

激光与光电子学进展

凸面光栅的设计与制作研究进展

王丁陆¹, 张大伟¹, 徐邦联^{1*}, 黄元申^{1,2}, 李柏承¹, 沈宇航¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

²上海光学仪器研究所, 上海 200093

摘要 凸面光栅是 Offner 结构成像光谱仪的核心分光元件, 制备出高衍射效率、高分辨率的凸面光栅是提高光谱仪成像质量, 实现遥感探测的关键。介绍了目前凸面光栅的研究现状, 讨论了设计与制作凸面闪耀光栅的主要方法。凸面光栅的设计方法采用严格耦合波理论对光栅进行衍射效率分析, 制作方法主要包括: 电子束直写法、X 射线光刻法、机械刻划法以及全息离子束刻蚀法。鉴于全息离子束刻蚀法具有成本低、槽型可控、无鬼线等优点, 详细介绍了利用该方法制备凸面光栅的工艺及相关研究报道。在接下来的工作中将不断优化和提高全息曝光光强分布的均匀性, 改进摆动刻蚀装置旋转轴的可调性, 优化离子束刻蚀工艺参数, 以期制作出实用化的凸面闪耀光栅。

关键词 光学设计; 凸面光栅; 全息离子束刻蚀法; Offner 成像光谱仪

中图分类号 TH744.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1100002

Research Progress in Design and Fabrication of Convex Grating

Wang Dinglu¹, Zhang Dawei¹, Xu Banglian^{1*}, Huang Yuanshen^{1,2},
Li Baicheng¹, Shen Yuhang¹

¹School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Institute of Optical Instruments, Shanghai, 200093, China

Abstract Convex grating is the core of Offner structure imaging spectrometers. To improve the imaging quality of a spectrometer and realize remote sensing detection, it is key to use convex grating with high diffraction efficiency and high resolution. The diffraction efficiency of convex gratings is analysed by strictly coupled wave theory. In this study, we present the research status of convex grating and discuss the main methods for designing and manufacturing convex blazed grating, including electron beam direct writing, X-ray lithography, mechanical etching, and holographic ion beam etching. Owing to the advantages of holographic ion beam etching, such as low cost, controllable groove type, and ghost-free, we introduce in detail the fabrication of convex grating via holographic ion beam etching and present related studies. Based on the investigation and analysis, we aim to optimize and improve the uniformity of the light intensity distribution of holographic exposure, the adjustable rotation axis of swing-etching device, and the process parameters of ion beam etching to produce a practical convex-blazed grating.

Key words optical devices; convex grating; holographic ion beam etching; Offner imaging spectrometer

OCIS codes 220.4610; 220.4000; 220.3740; 230.1950

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-10-22; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101904)、国家自然科学基金天文联合基金(U1831133)

*E-mail: xbl19880609@163.com

1 引言

在现代光谱分析仪器中,衍射光栅是核心的分光元件。它的周期性结构,会引起空间振幅或者相位变化,能够将不同波长的入射光衍射到不同的方向上,具有分光作用,已广泛地应用于各种科学领域与实际应用中^[1-3]。20世纪80年代,在遥感探测领域中,在光谱遥感成像技术的基础上发展出了可广泛应用于地质勘测、环境监测、灾害预警、航空航天和军事等领域的成像光谱仪^[4-7]。成像光谱仪因其具有目标图像的空间信息与光谱信息可同时获取的特点受到了广泛的关注。目前,发展具有高光谱分辨能力的成像光谱仪成为发展趋势。

成像光谱仪的光学系统一般可分为前置光学系统与分光系统两部分。分光系统是成像光谱仪的关键部分,使用凸面光栅作为分光元件的 Offner 结构分光系统,由于其具有成像质量高、结构紧凑、谱线弯曲小等优点受到了广泛的关注与研究,同时使得凸面光栅结构的成像光谱仪逐渐成为了实现高光谱分辨能力的成像光谱仪的有效途径。同心光学系统是许多具有同一个球心的折射与反射球面组成的光学系统。1975年基于同心光学系统,Offner^[8]首次提出了同心三反射镜成像系统。1977年 Thevenon 将同心三反射镜系统中凸面镜换成凸面衍射光栅,提出了制作凸面光栅成像光谱仪的思想^[9]。1987年 Kwo 等^[10]首次提出由一个大凹球面镜和一个同心凸面光栅组成的 Offner 结构的凸面光栅成像光谱仪系统,该系统结构简单,可以消除第三级像差但还存在彗差的影响。1999年 Chrisp 等^[11]将 Offner 结构的大凹面镜替换成两个小凹面镜,这个改进显著提高了光谱仪的成像质量,实现了光谱仪系统的轻量化、小型化。长期以来,由于制备凸面光栅具有很大难度,极大地限制了凸面光栅成像光谱仪的发展。伴随着全息离子束刻蚀法等凸面光栅制备工艺的日益成熟,国内外对凸面光栅光谱仪的研究也越来越多,这使其在不同领域得到了广泛的应用。在国外,1995年意大利佛罗伦萨的伽利略航空电子公司^[12],研制了世界上第一台凸面光栅超光谱成像系统(VIMS),用于 Cassini 号土星探测器。1996年欧空局(ESA)^[13]利用 Offner 光栅光谱仪研制了可见红外热成像光谱仪,随后将其应用于 ESA 的 Rosetta 航天器。2020年俄罗斯 Kazanskiy 等^[14]提出了一种应用于小型航天器上的 Offner 成像光谱仪的结构,该

结构可通过移动位于光谱仪内部的两个同轴光学组件来调整自适应温度,使光谱仪可以在 $-40\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下运行,使其适用于平流层飞行器的工作。

在国内,2007年,上海理工大学黄元申等^[15]分析了凸面光栅同心光谱仪系统的傅里叶成像特性,提出了一种简单的 Offner 成像光谱仪设计方法^[16],该方法运用一个初等代数函数公式就可以在短时间内设计出一套高成像质量的分光系统。2014年,韩姗等^[17]利用光程函数得到 Offner 成像光谱仪的初始结构,并通过 Codev 对其优化,省去像差推导的同时,在宽光谱 $400\sim 1300\text{ nm}$ 范围内获得了具有高成像质量的 Offner 成像光谱仪结构。2008年与2011年,苏州大学季轶群等^[18-19]分别优化设计了适用于短波红外波段($1.0\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$)和可见波段($0.4\sim 0.78\text{ }\mu\text{m}$)的 Offner 成像光谱仪系统。2019年南京航空航天大学郑志忠等^[20]基于 Offner 成像光谱仪的结构设计思想,提出了光机一体化的设计方案,设计出一套小型化的短波红外成像光谱仪,通过对该成像光谱仪的结构模态、静载响应及热致响应分析,利用广义逆矩阵方法对响应分析结果进行处理,验证了该方案的合理性。2020年苏州大学杨福臻等^[21]分析了小行星空间探测任务对光谱成像仪的应用需求,并基于共光路结构的宽波段设计出一种用于小行星探测的宽波段可见-红外 Offner 型光谱成像光学系统,系统性能较好。

成像光谱仪信噪比的高低和成像光谱仪是否可以应用于遥感探测的关键在于凸面光栅在其使用波段范围内衍射效率的高低。凸面光栅作为 Offner 成像光谱仪的核心分光元件,研究与改进凸面光栅的制备方法,制备具有高衍射效率的凸面光栅是研发新一代成像光谱仪的必然要求。自1977年凸面光栅成像光谱仪概念的提出以来,国外研究人员开始密切关注凸面光栅的研制。目前,欧美国家在凸面光栅设计与制备工艺方面已经非常成熟。1998年美国海军采用全息离子束刻蚀工艺制备出 155 lp/mm 、闪耀角约为 5° 的凸面闪耀光栅,在可见到近红外波段内可获得大于 50% 的衍射效率,并用其研制了用于海洋环境监测的凸面光栅光谱仪^[22]。同年,美国科学家 Mouroulis 等^[23]采用电子束直写法制备了闪耀角小于 2° 的凸面闪耀光栅,并将其应用于凸面同轴成像光谱仪,在 $400\sim 1000\text{ nm}$ 内使用光栅的二级衍射光,相对衍射效率最高可达 85% ,在 $1000\sim 2500\text{ nm}$ 内使用光栅的一级衍射光,相对效

率最高可达 88%。商品化的全息离子束刻蚀光栅主要集中在欧美日等国家,如法国的 Jobin-Yvon 公司、美国的 Richardson Grating Laboratory 和 Spectrogon 公司、日本的 Hitachi 公司、德国的 Carl Zeiss 公司等,他们可以制作多种类型的机械刻划光栅和全息离子束刻蚀光栅。与国外相比,国内商品化的全息离子束刻蚀光栅较少,相关的研究起步较晚,设计与研制凸面光栅的机构并不多,近年来中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、上海理工大学、苏州大学等单位均有凸面光栅制备的相关报道。中国科学技术大学国家同步辐射实验室的光学元件组,对同步辐射软 X 射线和真空紫外波段的聚焦、色散光学元件较早地开展了研究。2020 年郑志忠等^[24]利用机械刻划法制备出应用于遥感探测领域的凸面闪耀光栅,其闪耀角为 2.773°,在 1600 nm 处,衍射效率高达 81.6%,并将基于该光栅的短波红外成像光谱仪与机载平台结合,由飞行器获得清晰高质量的图像。

2 凸面光栅的设计

应用于成像光谱仪的凸面光栅主要分为正弦型光栅、矩形光栅和闪耀型光栅。虽然矩形槽光栅的制备工艺已经比较成熟,但是闪耀型光栅在使用波长范围内可以获得更高的衍射效率,这是用于遥感的凸面光栅成像光谱仪的基本要求。凸面光栅的槽型及其参数是影响衍射效率的最重要因素,要获得更高的衍射效率,需要对凸面光栅的槽型进行研究与优化。

光栅衍射效率的分析一般采用标量衍射理论和矢量衍射理论,严格耦合波理论^[25]作为一种矢量衍射理论,已广泛应用于光栅衍射效率的分析。2010 年汪海宾^[26]利用严格耦合波理论,对光栅的衍射效率进行了深入地研究。图 1 表示一平面波以入

射角 θ 入射一周期为 Λ ,槽深为 D 的表面浮雕光栅,入射平面与 xz 平面的夹角为 Φ ,电位移矢量与入射面的夹角为 ψ 。区域 I(折射率 n_1)和区域 III(折射率 n_2)分别为入射区和反射区,区域 II 为光栅区,包含了光栅脊(折射率 n_1)和光栅槽(折射率 n_2)两种介质的周期分布,把它分为 N 层,第 n 层厚度为 dn 。

一般情况下,入射光束是以某种特殊的偏振态入射到光栅中。当入射光束电场分量垂直入射平面时,入射光束为 TE 模,当磁场矢量垂直入射平面时,入射光束为 TM 模。当入射光束是 TE 模时,所有区域中电场只有 y 方向不为 0,磁场只有 x, z 方向不为零,其他电磁场分量都将为零。 R_i 和 T_i 分别表示归一化的电场第 i 级反射衍射波和透射衍射波的振幅, λ_0 是真空波长, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 。通过求解与整理麦克斯韦方程,得到光栅区各级的反射及透射效率为

$$\begin{cases} dE_{ri} = |R_i|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{k_{l,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta}\right) \\ dE_{ti} = |T_i|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{k_{l,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\text{其中, } k_{l,zi} = \begin{cases} +[(k_0 n_i)^2 - k_{xi}^2]^{1/2}, & k_{xi}^2 < (k_0 n_i)^2 \\ -j[k_{xi}^2 - (k_0 n_i)^2]^{1/2}, & k_{xi}^2 > (k_0 n_i)^2 \end{cases}, \quad l =$$

I, III, $k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta - i(\lambda_0/\Lambda)]$ 。当入射光束是 TM 模时,磁场矢量垂直于入射平面。各级衍射效率的求解方法与入射光束是 TE 模的情况相同,其各级反射及透射效率为

$$\begin{cases} dE_{ri} = |R_i|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{k_{l,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta}\right) \\ dE_{ti} = |T_i|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{k_{l,zi}}{n_2^2}\right) / \left(\frac{k_0 \cos \theta}{n_1}\right) \end{cases} \quad (2)$$

根据严格耦合波理论,计算凸面光栅的衍射效率,得出衍射效率曲线;分析槽型参数与衍射效率之间的关系,从而对所需要的凸面光栅的槽型进行设计。2009 年 Liu 等^[27]针对矩形和闪耀型的凸面光栅参数,利用严格的耦合波理论分别研究了矩形光栅中的槽深与闪耀光栅中的闪耀角对凸面光栅一级衍射效率的影响。对于矩形光栅,当槽深在 120~170 nm 范围内时,在可见光波长下的一级衍射效率在 20% 以上,峰值可达到 40%;对于闪耀光栅,当闪耀角在 3°~4° 范围内时,在可见光波长下的一级衍射效率在 36% 以上,峰值可达到 78%。2020 年

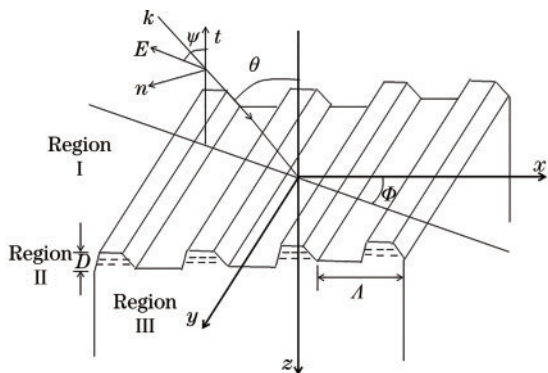


图 1 光束入射表面浮雕光栅结构图

Fig. 1 Structure of relief grating on beam incident surface

南京航空航天大学郑志忠等^[24]利用严格耦合波理论对矩形浮雕结构的光栅与三角形槽型的光栅进行衍射效率分析,计算出凸面闪耀光栅+1级的衍射效率曲线,选择衍射效率较高的三角形槽作为光栅表面结构,并非利用机械刻划法进行加工,制作出闪耀角为 2.773° ,在波长 1600 nm 处衍射效率高达 81.6% 的凸面闪耀光栅。

3 凸面光栅的制备

目前,凸面光栅的制备方法主要有以下几种:机械刻划法、X射线光刻法、电子束直写法以及全息离子束刻蚀法。全息离子束刻蚀法是目前研究最成熟、使用最广泛的凸面光栅制备方法,具有成本低、槽型可控、无鬼线等优点。

3.1 电子束直写法与 X 射线光刻法

电子束直写法与 X 射线光刻法均可以制备出具有高衍射效率的凸面光栅,且对光栅槽型的控制能力很强。电子束曝光是利用某些高分子聚合物对电子敏感来形成曝光图案。X 射线作为电磁波谱中最短的波长段,是光学曝光技术的自然继承者。目前,能够使用电子束直写法与 X 射线光刻法制备凸面光栅的研究很少,一些欧美日国家可以用该方法进行制备,但其电子束光刻系统等具体的工艺细节至今仍未公开。2003 年 Mouroulis 等^[28]采用电子束直写法制备出闪耀角小于 2° 的凸面闪耀光栅,在 $400\sim 1000\text{ nm}$ 内光栅的二级衍射光相对衍射效率最高可达 85% ,在 $1000\sim 2500\text{ nm}$ 内光栅的一级衍射光相对衍射效率最高可达 88% 。2003 年美国喷气推进实验室(JPL)^[28-29]分别报道了利用电子束直写法与 X 射线光刻法制备凸面光栅的方法,其制备的凸面光栅的衍射效率分别可以达到 90% 与 88% 。2005 年 Johnson 等^[30]通过电子束直写技术在凸球面基底上制作了一个反射式二维计算全息光栅,这是第一次利用电子束直写技术在凸面基底上制作的二维全息图。2018 年 Ai 等^[31]提出了一种新型激光直写系统,可以在不同曲率半径的基底上实现最大高度为 7.38 nm 的微加工,且均匀性偏差小于 10% ,并在曲率半径为 32.77 mm 、直径为 50 mm 的凸 K9 玻璃基板上,制备出线宽为 $13.00\text{ }\mu\text{m}$ 、线间距为 $25.80\text{ }\mu\text{m}$ 的光致抗蚀剂光栅。2020 年 Mattelin 等^[32]利用灰度电子束光刻制作出在波长 543 nm 处衍射效率超过 50% 的衍射光栅母版,并利用紫外纳米压印技术将光栅复制到波导片上。

利用电子束直写法与 X 射线光刻法制备的凸面光栅衍射效率高,通常用于制作曲率半径较大或接近平面的凸面光栅,但是由于其直写的逐点加工方法加工效率低且对设备精度要求高,因此造成本高,需要专业和昂贵的软硬件设备,难以进行大面积制作,故其不能被广泛地应用。

3.2 机械刻划法

机械刻划法是一种适合生产原型凸面光栅的方法,使用带有合适角度的金刚石刻刀在镀金属膜的凸面基底上挤压或切削形成光栅刻槽。2012 年 Davies 等^[33]在三轴穆尔纳米 350 机床主轴上安装单晶金刚石,以闪耀角为 $0.1133^\circ\pm 0.0006^\circ$ 的精度切削加工凸面闪耀光栅。机床的 y 轴用于进行单次切削, x 轴用于定位切削下一条光栅线, z 轴用于设置下一个光栅线的深度。但是用该方法刻划加工的凸面闪耀光栅的闪耀角与要求的闪耀角精度有较大的差距。除此之外,还存在一些明显的缺陷,如光栅表面粗糙度与光栅的形状误差远大于预期结果。2017 年 Xu 等^[34]同样利用单晶金刚石在穆尔纳米 350 机床上加工凸面光栅。光栅基底的材料选择船用黄铜 C46400,与其他材料(铝、化学镍等)相比,船用黄铜 C46400 可以产生周期性的光栅结构,但不会带来严重的工具磨损风险。为了刻划出光栅槽型,需要利用车削技术对光栅进行加工。图 2(a)是用于球形和非球形光学元件的典型金刚石车削结构,当旋转轴与光轴同心时,刀具切削的路径会沿边缘到光轴中心,但是这样会产生螺旋形的刻槽,所以不适用于光栅的刻划。在现有的典型金刚石车削结构上进行改良,如图 2(b)所示,使光栅的光轴垂直于旋转轴,刀具的切削路径变为线性,并会随机床设定的螺距线性变化。再将圆头单晶金刚石刀具更换为锋利的凹槽单晶金刚石刀具,即可进行光栅槽的轮廓加工,如图 2(c)所示。该方法的优点在于可以加工没有旋转对称性的凸面光栅。

机械刻划法与其他方法相比,超精密加工与刻划更加耗时且光栅表面粗糙度较大,但其刻划的路径可以复制和编程,令其适用于光栅原型的生产^[35-36]。与全息离子束刻蚀法相比,二者在基底上产生槽型的机理不同。机械刻划法是通过金刚石刀具对镀金属膜的光栅基底进行挤压或切削产生刻槽。而全息离子束刻蚀法的槽型是将全息曝光显影后形成的光刻胶掩模通过离子束刻蚀转移到光栅基底上。同时,要想得到不同的光栅槽型,机

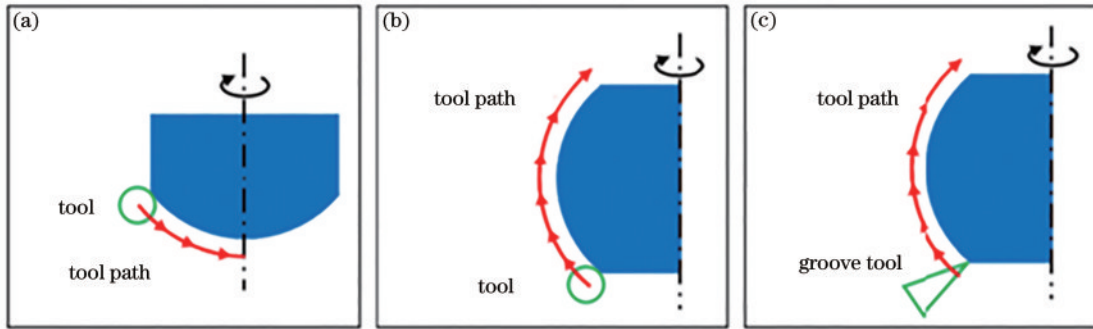


图2 金刚石车削结构。(a)典型的金刚石车削结构;(b)用于线性刻划的金刚石车削结构;(c)用于在弯曲的基底上车削直线沟槽的结构

Fig. 2 Diamond turning structure. (a) Typical diamond turning structure; (b) diamond turning structure for linear marking; (c) structure for cutting straight grooves on a curved substrate

械刻划法需要对刻划机和其刻划路径进行精密且复杂的调整,而全息离子束刻划法只要对离子束刻蚀的角度进行调整,即可实现对光栅槽型的控制。

3.3 全息离子束刻蚀法

伴随着激光技术的发展,利用两束相干光在光致抗蚀剂上的干涉来制备全息光栅的方法应运而生。之后,将离子束刻蚀技术与全息光刻技术结合,利用离子束刻蚀全息光刻胶掩模光栅,将掩模转移到光栅基底上制备闪耀光栅,进一步改善了全息光栅的性能。全息离子束刻蚀作为制造衍射光学元件中最常用的图形转移技术,具有良好的各向异性、低轮廓损伤、刻蚀参数可独立控制等优点。全息离子束刻蚀法也是目前研究最多、使用最广泛的凸面光栅制备法。相比传统的凸面光栅制备技术,全息离子束刻蚀法具有制作成本低、槽型可控、无鬼线、制作周期短等优点,其制备工艺非常成熟。

1976年Aoyagi等^[37]提出了利用 Ar^+ 离子倾斜入射刻蚀正弦型光栅掩模制作闪耀光栅的方法,利用全息技术制作光栅掩模,再通过离子束倾斜入射刻蚀光栅基底,使基底的不同位置先后被刻蚀,最后在基底上获得三角槽型。通过改变离子束的入射角度,可以将闪耀角控制在 $7^\circ\sim 26^\circ$ 之间。在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、苏州大学、上海理工大学等研究机构都有采用全息离子束刻蚀技术制备闪耀凸面光栅的相关报道。2010年黄元申等^[38]报道了一种制备凸面闪耀光栅的反应离子束刻蚀方法,采用分段刻蚀法,使刻蚀后的凸面闪耀光栅的闪耀角理论相对误差达 0.1% 。2009年至2019年间,刘全等利用严格的耦合波理论,分别研究了在不同波长范围内闪耀角大小对光

栅衍射效率的影响,并在所研究的波长范围内制备了高质量的凸面闪耀光栅。在 $0.4\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 波段,通过控制闪耀角大小,制作出一级衍射效率达到 35% 以上的凸面闪耀光栅;在 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段,制作出闪耀角为 3.9° 、一级衍射效率达到 40% 以上的凸面闪耀光栅^[39];在可见近红外波段,制作出闪耀角为 6.4° 、顶角为 141° 且一级衍射效率大于 40% 的凸面闪耀光栅^[40]。

利用全息离子束刻蚀法制备凸面光栅的工艺流程主要分为三步,如图3所示。

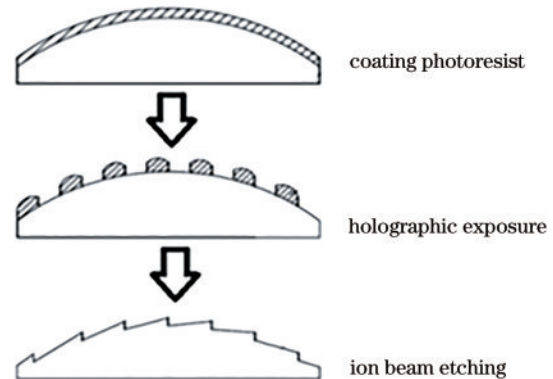


图3 凸面闪耀光栅制作流程图

Fig. 3 Production flow chart of convex blazed grating

1) 严格清洁凸面基底,并在凸面基底上涂覆适当厚度的光刻胶。光刻胶涂覆要保证涂覆的均匀性,涂覆方法有旋涂、喷涂、提拉等^[41],通常采用旋涂法。将光刻胶滴在基底中心并放置于甩胶工作台上,光栅基底在工作台上高速旋转,利用离心力将光刻胶均匀甩开,最后在基底凸表面形成光刻胶薄膜。

2) 设计全息曝光光路,并对旋涂光刻胶的基底进行全息曝光,对于凸面光栅,要用平面波进行干涉曝光,再将曝光完成的样品放入显影液中进行显影。

3) 对光栅基底上的光刻胶掩模进行离子束刻蚀,并将光刻胶掩模转移到基底上,形成所需要的永久的凸面光栅槽型。由于凸面光栅具有弯曲的几何形状,用传统的离子束刻蚀时离子束入射角会随基底的曲面改变,基底上某些部分不会被刻蚀,严重影响了凸面光栅的质量。目前常用的刻蚀凸面光栅的方法有分段刻蚀、摆动刻蚀等。

全息曝光显影和离子束刻蚀是制备凸面衍射光栅最关键的工艺步骤,下文将对制备凸面光栅工艺流程中的第 2 步、第 3 步进行详细介绍。

3.3.1 全息制备

在凸面光栅制备工艺中,全息曝光、显影是用于制备光刻胶光栅掩模的关键步骤^[42]。其基本原理是将激光器发出的相干光通过空间滤波器扩展成平面波,再经过分光镜分为两束相干光波并发生干涉,产生一系列明暗相间的周期性干涉条纹,在样品的记录层(光刻胶)记录下来,条纹间隔的距离由两束相干光的夹角与波长确定。全息光刻法已经被广泛地用于衍射光栅的制备与检测新型波长刻蚀技术的光致抗蚀^[43]。

2005 年,黄元申等^[44]介绍了一种全息凸面光栅光刻光路的设计方法。该方法的设计思想是结合同心三反射镜光学系统的特点与像差分析,在传统双光束曝光光路的基础上进行改进,令球面波在大光程的条件下近似为平面波,进行干涉,如图 4 所示。激光器出射的激光经过分束镜分为两束光,分别通过反射镜形成两束平行光,再通过物镜聚焦在空间滤波器上,进入大凹面反射镜与凸面光栅基底

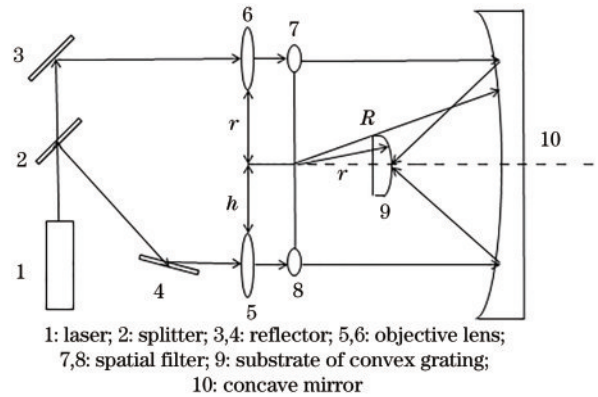


图 4 全息凸面光栅光刻光路

组成的同心三反射镜系统。两空间滤波器位于同心三反射镜光学系统的“无”像差环视场上。之后两束光经大凹面镜反射到凸面光栅基底上进行干涉。该方法的特点是在同心三反射镜光学系统的“无”像差环视场上进行光刻,根据凸面光栅的参数,确定大凹面镜结构参数,计算出“无”像差环视场位置,从而制备出高质量的凸面光栅。但是该方法使用大凹面镜进行反射,光波在大光程的条件下被近似地看作是平面波,但其本质还是球面波,这会对在凸面基底上进行全息曝光时的光强分布均匀性产生一些影响。

2018 年郭培亮^[45]介绍了一种用于制备凸面光栅全息掩模的双光束全息曝光光路。该方法是将传统的双光束全息曝光光路中的球面波直接通过准直透镜变成平面波进行干涉曝光。如图 5 所示,使用 Kr 离子激光器输出线偏振光,首先经过一个 1/2 波片,再经过偏振分束棱镜,出射两束互相垂直的线偏振光,已经分开的光束经过反射镜改变其光

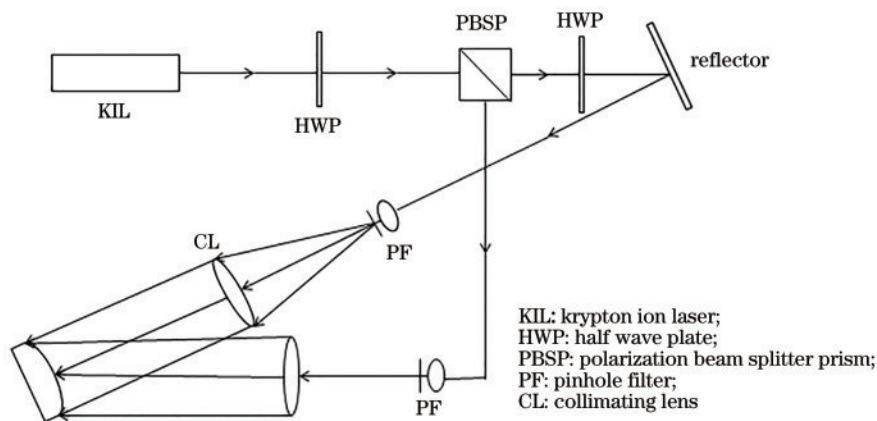


图 5 全息曝光光路

Fig. 5 Holographic exposure light path

路,经过针孔滤波器去除高频杂光,使扩束后的光斑均匀无杂光,最后经过扩束镜与准直透镜后,在涂覆了光刻胶的基底上产生明暗相间的干涉场。该曝光光路的特点是通过旋转调节第一个1/2波片的光轴,使两路光的光强相等,即可保证在涂有光刻胶的基片前表面上的干涉条纹具有高对比度。

2019年Burkhardt等^[46]利用经典的平面波对称全息曝光光路,制备了用于欧洲Sentinel 5任务中UV-1成像光谱仪的凸面光栅。使用的光路基本原理如图6所示,通过两个点光源出射的光经过两个凹面镜反射并准直,形成两束平行光,再将凸面光栅基底放置在两束平行光的干涉场内进行曝光。该方法的思想与2005年黄元申等^[44]介绍的全息凸面光栅光刻光路类似,其光路产生的平面波也是在光程很大的条件下被近似地看作是平面波,这同样会对全息曝光时凸面基底上光强分布的均匀性产生影响。

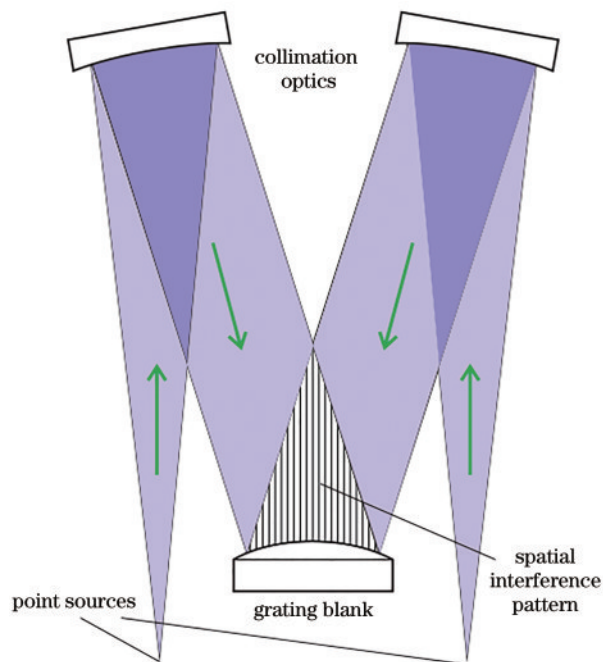


图6 对称全息曝光光路

Fig. 6 Symmetrical holographic exposure light path

经曝光后光栅基底上形成的光刻胶掩模对应的明条纹部分易溶于显影液中,暗条纹部分不易溶于显影液中。将经过曝光的光栅基底浸入适当浓度的显影液中,经过一段时刻的显影形成光刻胶光栅。1995年Mello等^[47]通过实验得出了光刻胶的曝光-显影特性曲线。对于正性光刻胶,显影速度与曝光量在线性区间内可得到正弦型的掩模,在非线性区间内可得到矩形掩模。显影时间还对光刻胶能

否露底非常重要,若显影时间过短,则光刻胶不能露底,若显影时间过长,会影响掩模的质量。解决这一问题可以采用显影实时监测光栅槽型并对其进行控制。其装置见图7,其基本原理是将光栅放入显影槽,显影时,掩模会随着显影时间变化,从而使掩模的衍射效率发生变化,通过观察衍射效率,在适当的时刻停止显影,可以得到所需要的掩模形状。最后对显影后的光刻胶光栅掩模进行一定时间的烘烤,除去基底上残余的显影液,使掩模硬化。

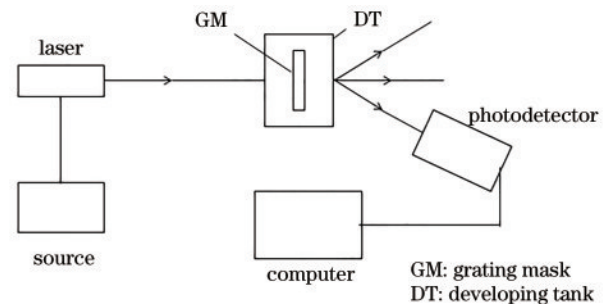


图7 显影监测装置

Fig. 7 Development monitoring device

3.3.2 离子束刻蚀

离子束刻蚀是利用离子源发出的带有能量的离子束定向移动溅射材料,从而刻蚀部分材料,是一种针对微纳结构的图形转移技术,具有良好的分辨率与各向异性。离子束刻蚀法中常用的方法主要有物理溅射的离子束刻蚀(IBE)、离子束轰击与化学反应相结合的反应离子束刻蚀(RIBE)和化学辅助离子束刻蚀(CAIBE)。IBE方法是利用稀有气体的离子束的物理溅射来刻蚀光栅,最终将掩模图样转移到基底上;RIBE方法是选择某种混合气体,利用气体离子束的化学反应产生的离子,使离子束轰击与化学反应结合刻蚀光栅,最终将掩模图样转移到基底上。

采用离子束刻蚀法对光刻胶掩模进行刻蚀时需要选择适当的离子束入射角度与工作参数,对形成光刻胶掩模的光栅基底进行刻蚀,经过一定时间的刻蚀,即可将光刻胶掩模的图案转移到光栅基底上,形成永久性的光栅槽型。在制备平面闪耀光栅时只需倾斜离子束刻蚀。但是对于凸面光栅来说,由于其表面弯曲的几何形状,只倾斜离子束刻蚀很容易造成凸面光栅的闪耀角大小不一致,即离子束入射角会随基底的曲面改变,甚至基底上某些部分不会被刻蚀,这对制备出的凸面光栅的衍射效率产生严重的影响。

2010 年上海理工大学黄元申等^[38]提出了一种分段刻蚀法。该方法的思路是将槽型是正弦型的凸面光栅掩模石英基底在子午方向分成若干个相等的区域,并进行分段离子束刻蚀,以此来减小几何形状对离子束刻蚀的影响。首先放置凸面光栅掩模至石英基底,如图 8(a)所示。将凸面光栅掩模基底放置在一个回转工作台上,球心 O 位于回转轴 Z 轴上,凸面光栅掩模顶点 A 处刻线所在平面经过回转轴。凸面光栅掩模基底球半径为 R ,要制备的光栅闪耀角为 θ ,离子束方向与光栅顶点处刻线所在平面成 θ 角,如图 8(b)所示。再制作并放置刻蚀狭缝,狭缝宽度 $a = 2R \sin \frac{\theta}{10} \sin \theta$,狭缝长度要大于

光栅基底外形尺寸。放置刻蚀狭缝需满足两点:狭缝到凸面光栅顶点的距离大于 $R \sin \frac{11\theta}{10} - R \sin \theta$;狭缝上下弧线与凸面光栅基底定点的弧线刻线有相同的回转轴。最后进行离子束刻蚀,如图 8(b)所示,刻蚀区域为角度为 $\theta/5$ 的凸面光栅掩模圆弧面,一条光栅刻线刻蚀完成后工作台旋转 $\theta/5$ 后再次刻蚀,直到整个弧面全部刻蚀。使用该方法刻蚀后的凸面闪耀光栅的闪耀角理论相对误差为 0.1° 。该方法的优点是可以在一定程度上降低凸面光栅闪耀角的不一致性。但由于分段刻蚀法在分段的连接处不能做到完全均匀,故同样会对闪耀角的一致性产生一些影响。

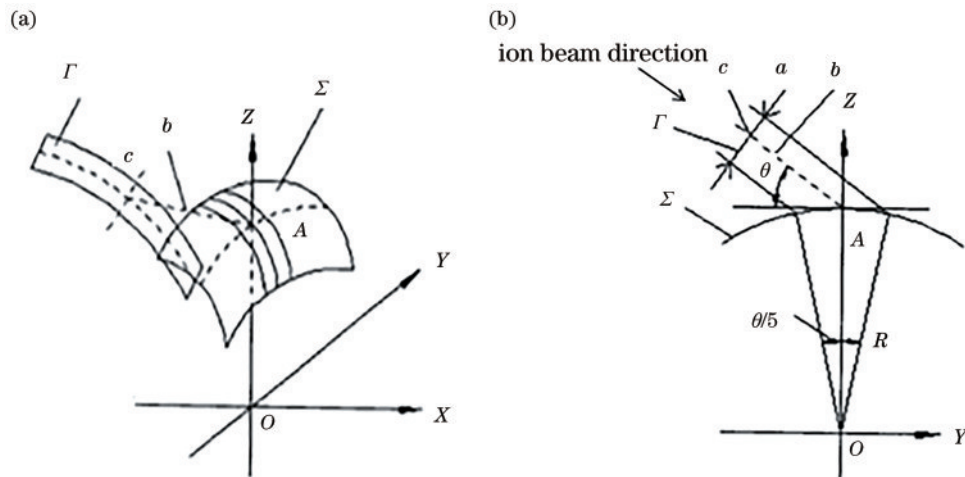


图 8 分段刻蚀法原理。(a)凸面光栅掩模基底位置图;(b)分段刻蚀加工示意图

Fig. 8 Principle of segmented etching method. (a) Position map of convex grating mask substrate; (b) schematic diagram of segmented etching

2011 年苏州大学汪海宾等^[48]利用 Ar 离子束大掠入射刻蚀凸面小闪耀角闪耀光栅,为解决凸面光栅的闪耀角不一致问题,将传统的针对平面刻蚀的平动刻蚀改进为适用于曲面基底的摆动刻蚀,制作了可旋转的离子束刻蚀样品平台。如图 9 所示,Ar 离子束垂直入射,掠入射角为 β 。在刻蚀过程中平台下方的电机带动平台旋转轴反复转动,一部分离子束通过隔板上的狭缝抵达凸面光栅表面进行刻蚀,通过这样的扫描刻蚀,保证了刻蚀出凸面光栅闪耀角的一致性。利用该方法,通过转动扫描刻蚀制备出了闪耀角为 4.3° 、反闪耀角为 18.7° 的凸面闪耀光栅。在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 波段范围内,其 +1 级衍射效率均值达到 40% ,峰值衍射效率达到 53% 。虽然利用可旋转的样品平台进行离子束刻蚀得到的凸面闪耀光栅,可以保证凸面光栅闪耀角的一致性,但是该旋转样品平台还有一些改进的空间,如旋转台旋转轴的位置取决于凸面光栅的

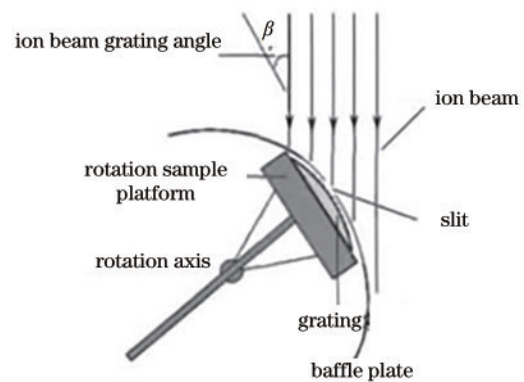


图 9 离子束刻蚀扫描平台

Fig. 9 Ion beam etching scanning platform

曲率半径,当刻蚀不同曲率半径的凸面闪耀光栅时,需调整旋转平台的旋转轴,对于复杂的离子束刻蚀系统来说,这会带来许多复杂的工作。

2018 年沈晨等^[49-50]建立了摆动刻蚀模型,研究

了摆动刻蚀工艺中的参数对光栅槽型的影响,并通过圆弧曲线拟合算法,设计了三维摆动离子束刻蚀工作台。如图 10 所示, θ_0 为理想情况下离子束的掠射角, $\Delta\theta$ 为束缝引起的离子束掠射角变化, θ_{grating} 为凸面基底的圆心角。设摆动刻蚀总时间为 T , 有效刻蚀时间为 T_e (基底表面被离子束轰击的时间), 单次摆动时基底的刻蚀时间为 t_n , 摆动次数为 n , 摆动速度为 ω , 束缝 AB 的宽度为 D , 束缝引起的离子束掠射角变化为 $-\min(\Delta\theta, \theta_0) \sim \Delta\theta$ 。入射角为 0° 时, 光刻胶的刻蚀速率为 v_0 。光栅基底上掩模高度为 h , 宽度为 w 。

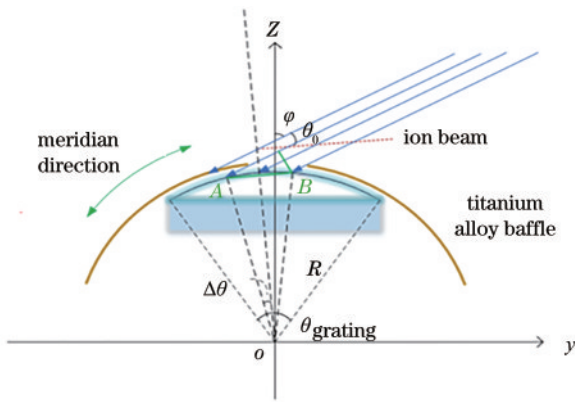


图 10 摆动离子束刻蚀模型

Fig. 10 Ion beam etching model

$$T = \theta_{\text{grating}} T_e / [\Delta\theta + \min(\Delta\theta, \theta_0)], \quad (3)$$

$$T_e = nt_n = n[\Delta\theta + \min(\Delta\theta, \theta_0)] / \omega, \quad (4)$$

$$D = 2R \sin \left\{ \left[\Delta\theta + \min(\Delta\theta, \theta_0) \right] / 2 \right\}, \quad (5)$$

$$h = v_h T_e = k_h \theta_0 n t_n, \quad (6)$$

$$w = v_w T_e = (k_w \theta_0 + v_0) n t_n, \quad (7)$$

其中: v_h 和 v_w 为掩模上表面与侧面的刻蚀速率; k_h 和 k_w 为掩模的上表面和侧表面刻蚀速率系数。可

以看出, 离子束掠射角的变化范围与束缝宽度正相关。理想情况下, 光刻胶掩模在时间 T 内正好刻完, 但是实际情况下, 离子束掠射角 θ' 、刻蚀时间和槽型演化都要受到摆动速度 ω 和束缝宽度 D 的影响。

当 $\Delta\theta \leq \theta_0$ 时, 有

$$h' = nh_n = k_h \theta_0 n t_n = h, \quad (8)$$

$$w' = nw_n = (k_w \theta_0 + v_0) n t_n = w, \quad (9)$$

其中, h_n 和 w_n 分别为单次摆动时间 t_n 内掩模高度减少量和掩模宽度收缩量; h' 和 w' 为整个刻蚀过程中掩模总的刻蚀量。可以看出, 当束缝宽度小于临界宽度 $2R \sin \theta_0$ 时, 掩模的变化与理想情况下相同, 摆动速度与束缝宽度对槽型没有影响。

当 $\Delta\theta > \theta_0$ 时, 穿过束缝的离子束有一部分无法轰击到基底, 整体的离子束掠射角会发生偏移。离子束掠射角的平均值大于 θ_0 , 闪耀角增大, 通过计算可得

$$v_h'' = \frac{h_n}{t_n} = k_h \theta_0 + \frac{k_h (\Delta\theta - \theta_0)}{2} > v_h, \quad (10)$$

$$v_w'' = \frac{w_n}{t_n} = k_w \theta_0 + v_0 + \frac{k_w (\Delta\theta - \theta_0)}{2} > v_w, \quad (11)$$

$$\gamma' = \frac{k_\gamma}{k_\gamma + k_h} \frac{\Delta\theta + \theta_0}{2}, \quad (12)$$

其中 γ' 为光栅闪耀角, β 为反闪耀角, k_γ 为基底闪耀面的刻蚀速率系数。可以看出, 在每个摆动周期内, 掩模的平均刻蚀速率均大于理想状态下的刻蚀速率, 这说明束缝宽度增大, 总刻蚀时间会缩短。当束缝宽度大于 $2R \sin \theta_0$ 时, 刻蚀后的槽型闪耀角会增大。但是在预定的有效刻蚀时间内, 掩模会被提前刻完, 形成平台。设经过 T_1 时间, 掩模高度缩减为 0, 槽顶平台的宽度为 w_1 , 槽型的深度为 h_1 ; 经过 T_e 时间, 刻蚀完成后平台最终宽度为 w_2 , 表达式为

$$w_2 = w_1 + \left[\frac{d - w_1}{h_1} \frac{k_{\gamma 0} (\Delta\theta + \theta)}{2} - \frac{v_\gamma'}{\sin \gamma'} - \frac{v_\beta'}{\sin \beta'} \right] (T_e - T_1), \quad (13)$$

可以看出当束缝宽度大于临界宽度 $2R \sin \theta_0$ 时, 闪耀角的大小和平台的宽度与束缝宽度正相关。基于该模型, 沈晨等^[50]选取 0.0127 rad/s 的摆动速度和 16.5 mm 的束缝宽度利用摆动刻蚀法制作了刻线密度为 45.5 groove/mm、闪耀角为 2.2° 的凸面闪耀光栅样品, 其衍射效率很接近理想衍射效率, 峰值衍射效率为 90.03%, 整个波段上的平均衍射效率为 70.25%。

4 结束语

随着各领域研究与应用需求的提高, 以及成像技术、光谱技术的发展, 成像光谱仪得到了人们越来越多的关注与研究。Offner 成像光谱仪是目前应用最广泛的成像光谱仪, 与传统的使用平面或凹面光栅的光谱仪相比具有高空间分辨率、无谱线弯曲、畸变小、结构小型化、轻型化等优点。对 Offner

成像光谱仪系统的优化,如减小像差、提高成像质量等将会是未来研究成像光谱仪的必然趋势。

凸面光栅作为 Offner 成像光谱仪的核心分光元件,对其制备方法的研究有重要意义。电子束直写法与 X 射线光刻法由于其工艺难度与尺寸小、鬼线强度大等缺点,不适合广泛的凸面光栅生产及应用。而机械刻划法在制备曲面光栅时难度较大,刻划时间太长,制备出的凸面光栅表面粗糙,同样不适合应用于制备凸面光栅。与上述方法相比,全息离子束刻蚀法具有成本低、时间短、槽型好、无鬼线等优点,并且对设备要求低,在制备大面积光栅上更有优势,更适用于同心成像光谱仪的凸面光栅的制备。采用严格耦合波理论可以对光栅衍射效率进行计算与模拟,可以分析槽型参数与衍射效率之间的关系,从而根据需要的参数,对凸面光栅的槽型进行设计。此外还可以根据高光谱成像光谱仪的系统参数、成像质量等要求对凸面光栅的像差等参数进行优化设计。

针对凸面光栅闪耀角的一致性问题的,上海理工大学黄元申介绍的分段刻蚀法将刻蚀轨迹近似地看作圆弧,但在圆弧的分段连接处,对准误差可能会对闪耀角的均匀性带来轻微的影响。苏州大学汪海宾介绍的摆动刻蚀装置虽然可以很好地解决闪耀角不一致问题,但装置旋转轴的可调节性还有待继续改进。根据中国科学院长春光学精密机械与物理研究所沈晨建立的摆动刻蚀模型,可以看出在离子束摆动刻蚀中刻蚀机的束缝宽度越大,刻蚀速度越快,时间越短。当束缝宽度小于 $2R\sin\theta_0$ 时,摆动速度与束缝宽度对槽型没有影响。当束缝宽度大于 $2R\sin\theta_0$ 时,槽型顶部会出现平台,闪耀角大小变大,闪耀角的大小与束缝宽度和平台大小正相关。根据相关结论,可以对离子束刻蚀机进行优化设计。

在接下来的研究中,上海理工大学光栅课题组会继续对全息曝光光路和离子束刻蚀装置进行设计与优化,如:优化平面波在凸面光栅基底上发生干涉时光强分布的均匀性;改进摆动刻蚀装置旋转轴的可调节性,使其可以根据凸面光栅基底的曲率半径进行调节;优化刻蚀工艺参数,获得表面粗糙度更小的凸面光栅等。在未来,改进离子束刻蚀技术,更好地解决闪耀角不一致问题,提高凸面光栅的衍射效率是研究利用全息离子束刻蚀法制备凸面光栅的必然要求。

参 考 文 献

- [1] Yang Y S, Huang Y Q, Huang H, et al. Design of photodetector with subwavelength grating structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2352-2357.
杨一粟, 黄永清, 黄辉, 等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2352-2357.
- [2] Guo C C, Ye W M, Yuan X D, et al. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2690-2695.
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 等. 亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2690-2695.
- [3] Fu X Y, Yi K, Shao J D, et al. Design of single-material guided-mode resonance filter[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(1): 9-11.
- [4] Gumbel H. System considerations for hyper/ultra spectroradiometric sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2821: 138-170.
- [5] Chen R, Zhang Y, Wang J J, et al. Application of hyper-spectral remote sensing in the study of water body containing suspended particles[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Natural Science Edition), 2007, 24(2): 48-53.
陈荣, 张鹰, 王晶晶, 等. 高光谱遥感技术在悬沙水体研究中的应用[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2007, 24(2): 48-53.
- [6] Xu H, Wang X J. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 13-17.
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.
- [7] Wang L X, Wang H, Gao J, et al. Analysis and application of space-borne hypir-spectral imaging technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2000, 21(1): 40-47.
王丽霞, 王慧, 高军, 等. 星载超光谱成像技术应用及现状分析[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21(1): 40-47.
- [8] Offner A. New concepts in projection mask aligners [J]. Optical Engineering, 1975, 14(2): 142130.
- [9] Mertz L. Concentric spectrographs[J]. Applied Optics, 1977, 16(12): 3122-3124.
- [10] Kwo D, Lawrence G, Chrisp M, et al. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system [J]. Proceedings of SPIE, 1987, 818: 275-281.
- [11] Chrisp M P. Convex diffraction grating imaging

- spectrometer: US5880834[P]. 1999-03-09.
- [12] Rodriguez S, Le Mouélic S, Sotin C, et al. CASSINI/VIMS hyperspectral observations of the HUYGENS landing site on Titan[J]. Planetary and Space Science, 2006, 54(15): 1510-1523.
- [13] Reininger F M, Coradini A, Capaccioni F, et al. VIRTIS: visible infrared thermal imaging spectrometer for the Rosetta mission[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2819: 66-77.
- [14] Kazanskiy N, Ivliev N, Podlipnov V, et al. An airborne Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3411.
- [15] Huang Y S, Chen J B. Fourier analysis of Offner imaging spectrometer composed of a convex grating[J]. Optical Instruments, 2007, 29(6): 40-43.
黄元申, 陈家璧. 凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的傅里叶分析[J]. 光学仪器, 2007, 29(6): 40-43.
- [16] Huang Y S, Pei Z R, Hong R J, et al. Non-approximate method for designing Offner spectrometers[J]. Optik, 2014, 125(16): 4578-4582.
- [17] Han S, Huang Y S, Li B C, et al. Theoretical analysis and research about high image quality Offner imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0430001.
韩珊, 黄元申, 李柏承, 等. 高成像质量 Offner 成像光谱仪的理论分析与研制[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0430001.
- [18] Xue R D, Ji Y Q, Shen W M, et al. Design of a spectroscopic system for SWIR Offner imaging spectrometer[J]. Journal of Soochow University (Natural Science Edition), 2011, 27(3): 61-66.
薛汝东, 季轶群, 沈为民, 等. Offner 型短波红外成像光谱仪分光系统的设计[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2011, 27(3): 61-66.
- [19] Ji Y Q, Chen Y H, Liu Q, et al. Convex grating imaging spectrograph with light weight and high fidelity[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7156: 71560K.
- [20] Zheng Z Z, Yang Z, Qin Y T, et al. Structure analysis and experiment of an Offner-type short-wave infrared imaging spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 053001.
郑志忠, 杨忠, 秦远田, 等. Offner 型短波红外成像光谱仪的结构分析与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 053001.
- [21] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0822002.
杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0822002.
- [22] Fisher J, Antoniadis J A, Rollins C, et al. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3482: 179-186.
- [23] 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.
- [24] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1205002.
郑志忠, 杨忠, 修连存, 等. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1205002.
- [25] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 811-818.
- [26] Wang H B. The design and fabrication of convex blazed grating[D]. Suzhou: Soochow University, 2010: 14-31.
汪海宾. 凸面闪耀光栅的设计及其制作[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 14-31.
- [27] 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.
- [28] Mouroulis P, Hartley F T, Wilson D W, et al. Blazed grating fabrication through gray-scale X-ray lithography[J]. Optics Express, 2003, 11(3): 270-281.
- [29] 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: 51730E.
- [30] Johnson W R, Wilson D W, Bearman G, et al. All-reflective snapshot hyperspectral imager for ultraviolet and infrared applications[J]. Optics Letters, 2005, 30(12): 1464-1466.
- [31] Ai J, Du Q F, Qin Z L, et al. Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and μ m-precision fabrication on curved surfaces with large sag heights[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20965-20974.
- [32] Mattelin M A, Radosavljevic A, Missinne J, et al. Fabrication and replication of high efficiency blazed gratings with grayscale electron beam lithography and UV nanoimprint lithography[J]. Proceedings of

- SPIE, 2020, 11292: 1129204.
- [33] Davies M A, Dutterer B S, Suleski T J, et al. Diamond machining of diffraction gratings for imaging spectrometers[J]. Precision Engineering, 2012, 36(2): 334-338.
- [34] 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.
- [35] Harrison G R. The production of diffraction gratings I development of the ruling art[J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(6): 413-426.
- [36] Harrison G R. The production of diffraction gratings: II the design of echelle gratings and spectrographs[J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(7): 522-527.
- [37] Aoyagi Y, Namba S. Blazed ion-etched holographic gratings[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1976, 23(9): 701-707.
- [38] Huang Y S, Zhang D W, Ni Z J. et al. Reactive ion beam etching method of blazed convex grating: CN101900844B[P]. 2010-12-01.
黄元申, 张大伟, 倪争技, 等. 闪耀凸面光栅的反应离子束蚀刻法: CN101900844B[P]. 2010-12-01.
- [39] Liu Q, Cheng Y, Gao F, et al. Fabrication of the blazed convex grating by holographic ion beam etching[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9672: 96720Q.
- [40] 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.
- [41] Qiu K Q, Xu X D, Hong Y L, et al. Techniques of coating wafers used for fabrication of diffraction optical elements[J]. Microfabrication Technology, 2007, 25(1): 19-23.
邱克强, 徐向东, 洪义麟, 等. 衍射光学元件制作中的基片涂胶方法[J]. 微细加工技术, 2007, 25(1): 19-23.
- [42] Liu E R. Laser holographic lithography[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1982, 3(2): 20-29.
刘恩荣. 激光全息光刻技术[J]. 半导体光电, 1982, 3(2): 20-29.
- [43] Lasagni A, Holzapfel C, Mücklich F, et al. Periodic pattern formation of intermetallic phases with long range order by laser interference metallurgy[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(6): 487-492.
- [44] Huang Y S, Zhuang S L, Ni Z J, et al. Holographic convex surface grid photo-etching light path design method: CN1664651A[P]. 2005-09-07.
黄元申, 庄松林, 倪争技, 等. 全息凸面光栅光刻光路设计方法: CN1664651A[P]. 2005-09-07.
- [45] Guo P L. Study on fabrication of convex grating by native substrate grating mask[D]. Suzhou: Soochow University, 2018: 40-42.
郭培亮. 同质掩模法制作凸面闪耀光栅的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018: 40-42.
- [46] Burkhardt M, Rathje T, Lehr D, et al. Manufacturing method for monolithic freeform Offner-gratings for hyper-spectral imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11151: 111510U.
- [47] Mello B D A, Costa I F D, Lima C R A, et al. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings[J]. Applied Optics, 1995, 34(4): 597-603.
- [48] Wang H B, Liu Q, Wu J H, et al. Fabrication of convex blazed grating by Ar⁺ ion-beam etching[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405002.
汪海滨, 刘全, 吴建宏, 等. Ar⁺离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405002.
- [49] Shen C, Tan X, Jiao Q B, et al. Convex blazed grating of high diffraction efficiency fabricated by swing ion-beam etching method[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25381-25398.
- [50] Shen C. Study on the swing etching technique of curved gratings with high diffraction efficiency[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 37-50.
沈晨. 高衍射效率曲面光栅摆动刻蚀技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018: 37-50.