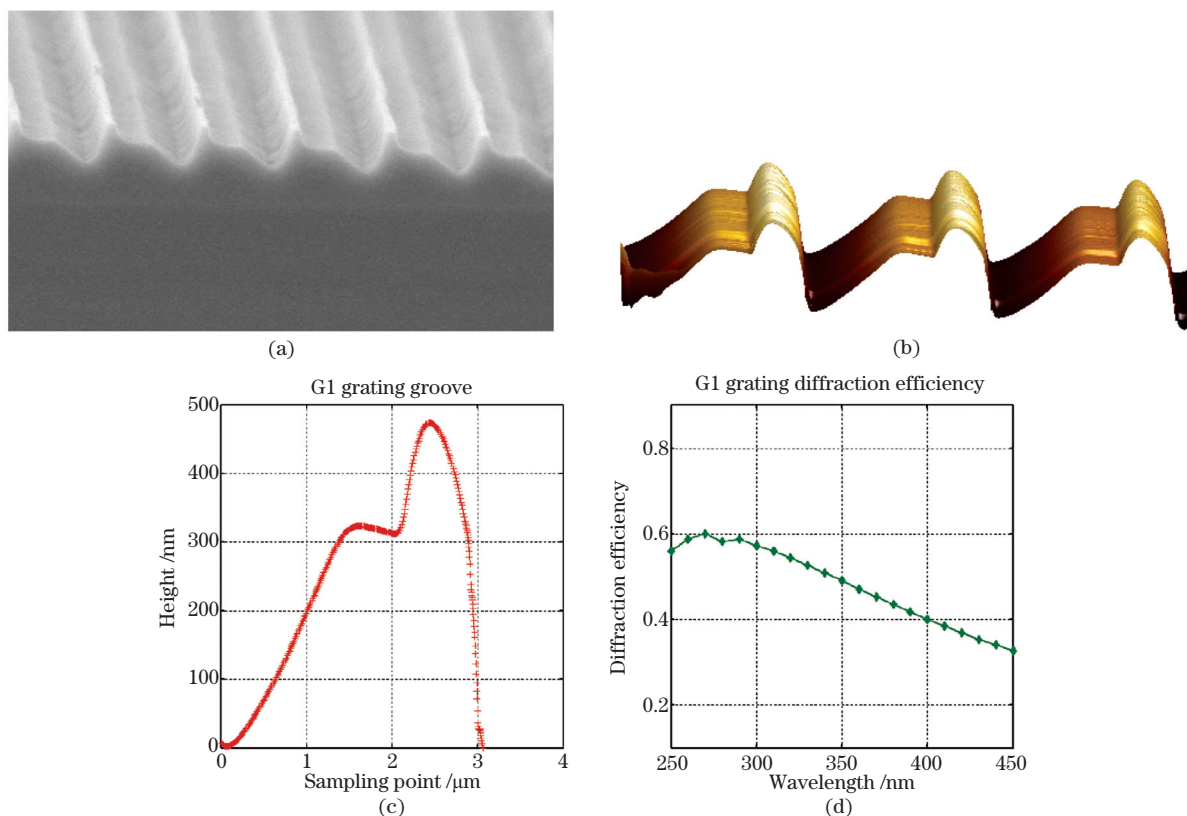


图 8 旧工艺制作的光栅的测试结果。(a) 实验同期制作的另一实验片的扫描电镜测试结果; (b) G1 光栅槽形的原子力显微镜测试结果; (c) 实测 G1 光栅槽形一个周期内各取样点的高度; (d) 实测 G1 光栅的衍射效率

Fig. 8 Test results of gratings fabricated by old process. (a) Scanning electron microscopy (SEM) image of another experimental grating fabricated by old process; (b) atomic force microscopy (AFM) tested groove of G1 grating; (c) measured height of each sampling point in one period of G1 grating; (d) measured diffraction efficiency of G1 grating

验片的扫描电镜结果均表明光栅在闪耀面出现了明显的平台,旧制作工艺得到的光栅易出现沉积物,导致槽形恶化。

采用全息离子束刻蚀技术制作基底是熔融石英的闪耀光栅时,先采用离子束垂直刻蚀工艺将图形转移至基底上形成同质掩模,再采用离子束倾斜刻蚀石英同质掩模,获得闪耀光栅槽形;然后利用光栅掩模对倾斜离子束的遮挡作用,使槽底不同部位受到不同通量的离子束轰击,从而获得非对称的槽形结构。离子束倾斜刻蚀时,光栅掩模对倾斜离子束遮挡的阴影区域易形成沉积物。应用中的紫外光栅的闪耀角较小,因此长时间大角度的离子束倾斜刻蚀使得沉积更加明显。因此,旧的制作工艺容易出现平台。带有平台的光栅达不到衍射效率指标要求,因此需要改进制作工艺。巡天相机中的光栅需要具有高的衍射效率,因此光栅的槽形需要进行精确控制。改进的光栅制作工艺可使制备的闪耀光栅

具有设计的槽形形状,即不出现平台且角度可以精确控制。

陈智文等<sup>[20]</sup>采用飞行时间二次离子质谱(TOF SIMS)技术分析了样品表面的沉积物,结果表明,沉积物主要是碳氟有机物。借鉴文献[19]引入 $O_2$ 反应离子刻蚀对光刻胶光栅进行灰化处理的思想,本研究团队在制作工艺最后一步离子束倾斜刻蚀石英同质掩模时,采用 $CHF_3$ 和 $O_2$ 的混合气体作为工作气体;实验结果表明,工作气体中增加 $O_2$ 不仅不影响熔融石英基底的刻蚀,还可以去除沉积的影响。改进制作工艺后,由于离子束倾斜刻蚀过程中不存在沉积物的影响,因此可以建立闪耀角与离子束入射角、同质掩模侧壁倾角以及同质掩模顶部和闪耀面刻蚀速度之间的理论关系。在改进的制作工艺下,不同倾斜角度的离子束刻蚀决定的光栅闪耀角更符合理论公式。这样,新的制作工艺就可以精确控制光栅槽形。新制作的光栅 G2 的测试结果如图 9 所示。

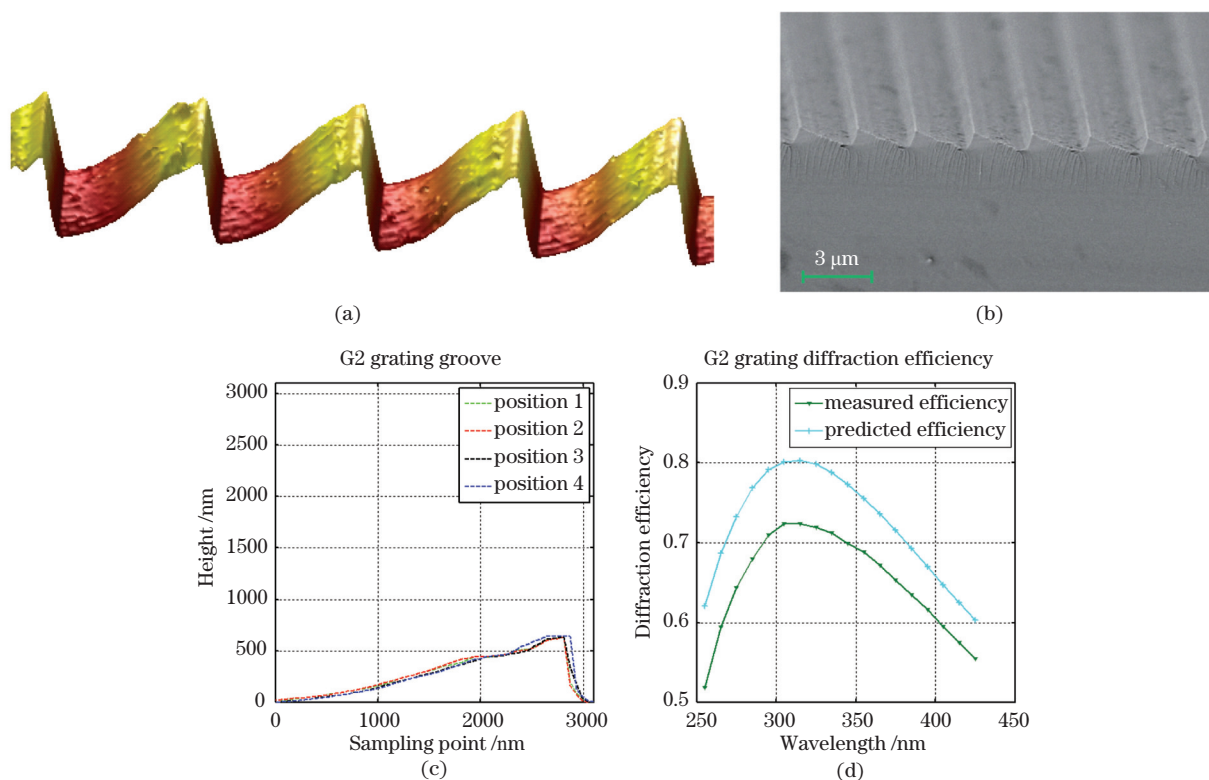


图 9 G2 光栅的测试结果。(a)槽形的原子力显微镜测试结果;(b)槽形的扫描电镜图片;  
(c)实测槽形一个周期内各取样点的高度;(d)实测和预测衍射效率

Fig. 9 Test results of G2 grating. (a) AFM image of groove; (b) SEM image of groove;  
(c) measured height of each sampling point in one period; (d) measured and predicted diffraction efficiencies

考虑到原子力显微镜的测量误差,例如原子力探针的测试偏差等因素,可以认为光栅 G2 在 4 个不同测量点处的实测槽形一致,槽形具有较好的均匀性。

测试光栅均未镀增透膜。从光栅衍射效率的测试结果可以看出,光栅的实测衍射效率是受到光栅理论衍射效率以及光栅基片反射损失等因素综合影响后的结果。对于应用中的光栅,最关心的是实测



衍射效率。图 9(d)展示了考虑基片反射损失时光栅预测衍射效率与实测衍射效率的比较。熔融石英在紫外波段的透射率约为 0.93。图 9(d)中光栅预测衍射效率是根据实测光栅槽形仿真得到的衍射效率与透射率相乘得到的结果。图 9 表明,光栅 G2 具有较好的槽形形状,实测峰值衍射效率为 72.3%,紫外波段内的平均衍射效率为 65.1%,光栅峰值衍射效率波长为 315 nm,该光栅的实测峰值衍射效率达到了理论值的 88%。

光栅 G2 槽形的实测数据分析表明,槽深  $H = 0.2118d$ ,顶角投影在每个周期下的比值  $\tau = 0.9544$ 。对应图 6 来看,该组参数下的峰值波长位置与实际测得的峰值衍射效率对应的波长位置一致。从第二种光栅槽形形状表征参数来看,左底角  $\alpha = 12.51^\circ$ ,右底角  $\beta = 77.84^\circ$ 。光栅制作样片槽形和衍射效率的测试结果表明,该光栅可以满足无缝光谱光栅的指标要求。

### 3.2 光栅衍射波前

光栅的衍射波前质量是决定巡天相机无缝光谱质量和分辨本领的重要因素。光栅的衍射波前质量是光栅基片误差和光栅刻线均匀性等信息的全面反映<sup>[24]</sup>。

采用干涉仪测试 G1 光栅的衍射波前,测试结果显示,在波长 632.8 nm 处,+1 级透射波前均方根(RMS)为  $0.37\lambda$ ,PV 值为  $1.53\lambda$ ,光栅波前质量不佳。

G2 光栅的波前质量有明显提升,其+1 级透射波前 RMS 达到  $0.06\lambda$ ,PV 值达到  $0.33\lambda$ ,如图 10 所示。上述实验测试结果表明,G2 光栅具有较好的波前质量,满足无缝光谱光栅波前质量 PV 值小于  $0.5\lambda$  的指标要求。

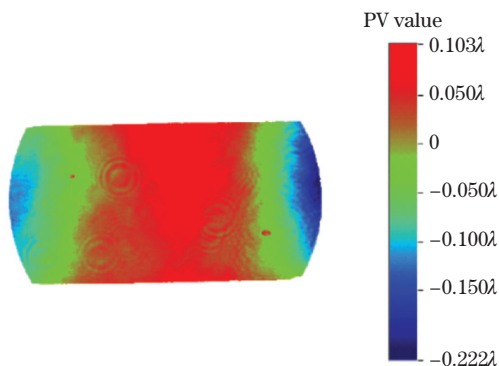


图 10 波前测试结果

Fig.10 Wavefront test result

### 3.3 巡天相机光栅的成像质量

本小节探讨巡天相机光栅的像质。巡天相机光

栅工作在空间巡天望远镜的焦平面附近。本研究团队在实验室成功装调了大口径平行光管,该平行光管用来模拟空间巡天望远镜光路的工作状态,以实现光栅的像质测试。该平行光管是离轴三反结构,系统中心无遮拦,入瞳直径为 350 mm,焦比为 14,最大视场为  $3^\circ$ 。

技术指标对巡天相机光栅像质的要求为:在前端望远镜系统提供的像质条件(80%能量集中度半径为  $0.15''$ )下,无缝光谱像质优于  $0.3''$ ,最大值优于  $0.4''$ 。

实验室使用大口径平行光管模拟前端望远镜光路的工作状态,将 G2 光栅放置于平行光管焦平面附近测试光栅的像质。采用波长为 632.81 nm 的 He-Ne 激光器作为入射光源,入射光经过  $20\ \mu\text{m}$  的针孔后在平行光管焦平面位置入射平行光管,在平行光管焦平面共轭位置放置探测器,用于获取未插入光栅时的光点;然后将光栅放置在探测器前的适当位置,获取插入光栅后工作级次的图像,这样就可以得到插入光栅后系统引入的像差,从而得到光栅像质。探测器的像元尺寸为  $16\ \mu\text{m}$ ,分别计算插入光栅前后探测器上光斑 80%的能量集中度半径。在未插入光栅时,光斑 80%能量集中度半径为 0.630 pixel,直径为  $20.16\ \mu\text{m}$ ;插入光栅后,+1 级光斑 80%能量集中度半径为 0.655 pixel,直径为  $20.99\ \mu\text{m}$ 。可以得到插入光栅后引入的误差为  $\sqrt{20.99^2 - 20.16^2} = 5.84\ \mu\text{m}$ ,测试系统的入瞳直径为 350 mm,焦比为 14,即插入光栅后引入的误差为  $0.2459''$ 。此时,对应到该光栅工作在空间巡天望远镜光路状态下的情形,当前端望远镜系统提供的光束像质条件为  $0.15''$  的 80%能量集中度半径时,该光栅对应的输出光束的 80%能量集中度半径为  $\sqrt{0.15^2 + 0.2459^2} = 0.29$ , $0.29'' < 0.3''$ ,满足巡天相机对光栅像质的要求。

## 4 结 论

本文论述了我国载人航天工程空间巡天望远镜所需紫外光栅的研制情况,综合分析了紫外光栅的科学应用性能、使用条件及衍射光栅制作参数,比较全面地评估了不同入射角、入射光偏振态以及光栅槽形结构参数下的衍射效率。通过数值仿真发现了紫外光栅峰值波长与顶角投影在每个周期上的比值之间的近似线性表达关系,给出了光栅制作参数的许可域,用于指导光栅制作参数的控制。经过多轮

试制,制作的光栅实现了光栅槽形的精确控制,新制作的衍射光栅具有较好的槽形,刻线密度为 333 line/mm,闪耀角为  $12.51^\circ$ ,峰值效率波长为 315 nm,紫外波段实测峰值衍射效率为 72.3%,平均衍射效率为 65.1%。波前质量+1 级透射波前 RMS 为  $0.06\lambda$ ,PV 值为  $0.33\lambda$ 。经验证,该光栅成像质量优异,可以满足巡天相机光栅的指标要求;同时,对现有光栅制作工艺进行了改进,实现了光栅槽形的精确控制,提升了光栅的制备水平。

## 参 考 文 献

- [1] Zhan H. Consideration for a large-scale multi-color imaging and slitless spectroscopy survey on the Chinese space station and its application in dark energy research[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2011, 41(12): 1441-1447.  
詹虎. 中国空间站大规模多色测光与无缝光谱巡天的设想及其在暗能量研究领域的应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(12): 1441-1447.
- [2] Kuntschner H, Kummel M, Walsh J R, et al. HST/WFC3 in-orbit grism performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7731: 77373A.
- [3] Kuntschner H, Bushouse H, Kummel M, et al. The ground calibrations of the WFC<sub>3</sub>/UVIS G280 grism [R/OL]. (2009-01-01)[2021-06-25]. [https://www.researchgate.net/profile/H-Kuntschner/publication/241459676\\_The\\_ground\\_calibrations\\_of\\_the\\_WFC3UVIS\\_G280\\_grism/links/00b4952dec84316a7000000/The-ground-calibrations-of-the-WFC3-UVIS-G280-grism.pdf](https://www.researchgate.net/profile/H-Kuntschner/publication/241459676_The_ground_calibrations_of_the_WFC3UVIS_G280_grism/links/00b4952dec84316a7000000/The-ground-calibrations-of-the-WFC3-UVIS-G280-grism.pdf).
- [4] Doyon R, Hutchings J B, Beaulieu M, et al. The JWST Fine Guidance Sensor (FGS) and Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8442: 84422R.
- [5] Zeng C B, Liu B, Xia Z D, et al. Optimal design of spectroscopic structure based on prism-grating combination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2105001.  
曾朝斌, 刘宾, 夏正德, 等. 棱镜-光栅组合分光结构参数的优化方法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2105001.
- [6] Thorlabs. UV transmission gratings [EB/OL]. [2021-05-02]. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1122](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1122).
- [7] Xu X D, Hong Y L, Fu S J, et al. Holographic ion beam etched diffraction gratings[J]. *Physics*, 2004, 33(5): 340-344.  
徐向东, 洪义麟, 傅绍军, 等. 全息离子束刻蚀衍射光栅[J]. *物理*, 2004, 33(5): 340-344.
- [8] 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.
- [9] Wu N, Tan X, Yu H L, et al. Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1978-1983.  
吴娜, 谭鑫, 于海利, 等. 宽波段全息-离子束刻蚀光栅的设计及工艺[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1978-1983.
- [10] Aoyagi Y, Namba S. Blazing of holographic grating by ion etching technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1976, 15(4): 721-722.
- [11] Liu Q, Wu J H, Chen M H. Fabrication of blazed grating by native substrate grating mask[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091706.
- [12] Gong C Y, Fan J, Zou Y G, et al. Fabrication of holographic lithography micro-nano gratings using metal mask[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1203001.  
龚春阳, 范杰, 邹永刚, 等. 基于金属掩模的全息光刻微纳光栅制备工艺[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1203001.
- [13] Tan X, Li W H, Bayanheshig, et al. Fabrication of ultraviolet holographic blazed grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1536-1542.  
谭鑫, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 紫外全息闪耀光栅的制作[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1536-1542.
- [14] Li W H, Bayanheshig, Qi X D, et al. Fabrication of blazed gratings used in ultraviolet region by holographic ion beam etching based on photoresist melting[J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, 4(3): 177-179.
- [15] Steiner R, Pesch A, Erdmann L H, et al. Fabrication of low straylight holographic gratings for space applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8870: 88700H.
- [16] Liu Z W. Study on wavefront control of grating diffraction on scanning beam interference lithography system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2017: 57-60.  
刘兆武. 扫描干涉场曝光系统中光栅衍射波前控制方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 57-60.
- [17] Dong S W, Qiu K Q, Fu S J. Fabrication of echelette gratings by reactive ion beam etching of native

- substrate grating mask[J]. *Vacuum*, 2016, 53(6): 54-58.
- 董圣为, 邱克强, 付绍军. 反应离子束刻蚀石英同质掩模制作小阶梯光栅[J]. *真空*, 2016, 53(6): 54-58.
- [18] Wang D L, Zhang D W, Xu B L, et al. Research progress in design and fabrication of convex grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1100002.
- 王丁陆, 张大伟, 徐邦联, 等. 凸面光栅的设计与制作研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1100002.
- [19] Xu X D, Hong Y L, Fu S J. Application of photoresist-ashing to diffraction grating fabrication by holographic ion beam etching[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, 23(5): 69-71, 79.
- 徐向东, 洪义麟, 傅绍军. 光刻胶灰化用于全息离子束刻蚀光栅制作[J]. *真空科学与技术*, 2003, 23(5): 69-71, 79.
- [20] Chen Z W, Wang Y N, Cai M Q, et al. Fabrication of ultraviolet transmission blazed grating for slitless spectrometer[J/OL]. *Acta Astronomica Sinica*: 1-8 [2021-04-15]. <https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2021.05.006>.
- 陈智文, 王雅楠, 蔡茂琦, 等. 无缝光谱仪用紫外透射闪耀光栅的制作[J/OL]. *天文学报*: 1-8 [2021-04-15]. <https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2021.05.006>.
- [21] Ma D H, Zeng L J. Fabrication of low-stray-light gratings by broad-beam scanning exposure in the direction perpendicular to the grating grooves[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1346-1349.
- [22] Wang W, Bayanheshig, Song Y, et al. Beam alignment and convergence analysis of scanning beam interference lithography systems[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1205001.
- 王玮, 巴音贺希格, 宋莹, 等. 扫描干涉曝光光束自动对准及其收敛性分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1205001.
- [23] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Two-dimensional grating fabrication based on ultra-precision laser direct writing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0905001.
- 李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0905001.
- [24] Wu X P, Wei H K, Liu Z K, et al. Long trace profiler for measuring groove density of diffraction gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0612002.
- 吴新朴, 韦怀坤, 刘正坤, 等. 用于检测光栅线密度的长程面形仪系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0612002.

## Development of Scientific Ultraviolet Grating for Spectrum Survey

Chen Lisi<sup>1,2,3\*</sup>, Hu Zhongwen<sup>1,2</sup>, Qiu Keqiang<sup>4</sup>, Jiang Haijiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup> University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

### Abstract

**Objective** Chinese Space Survey Telescope obtains large field of view, wideband slitless spectrum by adopting near focal plane mosaic gratings instead of by switching gratings which are used by other space projects. The spectral resolution is greater than 200, with spectral coverage ranging from 250 to 1000 nm. Gratings with high diffraction efficiency and good spectrum imaging performance are critical for scientific performance. Domestic ultraviolet transmission diffraction gratings are rarely used in astronomy. To meet the scientific requirements in the U-band, holographic ion beam etching is used to create ultraviolet gratings with wavelengths ranging from 250 to 425 nm. The gratings' various performances are evaluated.

**Methods** Grating groove parameters are designed by taking into account both first-order diffraction efficiency, suitable zeroth-order diffraction efficiency, and peak efficiency wavelength. Grating fabrication parameters and groove profile are optimised using numerical simulation programmes while scientific performance is taken into account. Diffraction efficiency uniformity is achieved across a wide range of incident angles caused by non-telecentric

optics and polarised light from various scientific objects. Sensitivity parameters are integrated into acceptable parameter domains to guide the fabrication of ultraviolet gratings. The groove parameters can be well controlled after a few iterations, and ultraviolet gratings are successfully developed. Two metrics are compared based on two groups of grating groove characteristic parameters, groove depth and the ratio of top angle projection, and the left and right bottom angles. The first metric is found to be suitable for describing peak diffraction efficiency and peak wavelength position, while the second metric is found to be suitable for describing average diffraction efficiency. Diffraction efficiency has a peak wavelength position that is roughly linear to the first metric.

**Results and Discussions** The grating performance of ultraviolet wavelength has been greatly improved after years of effort. After several experiments, the grating groove parameters and shape are precisely controlled, yielding a diffraction grating with a groove density of 333 line/mm, blaze angle of  $12.51^\circ$ , and peak efficiency wavelength of 315 nm. The grating performs admirably. Peak diffraction efficiency is 72.3%, with an average efficiency of 65.1%. Peak wavelength position can also be controlled. The groove shape and diffraction wavefront of the grating are controlled at a high level, and the diffraction wavefront RMS reaches  $0.06 \lambda$  and PV value reaches  $0.33 \lambda$ . The application of the grating can obtain good spectrum imaging performance.

**Conclusions** The performance of astronomical ultraviolet gratings is optimised in groove parameters to achieve the best average efficiency under a variable incident angle and controlled polarisation sensitivity operating conditions. After a few turns of fabrication and evaluation, good grating performance is achieved. This will be a contribution to the application of sky spectrum surveys.

**Key words** grating; spectrum survey; diffraction efficiency; diffraction wavefront; image quality