

文章编号 1004-924X(2025)23-3593-25

宽波段光栅国内外研究综述

陈鹏元^{1,2}, 糜小涛^{1*}, 李 烁¹, 江思博¹, 周敬萱¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:衍射光栅是光谱仪器中的核心光学元件,与普通光栅相比,宽波段光栅能够在较宽的波段范围内满足光谱分析需求。本文综述了宽波段光栅的国内外研究进展,总结了复杂槽形光栅、分区光栅、中阶梯光栅以及多层介质光栅四类宽波段光栅的特点。其中,复杂槽形光栅的光谱连续性高,衍射效率曲线稳定,但其质量受加工精度影响较大;分区光栅的设计灵活度高,加工工艺成熟,但子区域之间存在相位错配与衍射场差异问题,易被杂散光干扰;中阶梯光栅能在高衍射级次下实现宽波段高分辨率响应,但其精度易受制作设备影响且制作难度大;多层介质光栅结构设计灵活、适应性强,但对材料选择与多层膜厚控制要求高。最后,展望了宽波段闪耀光栅的发展方向,为后续相关研究提供了依据。

关键词:光谱仪;宽波段光栅;衍射光栅;闪耀光栅;中阶梯光栅

中图分类号:TH744 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253323.3593

CSTR:32169.14.OPE.20253323.3593

Review of domestic and international research on broadband gratings

CHEN Pengyuan^{1,2}, MI Xiaotao^{1*}, LI Shuo¹, JIANG Sibao¹, ZHOU Jingxuan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: mixiaotao@ciomp.ac.cn

Abstract: Diffraction gratings serve as the core optical components in spectroscopic instrumentation. Broadband gratings, in contrast to conventional gratings, fulfill spectral analysis requirements across extended wavelength ranges. This paper reviews four principal types of broadband gratings: complex groove-shaped gratings, zoned gratings, intermediate-step gratings, and multilayer dielectric gratings. Their respective structures and operational principles are introduced, accompanied by a summary of recent research progress. Key characteristics are delineated as follows: complex groove-shaped gratings exhibit high spectral continuity and stable diffraction efficiency, yet their performance is highly sensitive to fabrication precision; zoned gratings offer considerable design flexibility and benefit from mature processing techniques, but suffer from phase mismatch, diffraction field disparities between sub-zones, and susceptibility to stray light; intermediate-step gratings enable high-resolution response over broad wavelength ranges at high dif-

收稿日期:2025-07-21;修订日期:2025-07-30.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFF0714802)

fraction orders, though their accuracy is constrained by manufacturing equipment and process complexity; multilayer dielectric gratings provide adaptable structural design and strong environmental adaptability, but impose stringent demands on material selection and multilayer film thickness control. Finally, future development directions for broadband diffraction gratings are outlined to inform subsequent research.

Key words: spectrometer; broadband grating; diffraction grating; blaze grating; echelle grating

1 引言

衍射光栅^[1-3]是一种具有规律性结构的精密光学元件,具备优越的色散特性,因此作为核心光学元件被广泛应用在各类光谱仪器^[4-6]中。光栅的衍射效率和光谱范围是光谱仪中的重要光学性能指标,衍射效率直接影响光能的利用率和仪器的信噪比,光谱范围决定了仪器的使用波段范围^[7-9]。影响光栅衍射效率的因素主要包括光栅的使用条件和结构参数。其中,光栅的使用条件主要包括工作波段范围、光栅的入射角和衍射角角度、入射光的偏振状态和光栅的使用级次等。光栅的结构参数主要包括周期、槽形参数和材料等。

目前,大多光谱仪器中使用的光栅为研制流程简单、成本低、槽形结构单一的锯齿槽光栅^[10-11]、正弦槽光栅^[12]、梯形槽光栅^[13]和矩形槽光栅^[14-15]。其中,正弦槽光栅、梯形槽光栅和矩形槽光栅在整个波段的光栅衍射效率较低,严重降低了能量的利用率,而锯齿槽光栅在闪耀波长处具有较高的衍射效率,但衍射效率随着入射光波长与闪耀波长偏离量的增加而降低,不利于光谱仪的宽波段光谱成像和光谱分析。

在某些光谱仪中,为快速而准确地获得光谱测量结果,宽的工作波段范围和均匀合理的光谱响应是光谱仪首要考虑的性能。为获得宽的工作波段范围,可以采用将工作波段拆分成多个光谱通道和相应的分光系统结合来实现,但这会增加仪器的体积、成本和复杂性^[16]。因此,为满足具有独立分光系统的紧凑型、低成本、便携式、高可靠性和高集成度的宽波段光谱仪对光栅的需求,高质量宽波段光栅的研制成为了各国的研究热点。

宽波段光栅是指能够在较宽光谱范围内(通常跨越数百纳米至多个微米)维持高衍射效率、良好色散特性及稳定波前响应的衍射光栅。相

较于传统光栅,宽波段光栅在光谱分析领域具有独特且不可替代的优势,能满足多种光谱仪全波段使用的需求,在天文^[17]、遥感^[18-19]、军事^[20-21]、国防^[22-23]等领域得到了广泛应用。

为了使光栅获得宽波段工作的特性,研究人员在光栅的不同研究方向做出了许多努力。在20世纪,根据已有的光栅制备经验,研究人员针对槽形对光栅特性的影响开发出了复杂槽形光栅。随着槽形理论模型的改善和纳米精度加工技术的发展,更多复杂槽形结构逐渐从理论走向初步实验验证,复杂槽形光栅也获得了较大的突破。然而,复杂槽形光栅的槽型实际制作难度较大,为了更灵活、便捷的设计和制作宽波段光栅,研究人员把视角从光栅槽形转向了光栅整体,提出了分区光栅的概念。将一块光栅划分为不同工作区间,把在不同波段范围下工作的小光栅集成在一块光栅上来满足宽波段的需求并获得了更高的设计灵活度。此外,研究人员发现中阶梯光栅的高工作级次与大闪耀角特性使其几乎能够在全波段闪耀,并且随着制作中阶梯光栅的设备和技术不断发展,中阶梯光栅在宽波段仪器应用上也获得了越来越多的关注。最后,研究人员利用光栅介质材料对光栅的影响,通过多层不同折射率介质的协同设计,使光栅不同材料之间实现宽带色散补偿,制备出的多层介质宽波段光栅具备优良的激光损伤阈值与偏振一致性。综上所述,为实现光栅宽波段工作的功能,研究人员从结构构型、功能分区、衍射级次与材料作用等角度出发,将宽波段光栅的研究分为了复杂槽形光栅^[24]、分区光栅^[25-26]、中阶梯光栅^[27-28]与多层介质光栅^[29]四种类型,形成了当前宽波段光栅研究的四条主要技术路径。

多年来,相关研究人员在宽波段光栅的研制方面做了大量的工作与尝试,从制作工艺的改进到采用新型光栅设计算法;从常规的平面光栅制备到凸/凹面光栅的研究;从单一的基底材料到

复杂膜层结构,这一系列尝试充分反映了宽波段光栅的重要性和其在先进光谱系统中的核心地位。本文通过对这 4 类宽波段光栅的研究和分析,讨论了各方法的特点和优势以及当前国内外研究状况,最后展望了宽波段光栅未来的发展趋势。

2 宽波段光栅类型

复杂槽形光栅以双闪耀角光栅和连续变化槽形光栅为代表,该类型光栅只有一种槽形结构,但是可能包含不同闪耀角或者是某种复杂形状,通过在单周期内引入非对称、多角度、多级或连续曲面的槽形结构,增强复杂槽形光栅的波前调控能力,实现在较宽波段范围内的高衍射效率响应。图 1(a)为其中一种复杂槽形光栅的简要结构示意图。

分区光栅则通过在整个光栅面上划分多个具有不同闪耀角或结构参数的子区域实现宽波段工作的功能,结构如图 1(b)所示,其任意两个区域间都有着不同的槽型参数^[30-31]。实质是将不同波段工作的具有较高衍射效率的多块光栅组合在一块底板上,使其平均衍射效率在宽波段上均高于普遍要求。分区光栅制作方法较为灵活、应用比复杂槽形光栅广泛,也更加符合光栅设计理念和槽形结构的发展^[32]。制作分区光栅的方法有机械刻划法、全息-离子束刻蚀法、电子束光刻和光栅拼接法,以上四种方法均制作出了高性能的分区光栅,并成功应用到航天飞行器搭载的光谱仪器中。在制作时,通过优化不同区域光栅的结构参数可以确保光栅在宽波段范围内具有较高且均匀合理的衍射效率,因其具有较高的组合灵活度,近年来学者对其展开了大量研究。

中阶梯光栅是一种低槽密度的锯齿槽闪耀光栅,通常为大闪耀角结构,并工作于高衍射级次,具有高衍射效率、高色散能力、高分辨率和全波段闪耀特性^[33-35],简要结构如图 1(c)所示。目前中阶梯光栅的制备方法主要分为机械刻划法、电子束刻蚀法和湿法刻蚀法,其质量对加工方法及设备依赖度较高,在设计中阶梯光栅时亦需考虑光栅常数、闪耀波长与高阶色散之间的关系。在制作工艺上,机械刻划法具有槽形易调谐、衍

射效率高等优点,但刻划过程中存在的刻线位置误差会影响光栅的精度^[36]。电子束刻蚀的成本高、刻蚀周期长、不能研制大尺寸光栅^[37]。湿法刻蚀制备成本低、周期短,但槽形质量不佳,所制备的中阶梯光栅衍射效率偏低^[38],不能制作大尺寸的光栅。目前三种制备方法中机械刻划法仍是主要方式,随着刻划机的定位精度不断提升,通过机械刻划法研制出光栅的效率已经可以接近光栅设计理论值^[39]。

多层介质宽波段光栅是一类利用不同折射率介质材料构建层状结构实现高衍射效率、宽带响应与高激光损伤阈值的衍射光栅^[40]。不同材料的堆积效果如图 1(d)所示。相比传统单层光栅或金属反射光栅,多层介质光栅在光谱调控自由度、能量承载能力和系统稳定性方面具有显著优势,可用作啁啾脉冲放大器的关键元件^[41]。其工作原理是基于多层膜系的相位调控机制与模态干涉效应,通过调节各层的厚度、槽深与填充因子,实现不同偏振态下的一致性响应与色散特性优化,近年来随着研究人员对其组成材料的深入探索,多层介质光栅的优势也在不断发掘。

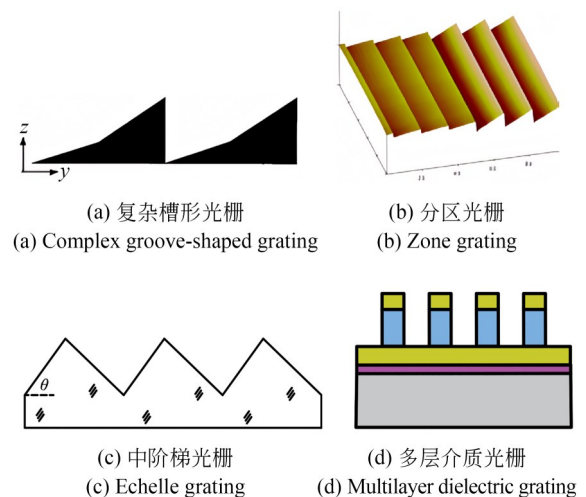


图 1 四类宽波段光栅的结构^[24-29]

Fig. 1 Structures of four types of wide-band gratings^[24-29]

3 复杂槽形光栅

3.1 国外研究进展

1998 年,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提出并实证了在凸面基底

上利用电子束光刻(E-beam Lithography, EBL)技术直接刻写闪耀光栅的方法,实现了传统刻划和全息方法难以实现的高效性和灵活性。他们提出了一种双角度槽形的宽波段闪耀光栅,以扩展-2级波段响应范围,衍射效率曲线如图2所示。该结构牺牲部分峰值效率以换取更优的宽带性能。实验结果表明,光栅能在400~2 500 nm波段工作,适应于多波段成像光谱。EBL方法不仅能够整个凸面范围保持恒定槽形与深度,还可通过控制各区域的平均相位实现不同闪耀区之间的衍射场相位匹配。该项工作证实EBL技术在制备宽波段、低杂散光的凸面成像光栅方面具有显著优势,为后续高性能光谱仪的进一步研究提供了关键工艺基础^[42]。

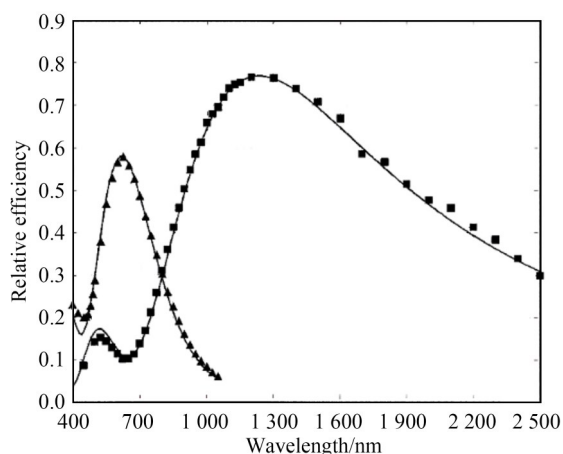


图2 双角度宽波段闪耀光栅的+1级(方形点状图)和+2级(角形点状图)相对衍射效率^[42]

Fig. 2 Relative diffraction efficiency of +1 order (square dop plot) and +2 order (triangle dop plot) of dual-angle broadband blazed grating^[42]

2000年,芬兰约恩苏大学Pasi Laakkonen等通过EBL技术设计并制作了一款应用于显微光谱的非对称透射光栅^[43],该光栅的衍射效率在400~750 nm的波段内大于40%。在此基础上,2006年,Juha Pietarinen等在充分考虑了光栅的制作工艺和槽形、槽深对闪耀光栅衍射效率的影响下,利用傅里叶模态法设计出一款具有阶梯状并彼此之间近乎垂直槽形的光栅^[44],如图3所示。基于EBL工艺制作出宽波段光栅成品,实验表明,该光栅在1 000~2 000 nm的波段内-1级的衍射效率非常平滑,均在50%~60%之间。

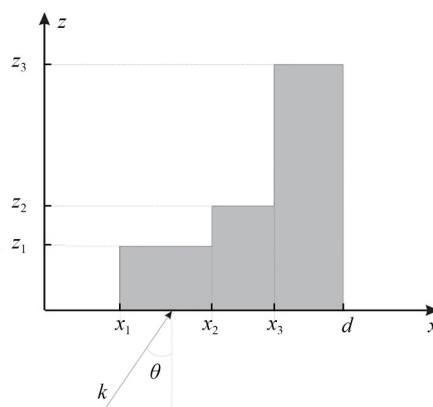


图3 Pasi Laakkonen团队设计的阶梯状槽形结构^[44]
Fig. 3 Stepped groove structure designed by Pasi Laakkonen team^[44]

2004年,JPL的Backlund等进一步引入非对称、渐变及多层复合槽形,将光栅周期划分为多个子单元,并独立调整各单元的深度和占空比,调整了多个波长处优化频域内的空间频率分量,进一步拓展了双闪耀角光栅的工作波段。他们利用EBL技术研制在熔融石英基板上制备出的反射式宽波段光栅结构如图4所示,其在400~2 500 nm波段内-1级衍射效率约为20%~55%,并制作了一款工作波段为400~1 500 nm的最高衍射效率为25%的透射式宽波段闪耀光栅^[45]。

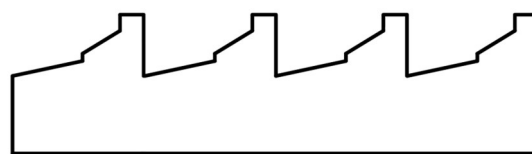


图4 Backlund设计的反射式宽波段光栅槽形^[45]
Fig. 4 Reflective wide-band grating groove designed by Backlund^[45]

2007年,美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)的Ronald B. Lockwood等为TacSat-3卫星搭载的高分辨率超光谱成像仪研制了一款宽波段光栅,同样采用EBL技术,制作出光谱为400~2 500 nm的双闪耀角光栅^[46],其衍射效率如图5所示。搭载该款光栅的成像仪覆盖了可见光波段到红外光波段,并且兼顾了波段内的空间和光谱均匀性,所有工作波长

下的信噪比性能大致相等,最大程度地提高了光学质量并降低了设计复杂性,体现了宽波段光栅在制备高质量、高集成度成像光谱仪方面的优越性能。

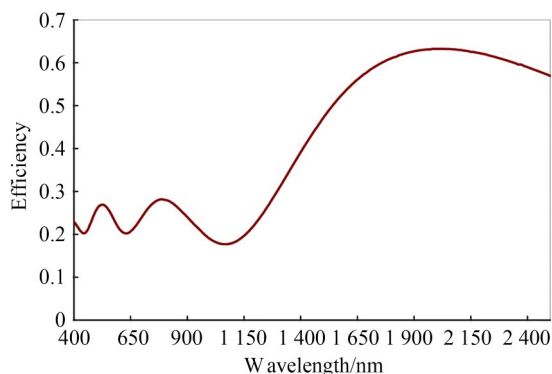


图5 AFRL 双闪耀角光栅的衍射效率曲线^[46]

Fig. 5 Diffractive efficiency curve of dual blaze angle gratings on AFRL^[46]

2008年,Juha等又提出了一种双槽波导型宽波段衍射光栅设计方法,巧妙利用波导模的色散特性来补偿传统衍射光栅的波长响应不均匀问题。他们通过电磁理论和数值优化方法设计出可见光和近红外波段的TM偏振专用光栅,并设计了能响应非偏振光的结构,在SiO₂基底上的活性离子刻蚀掩模上先后进行两次曝光,制作了一种双槽形的宽波段波导光栅,如图6所示。测试表明,在300~800 nm内其-1级衍射效率超过60%,验证了该宽波段光栅的高效性和宽带性。该研究为宽带响应的衍射光栅提供了新的设计范式,尤其适用于微型光谱器件中的高保真宽波段探测应用^[47]。

2024年,法国艾克斯-马赛大学的Ans等针对锥形入射的闪耀衍射光栅,结合相对介电常数密度使用矩阵计算模拟光栅的反射/透射衍射效率,提出了用拓扑优化提升光栅在锥形入射条件下的衍射效率方法^[48]。该研究通过有限元方法(Finite Element Method, FEM)和麦克斯韦方程的拓扑优化改进了光栅的几何结构,使光栅能够在多个波长范围内实现高反射率和高衍射效率。图7所示为优化前后光栅衍射效率对比,其中蓝线为优化后的光栅衍射效率,灰线为优化之前的衍射效率(彩图见期刊电子版)。实际测试证实,

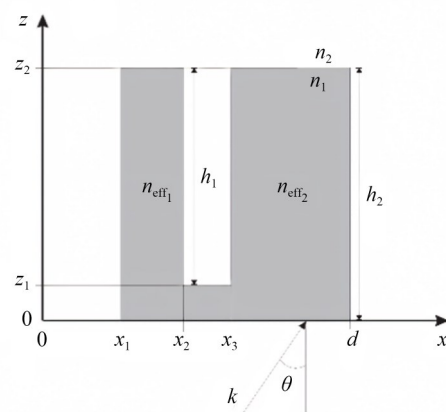


图6 双槽形的宽波段波导光栅^[47]

Fig. 6 Double-slot wide-band waveguide grating^[47]

该方法在单波长优化中可达到98%的衍射效率,经优化后在400~1 500 nm波长内的平均反射率提高了29%(绝对值)和56%(相对值)。Ans等的研究验证了拓扑优化方法在实际应用中的可行性,为宽波段光栅的进一步优化提供了理论支持和实践指导。

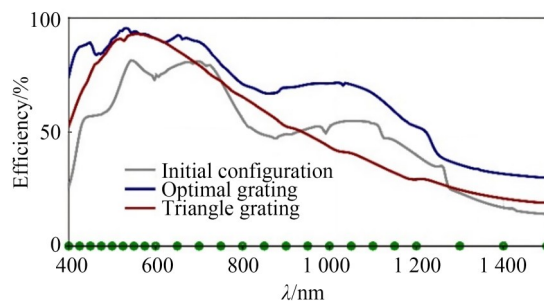


图7 优化前后光栅衍射效率对比^[48]

Fig. 7 Comparison of grating diffraction efficiency before and after optimization^[48]

3.2 国内研究进展

20世纪70年代末,长春光机所庄夔等通过改进光栅刻刀安装角度总结了刻刀角度对光栅衍射效率的曲线,然后通过改进膜层、改良双闪耀光栅槽形,最终研制出了100 gr/mm和60 gr/mm两款用于分光光度计的宽波段红外双闪耀角光栅^[49],为长春光机所后续在宽波段光栅的研究打下了基础。

2008年,张善文等讨论了光栅的Rayleigh异常^[50]和共振异常^[51]两类不同异常机理,然后,根据这两类异常造成的误差设计了一款宽波段光栅。其中,Rayleigh异常指发生在入射波长或入

射角的某些临界点上时衍射波发生掠射,处于存在和消失的临界状态,在经过临界点时衍射效率曲线表现为在 Rayleigh 边界处发生导数跃变常出现局部的、光谱范围很窄的峰和谷。第二类异常是由于入射波激发起某种能够沿光栅表面传播的表面波而形成的,这种激发称之为传播波与表面波的耦合^[52]。在耦合发生时,入射波的能量一部分被转移到表面波中,导致光栅各衍射级次能量重新分配,由此造成衍射效率在相位匹配点附近的急剧起伏。在此基础上,2009 年他们将上述研究结合光栅电磁场理论得到了闪耀波长与两类光栅异常和光栅光谱范围的关系,提出了用 TM 第一闪耀波长补偿 Rayleigh 异常或共振异常来拓展光栅使用波段的设计思想^[53]。通过大量数值计算优化,最终给出了如图 8 所示的包括两个闪耀角 α_1 和 α_2 ,两个闪耀面的长度 l_1 和 l_2 的比值以及槽顶角 5 个参数确定的最优结构,实现了由单定向面光栅实现宽光谱范围的目的。所设计的宽波段金属光栅在使用波段内的衍射效率均优于 40%。

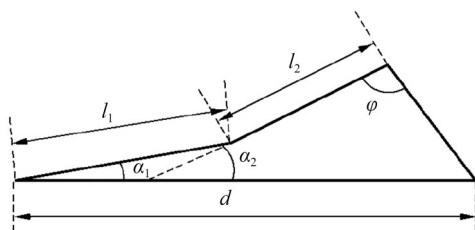


图 8 张善文团队优化的五参数光栅槽形^[53]

Fig. 8 Optimized grating groove shape by Zhang Shanguwen's team^[53]

2010 年,西安交通大学的樊叔维等将衍射光栅的耦合波分析方法(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)与遗传优化算法进行结合,解决了多种衍射光栅槽型结构参数的优化问题,使得设计高衍射效率的多种槽型衍射光栅周期大为缩短^[54]。图 9 为他们对衍射光栅槽形的优化示意图。首先,将光栅分为许多薄层来近似光栅实际的面型函数。然后,通过严格的 RCWA 确定每个光栅薄层内的电磁场。最后,在不同区域边界面上及光栅薄层之间运用电磁场边界匹配条件,求得各级衍射波的振幅及衍射效率。用这种

方法并优化设计了红外分光光度计 90.9 gr/mm 双闪耀角光栅,衍射效率得到了一定的提高。

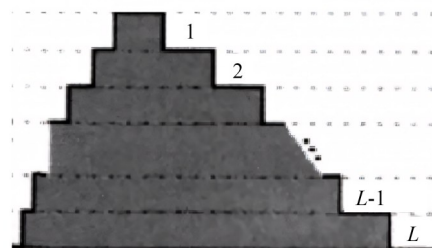


图 9 樊叔维团队的衍射光栅槽形优化^[54]

Fig. 9 Optimization of diffraction grating groove shape by Fang Shuwei team^[54]

3.3 总 结

复杂槽形光栅的研究经历了从单一闪耀角到多闪耀角、非对称、多级、渐变及波导增强等多种槽形结构的发展演进,其核心目标在于提升衍射效率、拓展工作波段并优化偏振响应。在制备方法上,从 20 世纪 70 年代使用的传统刻划逐步发展出多种制作工艺,如美国 JPL 在 90 年代的电子束光刻技术实现在凸面基底上直接刻写复杂槽形光栅,拓宽了复杂槽形光栅的制作方式。在对光栅槽型的结构设计上,长春光机所通过改进刻刀与膜层设计,初步实现了红外宽带光栅的工程应用。美国 JPL 引入非对称、渐变及多层复合槽形,拓展了光栅的响应波段。芬兰学者提出阶梯状光栅和波导型双槽形光栅,为复杂光栅槽形的设计上提供了新的设计范式。在槽形的设计优化上,长春光机所提出五参数联合优化槽形设计模型,实现了结构与异常特性间的耦合补偿。西安交通大学则利用 RCWA 结合遗传算法实现多种复杂槽型结构的全局优化,使红外双闪耀角光栅获得更高衍射效率。法国团队将拓扑优化方法引入结构设计中,获得了更加平滑且效率更高的衍射曲线。

总体来看,复杂槽形光栅的发展体现为:

- (1) 加工方式由机械刻划转向高精度电子束光刻与离子束刻蚀;
- (2) 结构形式由简单向多角度、非对称、阶梯形的复杂方向发展;
- (3) 设计方法由经验构型向数值优化与智能设计演进。

4 分区光栅

4.1 国外研究进展

1978年,日立制作所的石川信等提出并研制了一种基于分区闪耀结构的新型红外分光光度计,旨在解决传统中红外区域使用多块光栅切换所带来的复杂光机结构与波长段落误差问题^[55]。他们通过在一块光栅表面以不同闪耀角分区刻划的方式,在不更换光栅的前提下实现宽波段的高效覆盖,衍射效率曲线在多个波段同时具备峰值响应。此外,该光栅在偏振方面具有更平坦的特性,适用于高分子材料等结构复杂样品的偏振红外光谱分析。该工作为红外宽波段分光光谱仪提供了一种结构紧凑、效率高的实用型光栅设计思路,为后续工程推广起到了一定的引领作用。

1996年,Francis M. Reininger等研制了一款可见红外热成像光谱仪(Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer, VIRTIS), VIRTIS包含一台以分区光栅为核心色散元件的工作波段为 $0.25\sim 5\mu\text{m}$ 的中等光谱分辨率光谱仪,以及一台使用中阶梯光栅的工作波段在 $1.9\sim 5\mu\text{m}$ 的高分辨率光谱仪,由卡尔·蔡司公司运用全息-离子束刻蚀方法研制^[56]。如图10所示,可见光光栅分两个区域位于光栅基底的内环,红外光栅位于光栅基底的外环。Francis M. Reininger等根据CCD的量子效率和测量光的辐照度优化设计了光栅的槽形结构,优化后的光栅在不同区具有不同的刻线密度,且槽形轮廓和槽形深度也不同。

1998年,JPL的Pantazis Mouroulis等运用电子束光刻技术为美国New Millenium Earth Orbiting项目中的成像光谱仪研制出一款分区闪耀

光栅,其工作波段为 $400\sim 2\,500\text{ nm}$ 。他们在研制该款分区光栅时将整个工作波段分成了两部分,其中 $400\sim 1\,000\text{ nm}$ 波段使用光栅的-2级衍射光, $1\,000\sim 2\,500\text{ nm}$ 波段使用光栅的-1级衍射光,实测得到光栅在全波段的衍射效率在 $20\%\sim 70\%$ ^[57]。

2004年,JPL的Daniel等在先前研究基础上,为NASA火星侦察轨道飞行器上的紧凑型火星侦察成像光谱仪(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM)研制了一款可见-近红外两分区光栅(Viable and Near-Infrared, VNIR)。该光栅同样采用电子束光刻技术进行制作,经测试该款光栅的相对衍射效率优于 90% ,光栅的杂散光和鬼线小于主衍射级次的 5×10^{-4} ,光栅的衍射波前优于 0.25λ 。光栅的实物图和包含不同闪耀角边界区域的光栅槽形原子力测试图^[45],如图11所示。

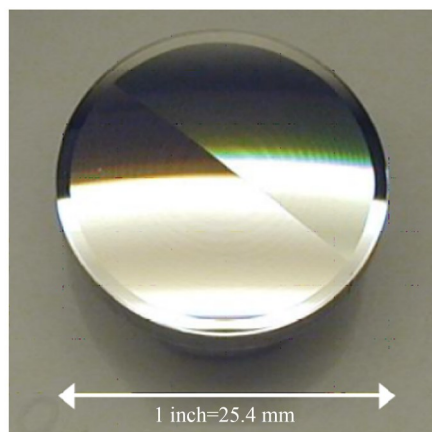


图11 VNIR光栅实物图^[45]

Fig. 11 Physical image of VNIR grating^[45]

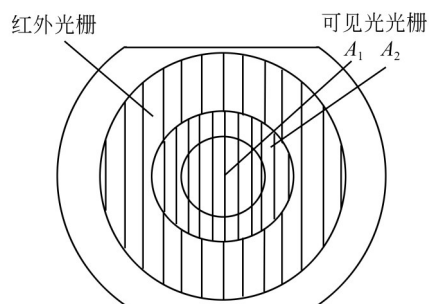


图10 分区光栅结构分布^[55]

Fig. 10 Distribution of segmented grating structure^[55]

2020年,布鲁塞尔自由大学的Gebirie Y. Belay等为可以与手持设备集成的微型低成本光谱仪设计了一款三段式分区闪耀光栅,如图12所示。该光栅能够分析 $300\sim 1\,700\text{ nm}$ 光谱内的散射光,旨在从这些漫反射光谱,例如与光子针接触组织的血液、氧合和脂质含量中分析出组织特性,并给出实时反馈。该款分区光栅的前两部分覆盖了从紫外波段到可见和近红外波段的光谱范围,而第三部分覆盖从 $830\sim 1\,700\text{ nm}$ 的短波红外光。该光栅使用刻划法制作,实验结果表明,在红外波段其衍射效率相比单段光栅提高了

至少 2 倍,大幅提高了光谱仪的分辨率和信噪比^[58]。这一研究成果有助于制造紧凑和低成本的光谱仪,并有望与平板电脑和智能手机等手持设备集成。

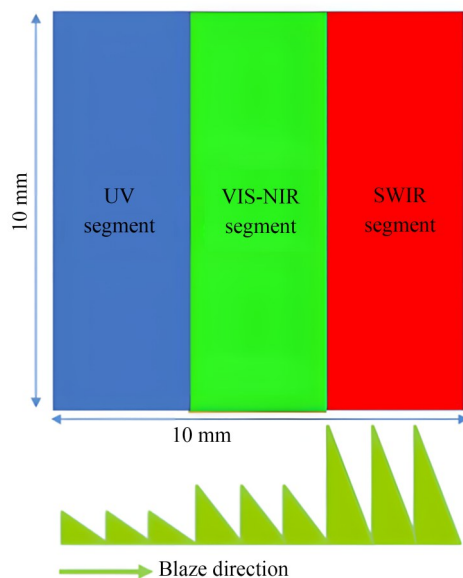


图 12 三段式分区闪耀光栅原理^[58]

Fig. 12 Principle of three-segment partitioned blazed grating^[58]

2023 年,Heidi Ottevaere 等提出了一种分区凹面光栅,并在 Zemax 软件中对光栅进行了优化设计^[59]。分区凹面光栅如图 13 所示,该分区凹面光栅的工作波段覆盖 400~1 520 nm,测试结果表明,其在可见光通道的平均光谱分辨率为 1.6 nm,在近红外通道的平均光谱分辨率为 3.1 nm。该光栅在 400~790 nm 的设计光谱内衍射效率大于 50%,在 760~1 520 nm 内的衍射效率高于 40%,在 900~1 520 nm 内的衍射效率高于 50%,且光谱

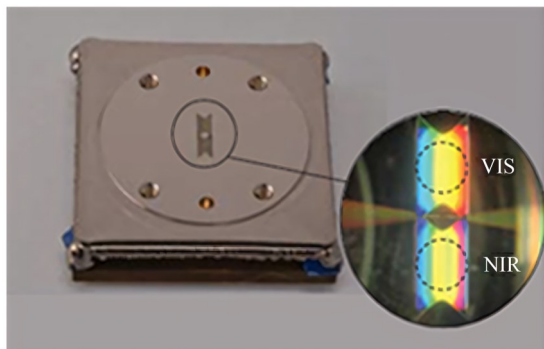


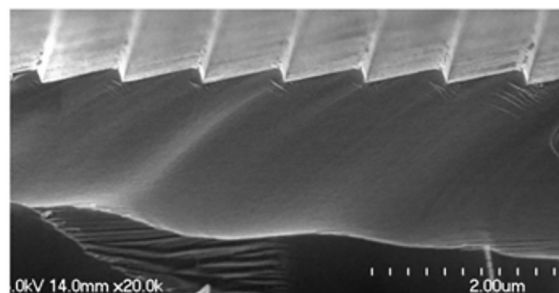
图 13 分区凹面光栅^[59]

Fig. 13 Partitioned concave grating^[59]

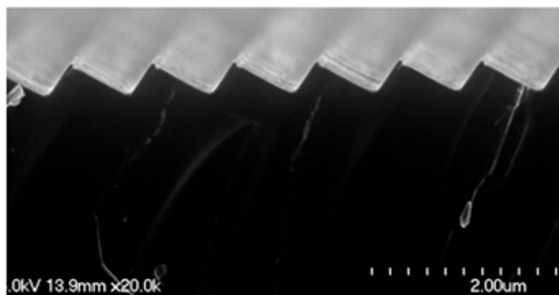
仪的整体光学分辨率误差小于 7%。

4.2 国内研究进展

2013 年,苏州大学的刘全等设计了周期为 833 nm,使用波段为 250~1 000 nm 的分区闪耀宽波段光栅。团队采用 RCWA 方法对光栅的槽形结构进行了精细优化,最终设计光栅槽形如图 14 所示。图 14(a)为光栅第一部分区域,该区域内闪耀角为 11°,反闪耀角为 72°;图 14(b)为光栅另一部分区域,闪耀角分别为 29°和 56°。随后,研究人员采用全息结合离子束刻蚀技术成功制作了该光栅,实验测试结果表明,所制作的分区光栅两个区域的闪耀角与理论设计值基本吻合,光栅衍射效率的设计值在全波段内超过 40%^[60]。



(a) 11°



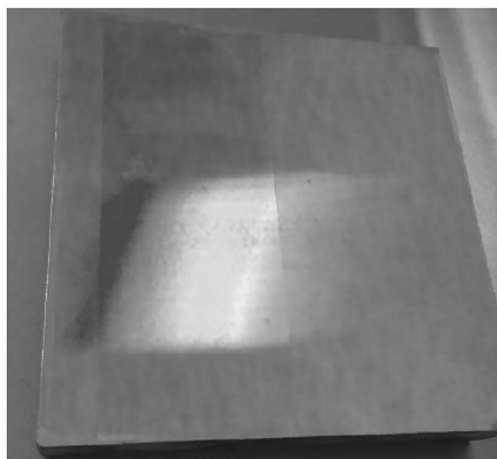
(b) 29°

图 14 分区宽波段双闪耀角光栅^[60]

Fig. 14 Zone-wide broadband dual-blaze-angle grating^[60]

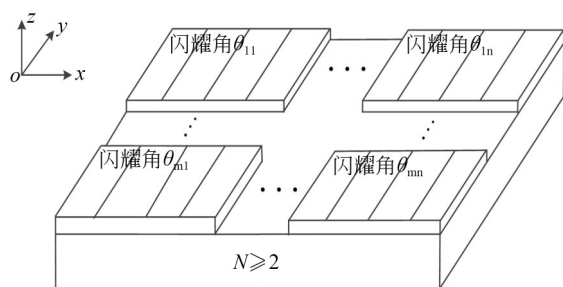
2015 年,长春光机所吴娜等设计了一款使用波段为 200~900 nm 的包括 3 个光栅分区的宽波段闪耀光栅^[61],通过将多个小光栅加权组合形成一个单块光栅,并采用全息-离子束刻蚀法制作了 60 mm×60 mm 的光栅产品。图 15 为三分区宽波段光栅实物,实际测量该光栅衍射效率在 30%~60% 之间,与理论设计结果基本符合。

2017 年,苏州大学朱嘉诚等基于波段为 400~2 500 nm 的成像光谱仪,面对扩宽波段适

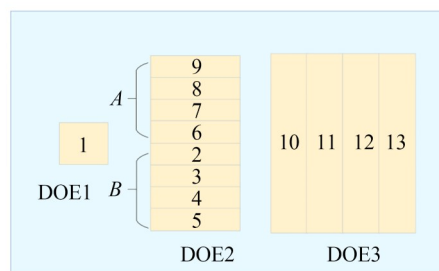
图 15 三分区宽波段光栅^[61]Fig. 15 Three-zone wide-band grating^[61]

应性方面的需求,在单衍射级次和双衍射级次两种色散光路结构下分别设计了一款分区光栅^[62]。测得的衍射效率曲线表明,在双衍射级模式下,这款分区光栅有效提升了仪器的信噪比,并实现仅用一套分光系统完成可见-短波红外的分光任务,展现了其在宽波段分区光栅光谱仪应用中的巨大潜力,对机载乃至星载宽波段独立分光系统设计有一定参考价值和借鉴意义。

2019年,糜小涛等在光栅拼接技术的基础上提出了拼接-复制法制作平面 $N(N \geq 2)$ 分区闪耀光栅,通过 N 块平面闪耀光栅的拼接和复制,来实现平面 N 分区闪耀光栅的制作^[63-64]。该制作方法成品率高,且具有很强的灵活性,不受光栅闪耀角、光栅面积等因素的影响。所制作出的分区闪耀光栅不受调整机构的限制,在存储过程中光栅的位置和姿态不会发生变化,使用过程中也更加灵活和方便, $N(N \geq 2)$ 拼接的分区闪耀光栅如图 16 所示。

图 16 分区闪耀光栅^[63-64]Fig. 16 Partitioned bright gratings^[63-64]

2022年,清华大学曾理江团队提出并研制了一种二维出瞳扩展倾斜表面浮雕光栅,用于提升AR近眼显示系统的成像均匀性与宽光谱效率响应^[65]。该结构由3个不同功能的面型光栅组成:耦合光栅(DOE1)、重定向光栅(DOE2)和出耦合光栅(DOE3),如图 17 所示。其中,DOE1与DOE3分别承担波导耦合与耦合出功能,DOE2用于在波导内部实现二维出瞳扩展,从而增强整个视场方向上的均匀性。在光栅设计方面,该团队通过调控光栅面的局部法向与刻线周期实现波导内全反射传播与均匀分布。DOE1与DOE3基于布拉格条件设计为高衍射效率工作状态,主响应波段覆盖460~620 nm,整体衍射效率超过65%。DOE2则采用锯齿形光栅结构,沿 X 和 Y 方向分别设置不同周期阵列,实现二维光场的定向控制与均匀耦合,从而提升了系统出瞳均匀性。在制造方面,团队采用光刻-反应离子刻蚀工艺在石英基底上实现纳米级浮雕结构加工,形成倾斜面形光栅结构。该研究首次在分区光栅设计中引入二维出瞳扩展机制,突破了传统出瞳扩展光栅在波段兼容性和亮度一致性方面的瓶颈,为下一代高性能AR波导显示系统提供了技术基础。

图 17 衍射光栅波导区域划分^[65]Fig. 17 Division of diffractive waveguide grating regions^[65]

2022年,中北大学的尚琰等提出了一种新型结构的分区光栅^[66],如图 18 所示。该光栅是由两块槽形完全相同的光栅以相反的方向放置并连接,从而实现了光栅+1级和-1级的衍射能量完全对称。该设计避免了光能量在+1级过度集中,同时提升了-1级的衍射效率。此外,他们在两块光栅中间设置了一个无光栅区域以增强0级光的能量,这种设计有助于在使用中更清晰地识别0级和1级衍射光。改进后的光栅在450~1 600 nm

波段内表现出较高的衍射效率,显著提升了系统探测的准确性。

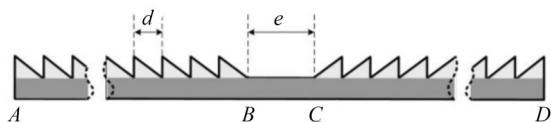


图 18 反向相接光栅^[66]

Fig. 18 Reverse contact grating^[66]

2022年,长春光机所李逸凡制作了一款拼接分区光栅,该款光栅刻线密度为 150 gr/mm,划分为两块光栅分区,采用-1级衍射作为工作级次。该款分区光栅闪耀角分别为 1.1° 和 2.3° ,光栅的闪耀波段覆盖了 200~800 nm,在此波段内的实际衍射效率基本都在 20% 以上^[67]。后续验证表明,通过机械装置拼接后光栅的衍射波前较高,但拼接后光栅波前质量的稳定性仍存在的问题。2025年,逦云赞^[68]等在李逸凡的研究基础上,提出了一种拼接制备宽波段分区闪耀光栅的方法,最终制作了尺寸为 30 mm×60 mm,在 200~1 100 nm 工作波段内衍射波前达到 0.3λ 的宽波段高性能分区闪耀光栅。团队根据各光栅分区拼接时衍射波前差与拼接误差之间的关系,设计了一种具备多维(平移、旋转、倾斜、离焦、曲率)误差修正功能的高稳定性调节装置。图 19 为使用该装置制备的拼接光栅,该光栅采用双闪耀角结构,通过光斑加权平均实现全带宽高效率响应,拼接误差小于 $\lambda/4$ 。实测结果显示,该拼接光栅在衍射波前、稳定性及能量集聚性等方面均达到设计要求,证明了所提结构在长期稳定性与工艺可行性方面的优越性。该研究为实现大尺寸、高一致性、高衍射效率的成像光谱系统关键光栅组件提供了成熟的设备和一套切实可行的解决方案。

2024年,清华大学戴伟等针对传统红外闪耀

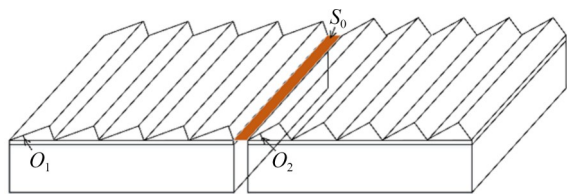


图 19 拼接光栅^[68]

Fig. 19 Spliced grating^[68]

光栅波段覆盖范围有限的问题,提出了一种渐变角度结构的闪耀光栅结构。他们将每条刻线构成一个光栅分区,通过时间变轨迹振动切削(Shaped Vibration Cutting, SVC)方法在金属玻璃(Bulk Metallic Glass, BMG)上成功实现高精度加工^[69]。为了制备该结构,开发了基于三角轨迹实时调控加工,通过精确控制工具振动轨迹与进给方向耦合,使刀具在每一条刻线中逐步形成目标闪耀角变化。这款光栅拥有 $3.7\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 宽工作波段,闪耀角实现了从 $35^\circ\sim 50^\circ$ 的连续变化。这种结构相当于在同一光栅上分区拼接无数具有不同闪耀角的子光栅,该设计突破了传统单一或多闪耀角光栅因数量有限而导致衍射效率分布不连续的问题,制作出的光栅槽形结构如图 20 所示。实测结果表明,该结构在工作波段内衍射效率保持在 20% 以上,有效改善了多闪耀角光栅在波段交界处效率下降的缺陷。该款光栅的研制验证了无缝拼接的“连续闪耀角”结构的可行性,为未来研制空间红外成像光谱仪中使用的大尺寸、高一致性、高稳定性光栅提供了新的结构思路与加工路径。

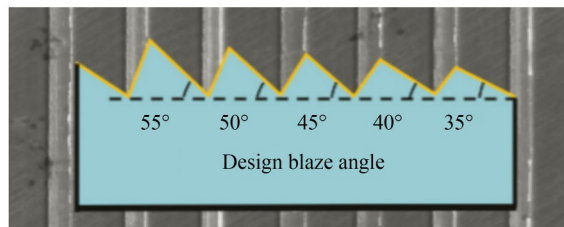


图 20 理论加工角度与 SEM 扫描后的表面形貌^[69]

Fig. 20 Ideal processing angle and SEM surface morphology^[69]

4.3 总结

分区光栅的核心理念是在空间上划分多个子区域,各自采用不同的槽形参数与闪耀角,以实现多波段的高效覆盖和结构紧凑性。其研究经历了从双闪耀角、三分区、多区域拼接到渐变连续闪耀角的发展路径,并不断向高一致性、大尺寸、高衍射效率方向发展。在制备方法上,早期采用传统刻划在基底上刻制不同的闪耀区域,随后全息-离子束刻蚀与电子束光刻的应用进一步提升了制作精度。拼接复制法的发展使得分区光栅设计灵活性得到了进一步的提升,具有代表性的是逦云赞设计的拼接光栅。在结构设计

上,为满足更宽的波段使用需求和不同设备紧凑度的规范,国内外研究人员设计出大量的分区光栅,其中较有代表性的为三分区光栅、 $N \geq 2$ 分区组合光栅、双衍射级混合结构光栅和渐变角度分区光栅等,这些多样化设计进一步的体现了分区光栅巨大的灵活性和实用性。此外,研究人员对分区光栅的探索也从平面光栅发展为凸/凹面光栅,进一步拓展了分区光栅的使用广度。在性能优化上,通过多段拼接与多维误差校正结构设计,有效控制了分区光栅的拼接误差与波前质量,SVC等高精度工艺的发展也进一步保证了分区光栅的精度和波前指标。

总体来看,分区光栅的发展体现为:

(1)结构设计从固定分区结构逐渐演变为渐变角结构,视角从平面光栅拓展到凸/凹面光栅,提升了光谱段间过渡的平滑性与整体响应一致性;

(2)加工方式从整体加工逐步发展出拼接-复制法等组合方案,提升了设计的灵活性,突破了大面积光栅制作瓶颈;

(3)精度优化上新的多维度高精度设计理念和 SVC、高维误差控制等精密技术共同作用,保证了分区间的波前质量。

5 中阶梯光栅

5.1 国外研究进展

目前,机械刻划法是制作中阶梯光栅的主要方法,可以完成深刻槽光栅、槽形要求严格光栅等特殊光栅的制作。机械刻划法制作光栅是采用金刚石刀具对光栅基底上镀制的金属薄膜进行挤压和抛光,从而发生弹塑性变形形成一定刻槽形状的过程^[70]。1955年,G. R. Harrison成功将干涉伺服系统控制技术引入 MIT-A 光栅刻划机^[71],改善了刻划机的精度,提高了光栅的性能。在此基础上,1966年 G. R. Harrison 等研制出世界上刻制面积最大的光栅刻划机 MIT-C 机^[72-73],实物如图 21 所示。此后,G. R. Harrison 与 Stephen W. Thompson 等用 MIT-C 刻划机成功制作出如 340 mm×440 mm 的大面积中阶梯光栅等高水平光栅,为宽波段高分辨光谱系统提供了关键光栅支撑。1972年,G. R. Harrison 使用刻划机刻划出一款工作波段为 200~2 500 nm 的宽波

段反射式中阶梯光栅^[73],其刻线密度约为 79 gr/mm,具有非对称深槽结构,工作级次采用 +1 级衍射,闪耀角设计为高达 82°。刻划后的光栅表面误差小于 $\lambda/5$,整体平均效率维持在 45%~60%。该光栅在结构精度与波前一致性方面表现突出,能有效抑制刻槽余弦误差与表面非均匀性。该工作奠定了机械刻划在大尺寸、高精度中阶梯光栅制备领域的重要地位,也验证了机械刻划法在中阶梯光栅制造中的可扩展性,为后续中红外天文观测、精密光谱测量等领域的宽波段分光系统提供了重要基础。



图 21 MIT-C 刻划机^[72-73]

Fig. 21 MIT-C ruling engine^[72-73]

2014年,美国国家光学天文台的 Kenneth H. Hinkle 等面向近红外高分辨率天文光谱观测,提出并研制了一款应用于 1~2.5 μm 波段的中阶梯反射式光栅^[74]。研究团队针对中红外区域对光栅面形精度与低散射的严苛需求,深入对比了传统刻划、金刚石车削与硅基微加工等多种光栅制造工艺,最终选用了以金刚石车削技术为核心的大面型光栅制造路径。该工艺通过对高稳定性材料进行高精度数控切削,实现了高闪耀角、低杂散、大尺寸反射式中阶梯结构的直接成型。测试结果表明,该类型光栅在工作范围内展现出良好的波前一致性和衍射效率稳定性,适用于在多个红外谱段实现同步观测的高分辨近红外光谱仪。该光栅实现了在宽波段范围内兼顾高色散与高效率的性能要求,适用于天文观测中的多谱线高动态范围探测任务。这款光栅的成功研制明确了中阶梯光栅在宽波段、高分辨、低杂散等关键性能方面的集成优势,为后续中阶梯光栅的制作方式提供了研究重点。

2018年,马里兰大学提出一种基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 材料体系的中阶梯光栅光谱仪^[75],通过EBL技术在 Si_3N_4 层上构建槽形结构,刻蚀出一块能够在 $1.0\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 宽波段实现高分辨率分光的中阶梯光栅,图22为其SEM槽形扫描结果。该光栅通过刻蚀形成深 $3.1\ \mu\text{m}$ 的垂直槽面,然后利用银膜在 $400\sim 20\ 000\ \text{nm}$ 的超宽带反射特性实现对该光栅工作波段的宽光谱覆盖。经检测,该款中阶梯光栅在 $1\ 550\ \text{nm}$ 处的反射率超98%,适用于天文光谱仪等宽场观测场景,其 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 材料体系在近红外波段的低损和工艺兼容性为后续电子束光刻中的阶梯光栅提供了技术支持。

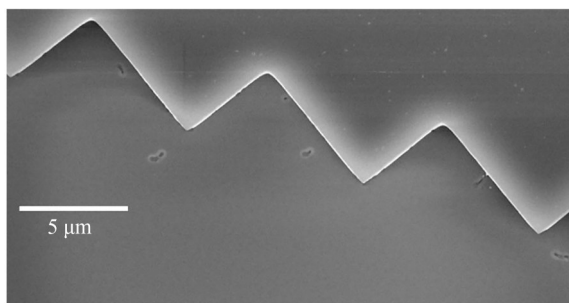


图22 中阶梯光栅的SEM显微镜图像^[75]

Fig. 22 SEM image of echelle grating^[75]

5.2 国内研究进展

我国光栅刻划技术研究始于20世纪50年代末,起步晚但发展较快。2008年底,长春光机所成功研制出CIOMP-6光栅刻划机,如图23所示。该刻划机采用灵活的双压电陶瓷结构,定位精度优于 $3\ \text{nm}$,研制出光栅的效率接近理论值,杂散光小于 10^{-4} 。

2017~2020年,糜小涛、齐向东等使用CIOMP-6为光纤阵列太阳光学望远镜(Fiber Array Solar Optical Telescope, FASOT)的光谱仪制作了一个大面积中阶梯光栅^[76],如图24所示,其槽密度为 $79\ \text{gr/mm}$ 、尺寸为 $300\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$ 。由于FAOST光谱仪要求在二维视场进行实时、高效、高精度的光谱成像偏振测量,因此对该款光栅的质量要求非常高。为此,研究团队开发杂散光空间分布测量方案,通过Littrow条件下的功率积分法,最终测得杂散光强度控制在 10^{-4} 水平,满足宽波段天文观测对低背景噪声的严苛要

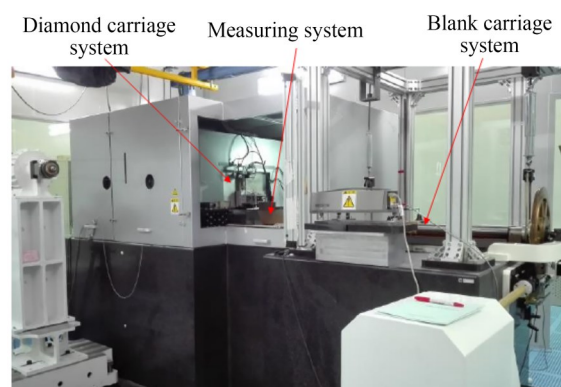


图23 CIOMP-6大型衍射光栅刻划机^[76]

Fig. 23 Large diffraction grating ruling engine CIOMP-6^[76]

求。经测试,糜小涛团队研制出的这款光栅实际分辨率达到理论值的95%,三角槽形闪耀角为 62.598° ,与理论值偏差不到0.1%,在 $516\sim 525\ \text{nm}$ 波段下—43级衍射效率能够达到理论值的90%。此外,该款 $300\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$ 的大面积集成方案验证了机械刻划法在大尺寸中阶梯光栅制备上的优势,推动了宽波段光栅在天体物理观测中的工程化应用,为太阳大气多线光谱偏振测量提供了核心元件。

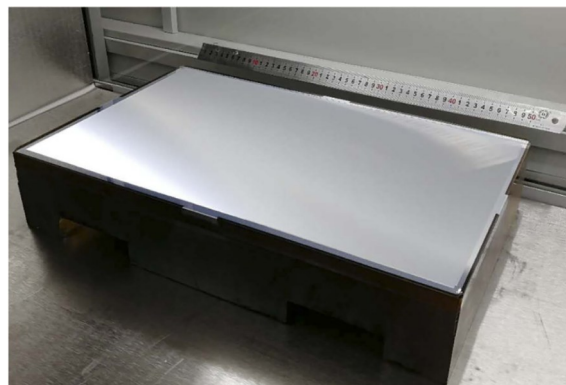


图24 FAOST上的中阶梯光栅实物^[76]

Fig. 24 Physical map of echelle grating on FAOST^[76]

2019年,浙江大学的研究团队采用刻蚀法制作了一款应用在密集波导阵列集成的高分辨率光谱仪中的中阶梯光栅^[77]。该款中阶梯光栅基于硅基平台设计,工作级次为+14级,闪耀角为 63° ,工作波段覆盖 $1\ 484\sim 1\ 554\ \text{nm}$,可实现约 $0.47\ \text{nm}$ 的光谱分辨率。在设计时,研究团队通过引入非等宽高密度波导阵列(Densely Packed

Waveguide Array, DPWA)显著压缩了波导通道间距,在保持高通道密度的同时减小了器件尺寸,器件整体采用标准 CMOS 兼容工艺制备,为大规模低成本片上宽波段光谱仪的工程化提供了重要技术路径。该项工作充分体现了中阶梯光栅在宽带响应、高分辨率和小型集成三者之间的结构优势,特别适合面向近红外通信窗等宽波段集成光谱系统的微型化需求。

5.3 总 结

中阶梯光栅的发展历程紧密伴随着高精度光栅刻划技术的演进,其核心特征在于通过大闪耀角、低刻线密度与高工作级次的协同配置来实现高分辨率与宽波段兼容的光谱响应。从结构设计来看,中阶梯光栅逐步从传统对称三角槽拓展至非对称深槽、金属膜增强结构及新型 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 复合材料平台,推动其在近红外和中红外波段实现更优的反射效率。在制备方式上,自 Harrison 将干涉伺服系统控制技术引入机械刻划机中后,机械刻划技术始终占据中阶梯光栅研制的主导地位,各国为了研制更大尺寸,更高精度的中阶梯光栅,一直对光栅刻划机进行研制。其中代表性的有美国 MIT-C 刻划机与中国 CIOMP-6 刻划机。制作出的典型光栅有 MIT-C 刻划出的采用 79 gr/mm 非对称深槽设计,在 200~2 500 nm 波段内工作的反射式中阶梯光栅;国内 CIOMP-6 刻划机制备的中阶梯光栅在 -43 级工作时衍射效率可达理论值的 90%,且槽形闪耀角误差小于 0.1° 、RMS 形貌误差小于 3 nm。此外,近年来电子束光刻与 CMOS 兼容制程也被引入中阶梯光栅结构构建中,实现了可集成的微型光谱系统开发。相关成果诸如马里兰大学和浙江大学团队分别在 1.0~1.7 μm 和 1 484~1 554 nm 波段内构建出具有高反射率、高分辨率与紧凑结构的一体化光栅模块,为中阶梯光栅向芯片级光谱仪器扩展提供了技术支撑。

总体来看,中阶梯光栅的发展体现为:

(1)结构层面从单一深槽向异形深槽与异质材料构型拓展,支撑更宽波段范围与更高分辨需求;

(2)加工方式从定位精度低的传统刻划演进而为高精度伺服-纳米定位系统支持下的超精密机械刻划和金刚石切削,并辅以电子束光刻与微纳

加工路径,兼顾加工的高效性与多样化;

(3)精度优化方面,结合波前一致性评估模型与多维杂散光抑制机制,实现了在复杂衍射条件下对效率、均匀性与系统兼容性的协同保障。

6 多层介质光栅

6.1 国外研究进展

2003 年,印度理工学院的 Charu Kakkar 等基于阶梯折射率结构设计出了一种具有准闪耀效应的宽带长周期光纤光栅,实现了在 1 550 nm 通信波段内超过 100 nm 的有效带宽^[78]。该研究虽未直接采用传统闪耀结构,但其通过对模间色散特性的控制,实现了功能等效于宽波段闪耀光栅的定向、高效率带通耦合行为,特别适用于光纤通信系统中作为波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)带通滤波器、掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)增益均衡器与偏振相关损耗补偿器等集成器件使用,展现出闪耀光栅原理在通信光纤器件中的拓展应用潜力。

2008 年是宽波段介质光栅设计的里程碑年份。德国蔡司公司 B. H. Kleemann 团队提出效率校正衍射光学元件(Efficiency Adjustment-Diffractive Optical Element, EA-DOE)框架,利用材料间的色散差异主动抵消相位延迟的波长依赖性,设计了梯度折射率、切割粘贴策略等方法,在 400~800 nm 光谱内实测光栅的衍射效率大于 97%,该项研究也证明效率普适性仅依赖材料二阶 Cauchy 色散特性^[79]。

2009 年,荷兰 Twente 大学的 Helmut Rathgen 与 H. L. Offerhaus 等基于 RCWA 方法系统研究了高折射率材料在介质衍射光栅设计中的应用,提出了一系列具有高衍射效率与宽带响应能力的光栅结构。研究涵盖反射型、浸没式透射型及传统背面刻蚀透射型 3 种典型光栅配置^[80]。结果表明,利用折射率高达 2.4 的介质材料(如 TiO_2 , ZrO_2 等)替代传统 SiO_2 材料,使光栅在保持 Littrow 结构高色散特性的同时实现更大的带宽。此外,他们还指出在传统透射光栅设计中,通过构造埋层式双层结构可以使光栅获得更高的衍射效率。光栅衍射效率结果如图 25 所示,加入掩膜高折射率层后可获得几乎 100% 的峰值效率和

优异的宽带响应特性。该项研究对高功率超快激光系统、宽带光谱成像等领域具有重要应用参考价值。

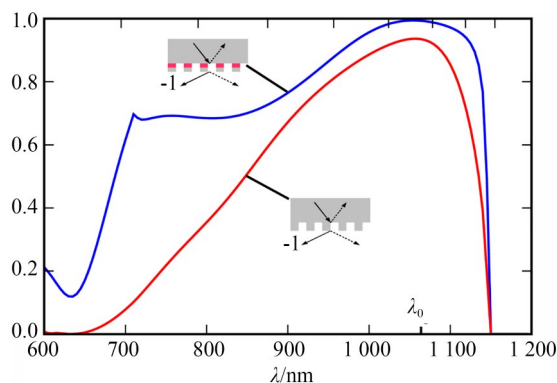


图 25 经典透射光栅和加入掩膜高折射率层的介质透射光栅的光谱特性^[80]

Fig. 25 Spectral characteristics of classical transmission grating and dielectric transmission grating with high-refractive masking layer^[80]

2009 年,美国科罗拉州立大学 Martz^[81]等设计了一款用于高能激光脉冲压缩的大面积高效宽带介质光栅(Multi-Layer Dielectric,MLD),如图 26 所示。制备该光栅时,首先,在多层介质膜堆叠层表面旋涂光刻胶,并利用氦离子激光进行干涉曝光。随后,对样品进行烘烤以硬化光刻胶。然后,将石英基底置于反应离子束刻蚀设备中,采用 $\text{CHF}_3/\text{Ar}/\text{O}_2$ 混合气体将光刻图形转移到基底形成亚微米级光栅槽结构。最终,利用扫描光度计在全口径范围内测试其性能。测试结果表明,该光栅的周期为 1 740 line/mm,能够在 780~820 nm 波长内工作,且在 800 nm 处 -1 阶衍射效率优于 97%。在激光压缩能力上,测得该光栅对钛宝石激光器输出的脉冲压缩效率超过 80%,表明制备工艺具有良好的一致性与可重复性。

2014 年,匈牙利 ELI-HU 研究中心的 Zoltán Várallyay 与 Péter Dombi 团队提出了一种基于介质共振增强机制的超宽带高效率光栅结构设计方案^[82]。该设计通过引入多重相位调控机制,在多个波段形成共振增强,实现对超短脉冲频谱范围的全覆盖,从而突破了传统介质光栅受限色散匹配的窄带局限。如图 27 所示,该光栅结构由

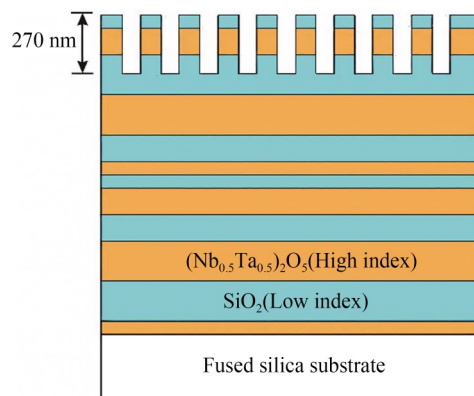


图 26 MLD 光栅结构层^[81]

Fig. 26 MLD grating structure layer^[81]

TiO_2 构成的填充因子与下方多层 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 共振反射层组成,在保持高衍射效率的同时显著拓展了色散补偿带宽。相比常规高反膜或单层光栅结构,该光栅在材料折射率匹配、结构周期与膜层厚度方面引入多参数协同优化,在保证介质光栅高损伤阈值特性的同时,实现了宽波段响应与大角度容差的兼容,解决了宽带激光脉冲压缩系统中对高效率介质光栅的关键性能需求问题。

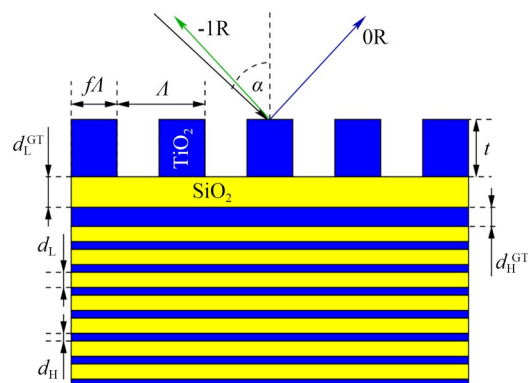


图 27 光栅结构,包括二氧化钛(暗区域)和二氧化硅(亮区域)^[82]

Fig. 27 Grating structure, including TiO_2 (dark regions) and SiO_2 (light regions)^[82]

2019 年,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室^[83]设计了具备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 四层膜和矩形槽结构的低损耗宽波段光栅,他们提出一种低分散无共振设计和抗费米激光损伤折射率。在制备工艺上,采用电子束光刻结合反应离子刻蚀,使得槽深精度控制在 5 nm,保障了光栅结构的高一致

性。测试表明,在 800~1 100 nm 波段下光栅—1 级衍射效率大于 96%,解决了传统金属光栅色散非线性问题。该光栅适用于高平均功率激光系统,对 10 ps 脉冲的激光损伤阈值达 1.2 J/cm^2 ,兼具高效性与稳定性,能大幅提高激光系统的平均功率处理能力。其应用主要包括超短脉冲压缩和高功率光谱合束,能够为国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)等大型强激光装置的光栅研发提供关键技术支撑,推动了高功率宽波段激光系统的性能提升。

2020 年,德国哈默-利普施塔特应用科学大学的 Oliver Sandfuchs 团队提出了一种结构紧凑的金属闪耀光栅^[84]。该光栅通过复合结构实现宽波段的光谱工作能力,采用金属锯齿状基底作为光栅底层介质,通过材料色散参数协同优化,将双闪耀结构高度控制在 $1\sim 2 \mu\text{m}$,并在 450~1 600 nm 波段内获得高衍射效率。金属双闪耀光栅的截面如图 28 所示。团队采用高低色散材料组合的设计,从而使波段外的效率波动小于 5%,并引入梯度折射率过渡层抑制界面反射,实现在 150 nm 带宽范围内效率超 80%。该设计突破传统单闪耀光栅的波段限制,为光谱仪、超短脉冲压缩等场景的宽波段光栅提供了从理论到工艺的完整解决方案。

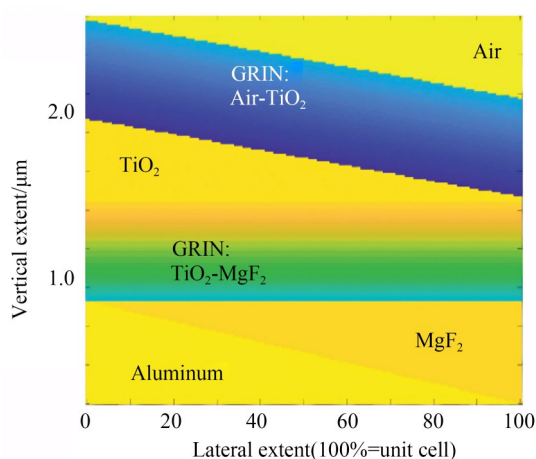


图 28 金属双闪耀光栅的截面^[84]

Fig. 28 Cross section of metal double-blazed grating^[84]

6.2 国内研究进展

2010 年,上海光机所汪剑鹏,晋云霞等设计了一款效率高于 90%,带宽达到 200 nm 的矩形

金属-介质膜光栅(Metal Multilayer Dielectric Grating, MMDG)^[85]。光栅结构中反射膜层使用了银膜和氧化硅/氧化铅材料,匹配层使用了低折射率的氧化硅,矩形槽设计在氧化铅层中。图 29 为其衍射效率随工作波长变化的曲线,经测试,该款光栅中心波长为 1 053 nm,在 200 nm 带宽内的平均衍射效率超过 97%。该研究不仅证明了多层介质矩形光栅在宽波段中的优势,更为后续基于高折射率介质材料的宽带衍射元件设计提供了重要实验依据与工程借鉴。

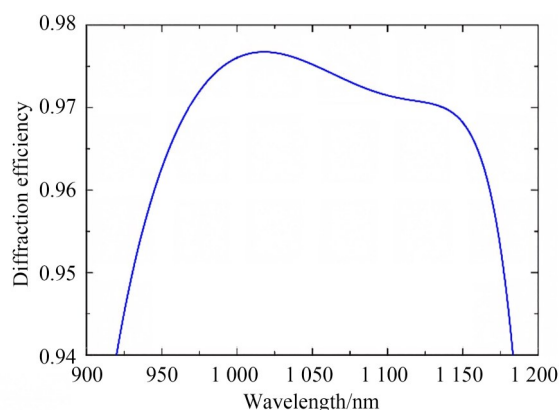
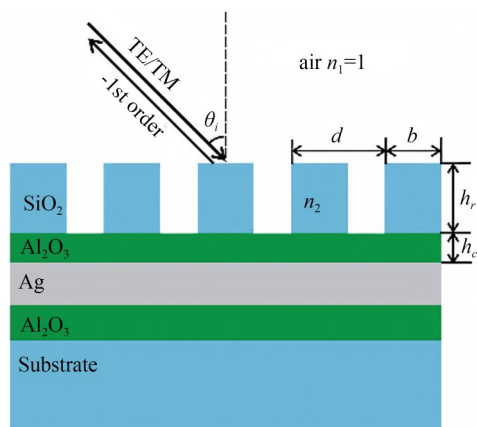


图 29 MMDG 衍射效率曲线^[85]

Fig. 29 MMDG diffraction efficiency curve^[85]

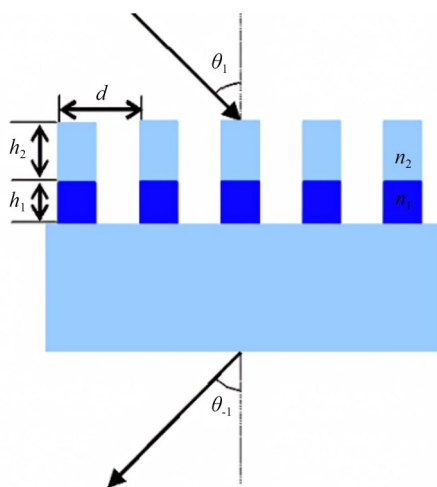
2012 年,上海光机所周常河团队提出一种宽带混合金属介质反射光栅设计方法^[86],其结构如图 30 所示。该光栅的顶层介质光栅层采用氧化铝,通过矩形槽结构实现光栅的相位调控;底层高反射镜由银膜与氧化铝连接层组成,通过电子束蒸发技术沉积,解决了金属膜与介质层的界面应力问题。该研究针对钛蓝宝石激光系统及光通信领域的宽波段需求,建立了双模式相位差累积理论,通过控制光栅深度与银膜厚度,使两种偏振模式在层间产生交替的相位差累积。同时,结合 RCWA 与模拟退火算法,在 740~860 nm 的工作波段下,TE 和 TM 偏振的衍射效率均大于 90%。在中心波长 800 nm 处,TE 和 TM 偏振的峰值效率分别达到 96.2% 和 95.8%,较传统银光栅提升 30% 以上。这项研究为宽波段激光系统提供了集成化解决方案。

2013 年,广东工业大学的周金云^[87]团队提出了一种低偏振依赖、宽带高效率的双层透射光栅结构。如图 31 所示,该光栅为 Ta_2O_5 与 SiO_2 两种

图 30 混合金属介质反射光栅结构^[86]Fig. 30 Mixed metal medium reflective grating structure^[86]

材料构成的双层介质光栅。团队通过模态耦合机制有效提升了 TE 与 TM 偏振下的一致性衍射性能。研究采用模态分析法与 RCWA 数值优化相结合,使光栅在 Littrow 条件下于 1 514~1 650 nm 波段内实现 -1 级衍射效率超过 95%。该光栅不仅充分利用了双层材料间的折射率以控制偏振相位差,还在实际测试中表现出良好的制造容差稳定性,在工艺参数轻微波动条件下依然保持高效率。同时,在 39.07°~50.64° 的入射角范围内其效率仍优于 95%,具备良好的角度适应性,适用于密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)等多角度通信系统场景。

2015 年,中国科学技术大学付绍军^[88]团队为

图 31 具有偏振特性的宽带双层介质光栅^[87]Fig. 31 Wideband two-layer dielectric grating with polarization dependence^[87]

满足强激光系统中大尺寸镀金光栅对槽深均匀性的要求,采用梯形光栅-涂胶-离子束溅射镀膜和全息光刻-离子束溅射镀膜两种方法,分别制作了 740 gr/mm,槽深为 210 nm 的宽带镀金正弦光栅。在 750~850 nm 内其 -1 级衍射效率大于 87%,最高可达 90%。这两种方法易控制光栅槽深,去掉光刻胶后基底可继续使用,且制作的光栅衍射效率和带宽能满足国内一般宽带镀金脉冲压缩光栅的使用要求。

2015 年,清华大学曾理江课题组的陈会^[89]聚焦于满足啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)系统需求的宽带脉冲压缩光栅,研究内容涵盖 MMDG 和后镀膜光栅两类新型结构,如图 32 所示。MMDG 光栅的制作是利用离子束刻蚀工艺将掩模结构转移到基底上,这一过程需去除多余材料,是减法工艺。后镀膜光栅的制作需要在裸光栅基底上镀膜,即将金属材料与介质膜材料按一定次序叠加到基底上,属于加法工艺。在 MMDG 的研究中,陈会首先针对上海光机所提供的光栅设计参数开展了工艺容差分析,然后建立了掩模参数不敏感的刻蚀监测模型,实现了对槽深的高精度控制。最终制备的光栅在 705~874 nm 内的衍射效率均大于 90%,且平均效率为 93.71%,并在 810 nm 处获得了 95.1% 的峰值效率,证明了其宽带与高效率特性。在后镀膜光栅方面,通过电子束蒸发与离子束溅射工艺完成金属膜和多层介质膜的沉积,并结合扫描电镜图像提出了唯象槽形演变模型,为后续镀膜光栅的优化设计提供了理论工具。在优化设计后,制备的光栅在 755~855 nm 内衍射效率大于 90%,其中 755~845 nm 区间的平均效率为 93.21%,在 785 nm 处峰值效率达到 95.7%。与 MMDG 相比,后镀膜光栅在损伤阈值提升与工艺简化方面更具优势,其较好的工艺适应性表明该类光栅在未来大口径脉冲压缩系统中具有应用潜力。

2017 年,上海光机所晋云霞团队又提出全介质双层脊结构光栅^[90],如图 33 所示。通过 HfO₂/SiO₂ 双层光栅脊的协同相位调控,该光栅可在 1 010~1 080 nm 工作波段内, -1 级衍射条件下获得超过 95% 的衍射效率的优异特性。该设计基于简化模态分析法构建双模式相位差,引入多

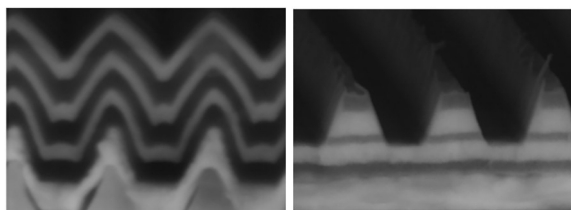


图 32 后镀膜光栅的电镜图及 MMDG 光栅的电镜图^[89]
Fig. 32 Electron microscope image of post-coated grating and MMDG grating^[89]

参数优化算法,解决了多层刻蚀的精度敏感问题。该双层介质光栅通过全介质结构替代传统金属-介质复合光栅,在光谱束组合系统中实现 8 束激光的高效合成,为高功率激光系统的宽波段分光提供了低损耗、高耐受性的解决方案。这种基于材料折射率匹配与多层膜系设计的工艺,反映了当前宽波段光栅制造从单一结构向复合功能体系的拓展趋势。

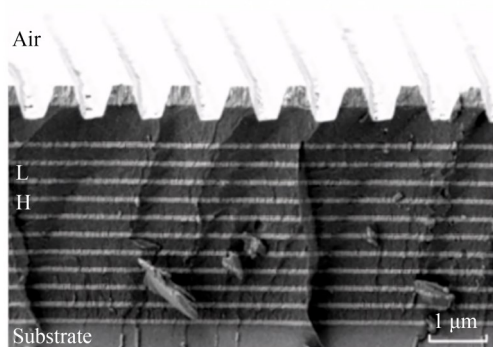


图 33 全介质双层脊结构光栅(阴影层为 HfO_2 , 白色层为 SiO_2)^[90]
Fig. 33 Full-media double-layer ridge structure grating, with shadow layer being HfO_2 and white layer being SiO_2 ^[90]

2021 年,暨南大学谢永芳提出基于 3 层介质矩形槽的超宽带透射光栅设计^[91],如图 34 所示,通过 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3 层光栅脊结构的相位协同调控,突破传统单一层状光栅的带宽限制,建立了双模式相位差累积模型,利用 RCWA 优化各层厚度与周期参数,采用模态干涉实现 1 446~1 641 nm 波段的高效衍射,引入模拟退火算法优化结构参数解决了多层光栅制备中的精度敏感问题。该 3 层介质光栅通过材料组合与结构设计替代传统拼接工艺,为宽波段分光元件提供了集

成化解决方案,在传统的加工工艺上进行创新,利用不同材料间的相位特性完成宽波段光栅的制作,为宽波段闪耀光栅拓展出新的设计思路。

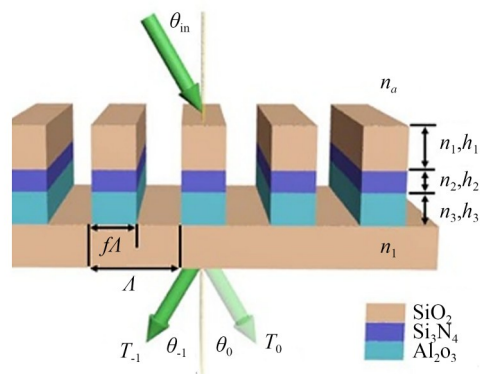


图 34 三层介质矩形槽的宽波段透射光栅^[91]
Fig. 34 Wideband transmission grating with rectangular slots in three-layer medium^[91]

2021 年,同济大学围绕高效率宽波段光束调控元件的迫切需求,提出并系统设计了一种适用于近红外波段的矩形 HfO_2 多层介质衍射光栅结构^[92],基于 RCWA 建立了完整的多层介质光栅仿真模型,并采用遗传算法对关键结构参数(包括槽深、周期、占空比,以及多层膜厚)进行全局优化。最终,设计出的矩形介质光栅采用 HfO_2 和 SiO_2 材料系统,利用高折射率对比与低吸收损耗的协同优势,实现了在 -1 级衍射阶次下超过 96% 的峰值效率,并在整个工作带宽内保持良好的光谱平坦性,表现出宽波段高一致性衍射响应特征。与传统金属闪耀光栅相比,该结构不依赖闪耀角或金属反射增强机制,而是通过多层介质的干涉增强效应提高特定阶次的能量耦合效率,具有更高的激光损伤阈值和更低的杂散光背景,特别适用于对稳定性和高峰值功率密度要求极高的光谱调控场景。此外,该光栅结构具有高度可加工性,适配常规沉积与刻蚀工艺,并具备较强的参数容差稳定性,有利于大面积器件的一致性制备。该研究验证了多层介质光栅在高功率激光系统、超快激光调控装置或宽波段色散模块中的独特优势。

2023 年,上海光机所韩昱行等围绕激光器对超宽带脉冲压缩光栅的迫切需求,提出并研

制了一种适用于 750~1 150 nm 波段的超宽带金光栅结构^[93]。团队依托在高功率激光光学元件的长期积累,首次实现 400 nm 超宽带金光栅的制备,解决了近单周期 100 PW 激光器的核心瓶颈。采用黄金镀层与特定沟槽轮廓设计,严格控制关键结构参数,并结合显影剂浓度与显影时间的精确调控,实现了全局性能的提升。测试表明,该光栅在-1 级衍射阶次下能够实现超过 90% 的衍射效率。此外,通过刻槽结构优化与工艺调控实现超宽光谱范围内的能量耦合增强具备较强的工艺稳定性,利于大面积器件制备,进一步验证了复杂槽型光栅的优越性能。该研究为 100 PW 级激光器的研发提供了关键支撑,在强场量子电动力学(Strong Field-Quantum Electrodynamics, SF-QED)、粒子加速等领域具有独特应用价值。

6.3 总 结

多层介质光栅作为宽波段光栅技术中的重要分支,其核心理念是利用多层高/低折射率介质的相位干涉调控,实现高效率、低损耗、宽带响应的衍射特性。其研究经历了从双层模态控制到多层共振增强、掩膜折射层引入及矩形槽结构等多种形式的发展路径,并在消色差、抗损伤及偏振无关性等多个维度展现出优势。在设计理念上,多层介质光栅通过引入双层/三层材料体系,结合模式相位差调控、材料色散匹配与干涉增强等策略,显著提升了衍射效率的带宽范围,代表性的设计如 Gires-Tournois 型腔结构、多层脊型共振结构及无金属结构矩形槽光栅均实现了 90% 以上效率的宽带响应。在制造工艺方面,电子束光刻、离子束刻蚀与薄膜沉积等技术相结合,实现了 5 nm 级别的结构控制精度,保障了结构参数与相位性能的一致性,如 LLNL 团队基于 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 体系制备的光栅,其在 800~1 100 nm 波段内达到 96% 效率,并具备 1.2 J/cm^2 的高激光损伤阈值,表明其在高功率激光系统中具备极高稳定性。在结构设计上,多层介质光栅已从早期简单周期性单层结构拓展至多层共振型、多模态干涉型及复合波导型结构,不仅在可见光和近红外范围实现宽带高效覆盖,还成功延伸至通信波段、中红外与超快激光压缩系统。代表性研究如同济大学的 HfO_2 多层结构与暨南大学的 $\text{SiO}_2/$

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三层光栅,通过 RCWA 与遗传算法优化,实现了超宽带衍射响应。此外,介质光栅不依赖金属闪耀结构,从根本上避免了金属吸收与低损伤阈值等缺陷,为激光系统中的高功率、高重复频率光束调控提供了全新的元件选择。

总体来看,多层介质光栅的发展体现为:

(1) 结构构型由单层向多层演进,涵盖双层脊型、三层矩形槽型与共振腔增强型等多种结构设计,提升了带宽与衍射效率;

(2) 工艺手段逐步趋于精细化与可量产化,结合电子束/光刻+离子刻蚀+薄膜沉积技术,实现亚 10 nm 级结构控制与大面积一致性制造;

(3) 设计方法从单参数模拟转向多目标全局优化,引入 RCWA、模态分析与遗传算法,实现高效率、低偏振、高容差的系统化设计。

7 结论与展望

7.1 结 论

随着光栅设计理论的发展,为了在宽波段内获得更加优越的光栅性能,国内外研究人员都进行了诸多尝试,上述 4 类宽波段光栅发展至今,其不同特性也被研究人员逐渐挖掘。表 1 列举了 4 类宽波段光栅的主要特点。

随着科学技术的不断进步,产品的紧凑性和复杂性的要求增加,四类宽波段光栅的发展方向如下:

(1) 复杂槽形光栅的槽形结构从双闪耀角光栅逐渐向更加复杂的结构发展,其以结构创新追求极限效率,虽然电子束刻蚀等技术的发展使得光栅的槽形更容易控制,但是复杂的槽形将带来制作难度的增加,大多数复杂槽形光栅仅处于设计阶段,应用在光谱仪器中的主要是由电子束光刻法研制的双闪耀角光栅。

(2) 分区式光栅的结构直观、设计灵活,应用比复杂槽形光栅广泛。机械刻划法、全息-离子束刻蚀法、电子束光刻法和拼接法等均研制出了高性能的分区光栅,并成功应用到航天飞行器搭载的光谱仪器中。此外,目前拼接法制作分区光栅的技术发展迅速,且精度也越来越高,这使得分区光栅的设计灵活度和实际应用能力得到了进一步的提高,目前国内长春光机所、苏州大学团队已在分区光栅工艺上达到国际水平。

表 1 四类宽波段光栅特点及机理总结

Tab. 1 Summary of characteristics and mechanisms of four types of wideband gratings

类型	复杂槽型光栅	分区光栅	中阶梯光栅	多层介质光栅
结构设计	采用多角度、非对称、阶梯型或波导结构槽型	将光栅划分为多个区域,拥有独立槽形与闪耀角	高闪耀角、深槽非对称结构	多层介质干涉结构协同调控相位
宽带机制	复杂槽型引起多模式耦合、共振增强,实现多波长高效率响应	多子区拼接实现带宽覆盖,设计灵活度高	在高阶衍射下,通过非对称闪耀角高色散覆盖宽光谱段	通过材料折射率对比与膜层结构设计,实现低色散宽带响应
制备工艺	电子束光刻、离子束刻蚀、机械刻划	刻划+拼接、全息干涉-离子束刻蚀、电子束光刻、渐变轨迹切削	机械刻划法、电子束刻蚀等	沉积/溅射+刻蚀等复合工艺
性能指标	可实现 85% 以上效率,带宽范围达几百纳米以上,具备良好偏振控制能力	可实现 90% 以上效率,支持多个波段间的拼接,波前误差较小	效率达 45~60%(机械刻划);带宽范围广大	峰值效率>96%,支持高功率脉冲系统,带宽超过 200 nm

(3)中阶梯光栅主要应用刻划方式制作,其大闪耀角、低槽密度的结构特点使它具备在高阶次下实现高分辨率和宽波段覆盖的独特优势。当前中阶梯光栅广泛应用于的天文观测、等离子体发射光谱等领域。随着光栅波前精度控制与杂散光抑制技术的不断进步,未来其在宽波段精密测量、高分辨光谱仪等方向仍将发挥重要作用。

(4)多层介质光栅则在材料体系、结构类型与相位调控机制方面展现出高度的设计自由度与发展潜力。通过引入高折射率差介质、多层膜系结构与模态干涉控制,介质光栅可在维持高衍射效率的同时显著拓展工作带宽,特别适用于高功率激光合束等宽光谱响应场景。与金属反射光栅相比,全介质光栅具有更高的激光损伤阈值、更低的吸收损耗与更强的相位工程适应性,是当前宽带激光与高光强系统的关键分光元件之一。然而,多层介质结构在制备过程中仍面临工艺公差耦合、刻蚀深度控制与界面稳定性等问题,尤其在更大尺寸、非平面或柔性基底应用中,仍需进一步优化材料选型与制造路径。

7.2 展 望

随着先进微纳制造、智能仿真优化与高集成光学设计等相关技术的持续演进,宽波段光栅在结构简洁性、功能多样性与工程可实现性上的独特优势必定会得到更加广泛的发展。未来研究方向如下:

(1)高精度制造与智能设计的融合发展

复杂槽形光栅的结构实现高度依赖微纳尺度下的加工能力,未来应聚焦于高精度成型工艺的优化,以实现复杂曲面槽型的精准复现。同时,借助拓扑优化、深度学习辅助设计与电磁反演等智能算法,有望突破传统参数扫描所面临的设计瓶颈,在衍射效率、色散与带宽之间实现全局最优解,使复杂槽形光栅的精度在多维度得到提升。

(2)波前一致性提升与大尺寸结构实现

分区光栅作为实现宽带响应的设计方案,通过不同区域嵌入多个闪耀角实现对多波段的协同优化的理念,使得其获得了巨大的灵活性。然而,区间过渡处相位不连续所引发的主瓣畸变、杂散光增强等问题,仍限制其在高精度成像场景中的进一步应用。未来研究可结合亚波长缓变过渡结构、区域间相位匹配优化及消杂散设计策略,以提升全区一致性与系统成像质量。此外,面向大视场高通量光谱系统的需求,亟需发展具有高重复性与大尺寸覆盖能力的分区光栅制造工艺,确保结构尺度拓展条件下的性能稳定性。

(3)提升制作工艺与算法反馈

中阶梯光栅凭借其大闪耀角与低槽密度结构优势,可在高衍射级次下实现宽波段高分辨率响应,特别适用于近红外至中红外区域的光谱观测任务。未来研究可聚焦于两方面拓展:一方面,可针对目前最主要的机械刻划法制作中阶梯

光栅,对于大型衍射光栅刻划机的精度仍需进一步分析,如气浮导轨受气压波动的稳定性对刻划精度的影响,气浮导轨的压缩气体对刻划环境的气压、温度和湿度的影响等。因此,有必要对气浮导轨引起的新问题进行研究;另一方面,从控制算法上来看,虽然采用PID反馈的复合控制器能够有效地改善微定位系统的控制性能,拓展系统频宽,但为了更充分地挖掘微定位系统的潜能,有必要对微定位系统引入自适应控制、稳定控制和智能控制等控制算法,并开展相关研究。同时,进一步提升大面积高闪耀角光栅在面形一致性与杂散光控制方面的制造能力,将是其在宽波段遥感、天文观测与精密测量等领域深入应用的关键。

(4)多材料融合与高稳定性结构构建

宽波段介质光栅未来研究可从三个方面推进其性能边界:一是发展以 TiO_2 、 HfO_2 、 Al_2O_3 等高折射率介质为基础的多层结构,通过折射率调控实现模态干涉与相位共振的精准控制,进一步

拓展工作带宽;二是引入高精度低应力薄膜沉积技术与深刻蚀工艺,提高多层界面稳定性与形貌保真度,降低制造敏感性;三是结合热控设计与角度容差优化,使介质光栅在极端环境下仍保持稳定性能。此外,基于新型异质材料、亚波长结构与智能优化算法的协同集成,有望构建具备色散补偿、偏振控制与功率调制等多功能于一体的复合型宽波段光栅器件。

综上所述,宽波段衍射光栅的未来发展需在设计自由度、加工能力与系统匹配性之间建立更加紧密的协同机制,以支撑下一代高分辨、高效率、宽波段光谱系统的关键光学需求。

作者贡献声明:

陈鹏元:论文构思和撰写;
糜小涛:论文中心的提出;
李 烁:论文内容的审核;
江思博:论文格式的校正;
周敬莹:文献调研。

参考文献:

- [1] BABCOCK H D. Bright diffraction gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1944, 34(1): 1.
- [2] LIN H, LI L F. Fabrication of extreme-ultraviolet blazed gratings by use of direct argon-oxygen ion-beam etching through a rectangular photoresist mask [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(33): 6212-6218.
- [3] FERRERAS PAZ V, PETERHÄNSEL S, FRENNER K, *et al.* Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(11): e36.
- [4] LIZON J L, DEKKER J K, MANESCAU HERMANDEZ A R, *et al.* A large mosaic echelle grating for ESPRESSO spectrograph [C]. *Optical and Infrared Interferometry and Imaging VI*. June 10-15, 2018. Austin, USA. SPIE, 2018: 98.
- [5] WILSON D W, MAKER P D, MULLER R E, *et al.* Recent advances in blazed grating fabrication by electron-beam lithography [C]. *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IV*. San Diego, California, USA. SPIE, 2003: 115.
- [6] MI X T, ZHANG S W, QI X D, *et al.* Ruling engine using adjustable diamond and interferometric control for high-quality gratings and large echelles [J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19448-19462.
- [7] REUTER D C, SIMON A A, HAIR J, *et al.* The OSIRIS-REx visible and InfraRed spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid bennu [J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(2): 54.
- [8] 沙文, 李江涛, 鲁翠萍. 基于激光诱导击穿光谱技术寻优定量分析土壤中Mn元素[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 514-522.
- [9] SHA W, LI J T, LU C P. Quantitative analysis of Mn in soil based on laser-induced breakdown spectroscopy optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 514-522. (in Chinese)
- [9] JERVIS D, MCKEEVER J, DURAK B O A, *et al.* The GHGSat-D imaging spectrometer [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(3): 2127-2140.
- [10] PIETARINEN J, VALLIUS T, TURUNEN J. Wideband four-level transmission gratings with flattened spectral efficiency [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2583-2588.
- [11] 陈力斯, 胡中文, 邱克强, 等. 光谱巡天科学级紫外光栅的研制 [J]. *中国激光*, 2022, 49(6):

0611002.
CHEN L S, HU ZH W, QIU K Q, *et al.* Development of scientific ultraviolet grating for spectrum survey [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49 (6): 0611002. (in Chinese)
- [12] 陈力斯, 胡中文, 姜海娇. 离面工作条件下光谱仪多光栅槽型优化设计[J]. *天文学报*, 2019, 60 (2): 41-51.
CHEN L S, HU ZH W, JIANG H J. Optimization on the groove profile of off-plane gratings in a multi-grating spectrometer [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2019, 60(2): 41-51. (in Chinese)
- [13] 刘全, 黄爽爽, 鲁金超, 等. 用于飞秒激光制备光纤光栅的相位掩模研制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 844-850.
LIU Q, HUANG SH SH, LU J CH, *et al.* Phase mask for fabrication of fiber Bragg gratings by femtosecond laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (4): 844-850. (in Chinese)
- [14] 陈南滇. 正弦形和矩形浅槽光栅的衍射效率[J]. *光学学报*, 1983, 3(1): 88-92.
CHEN N D. Diffraction efficiency of sinusoidal grating and lamellar one with shallow groove [J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, 3(1): 88-92. (in Chinese)
- [15] KUNTSCHNER H, BUSHOUSE H, KÜMMEL M, *et al.* HST/WFC3 in-orbit grism performance [C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. San Diego, California, USA. SPIE, 2010: 77313A.
- [16] 曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊. 小型宽波段凹面全息光栅单色仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222003.
ZENG J, BAYIN H X G, LI W H. Optimum design of miniature wide-waveband concave holographic grating monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222003. (in Chinese)
- [17] 李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(4): 309-315.
LI X H, YAN CH X. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2 (4): 309-315. (in Chinese)
- [18] LEE K D, AHN S W, KIM S H, *et al.* Nanoimprint technology for nano-structured optical devices [J]. *Current Applied Physics*, 2006, 6: e149-e153.
- [19] WANG J J, DENG J D, DENG X G, *et al.* Innovative high-performance nanowire-grid polarizers and integrated isolators [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11 (1): 241-253.
- [20] 刘立明, 赵国忠, 张果辉, 等. 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39 (3): 0311001.
LIU L M, ZHAO G ZH, ZHANG G H, *et al.* Polarization characteristics of one-dimensional metallic wire-grating polarizer in terahertz frequency range [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (3): 0311001. (in Chinese)
- [21] WEBER T, KÄSEBIER T, KLEY E B, *et al.* Broadband iridium wire grid polarizer for UV applications [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 445.
- [22] WU Y, TANG Y, NI G Q. Design of FUV imaging spectrometer based on crossed Czerny-Turner structure [C]. 2008 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Optoelectronic Instruments*. Beijing, China. SPIE, 2008: 715628.
- [23] 吴雁, 唐义, 倪国强, 等. 一种交叉的切尔尼-特纳型远紫外成像光谱仪[J]. *光电工程*, 2009, 36 (3): 125-129.
WU Y, TANG Y, NI G Q, *et al.* FUV imaging spectrometer based on crossed czerny-Turner structure [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36 (3): 125-129. (in Chinese)
- [24] SAUVAN C, LALANNE P, LEE M L. Broadband blazing with artificial dielectrics [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1593-1595.
- [25] BORUAH B R. Zonal wavefront sensing using an array of gratings [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 202-204.
- [26] EMADI A, WU H W, DE GRAAF G, *et al.* Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a Linear-Variable Optical Filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 489-507.
- [27] YANG T, LI C, WANG Z W, *et al.* An ultra compact spectrometer based on the optical transmission through a micro interferometer array [J]. *Optik*, 2013, 124(13): 1377-1385.
- [28] BYKOV S V, SHARMA B, ASHER S A. High-throughput, high-resolution echelle deep-UV Raman spectrometer [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(8): 873-883.

- [29] CHEN H, GUAN H Y, ZENG L J, *et al.* Fabrication of broadband, high-efficiency, metal-multi-layer-dielectric gratings [J]. *Optics Communications*, 2014, 329: 103-108.
- [30] 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.
- [31] SCHOLL J F, DERENIAK E L, DESCOUR M R, *et al.* Phase grating design for a dual-band snapshot imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(1): 18-29.
- [32] TORR M R, TORR D G. Compact imaging spectrograph for broadband spectral simultaneity [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(34): 7888.
- [33] YIN L, BAYANHESHIG, YANG J, *et al.* High-accuracy spectral reduction algorithm for the échelle spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3574-3581.
- [34] 焦庆斌. 超声强化液固传质动力学模型与硅中阶梯光栅湿法刻蚀技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- JIAO Q B. *The Research on Kinetics Model of Ultrasonic Enhancement on Liquid-Solid Mass Transfer and Technology of Silicon Echelle Grating Fabricated by Wet Etching* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [35] 杨子江, 潘俏, 朱嘉诚, 等. 紫外光刻-湿法刻蚀硅中阶梯光栅的研制[J]. *光学学报*, 2023, 43(13): 1305001.
- YANG Z J, PAN Q, ZHU J CH, *et al.* Fabrication of silicon echelle grating by ultraviolet lithography combined with wet etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(13): 1305001. (in Chinese)
- [36] MI X T, ZHANG S W, YU H Z, *et al.* Using a unique mirror to minimize the effect of ruling engine cosine error on grating performance [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10146.
- [37] 高菲. 离子束刻蚀制作中阶梯光栅研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- GAO F. *Study on Fabricating Echelle by Ion Beam Etching* [D]. Suzhou: Soochow University, 2015. (in Chinese)
- [38] GRAF U U, JAFFE D T, KIM E J, *et al.* Fabrication and evaluation of an etched infrared diffraction grating [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(1): 96-102.
- [39] 糜小涛. 大型衍射光栅刻划机微定位系统控制器设计及光栅衍射波前校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- MI X T. *Controller Design of Microposition System in the Large Diffraction Grating Ruling Engine and Research on Correction Diffraction Wavefront* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [40] BONOD N, NEAUPORT J. Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(1): 156.
- [41] PFEIFFER C, EMANI N K, SHALTOUT A M, *et al.* Efficient light bending with isotropic metamaterial Huygens' surfaces [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2491-2497.
- [42] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- [43] LAAKKONEN P, KUITTINEN M, SIMONEN J, *et al.* Electron-beam-fabricated asymmetric transmission gratings for microspectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(19): 3187-3191.
- [44] DAVID C. Fabrication of stair-case profiles with high aspect ratios for blazed diffractive optical elements [J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 53(1/2/3/4): 677-680.
- [45] BACKLUND J P, WILSON D W, MULLER R E. Structured-groove phase gratings for control and optimization of the spectral efficiency [C]. *Frontiers in Optics 2004/Laser Science XXII/Diffractive Optics and Micro-Optics/Optical Fabrication and Testing*. Rochester, New York. OSA, 2004: DMB6.
- [46] LOCKWOOD R B, COOLEY T W, NADILE R M, *et al.* Advanced responsive tactically effective military imaging spectrometer (ARTEMIS): system overview and objectives [C]. *Imaging Spectrometry XII*. San Diego, CA. SPIE, 2007: 666102-666102-6.
- [47] PIETARINEN J, VALLIUS T. Double groove broadband gratings [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13824-13830.
- [48] ANS S, ZAMKOTSIAN F, DEMÉSY G. Topology optimization of blazed gratings under conical

- incidence [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2024, 41(8): 1531-1543.
- [49] 庄夔, 梁浩明, 张庆英等. 衍射光栅集光效率的研究 [J]. 光学机械. 1980, 1: 74-84.
- ZHUANG K, LIANG H M, ZHANG Q Y. *et al.* Research on the Collection Efficiency of Diffraction Gratings [J]. *Optical Machinery*, 1980, 1: 74-84. (in Chinese)
- [50] RAYLEIGH L. III. Note on the remarkable case of diffraction spectra described by Prof. Wood [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1907, 14 (79): 60-65.
- [51] HUTLEY M C. *Diffraction Grating* [M]. New York: Academic Press 1980.
- [52] ZHANG S W, BAYAN H. Using the compensating effect for Rayleigh anomalies to design a type of broadband mid-IR grating [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7049.
- [53] 张善文, 巴音贺希格. 宽波段金属光栅设计中闪耀波长对光栅异常的补偿效应 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 990-1000.
- ZHANG SH W, BAYIN H X G. Compensating effect of blazed wavelength to grating anomalies in design of broadband metallic diffraction gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (5) : 990-1000. (in Chinese)
- [54] 樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3133-3139.
- FAN SH W, ZHOU Q H, LI H. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (11): 3133-3139. (in Chinese)
- [55] MAKOTO I, MASARU I, TOSHIKI K, *et al.* Infrared spectrophotometers using a double blazed grating [J]. *Spectrosc. Soc. Jpn.*, 1978, 27, 304-310.
- [56] CORADINI A, CAPACCIONI F, CAPRIA M T, *et al.* VIRTIS, visible infrared thermal imaging spectrometer for the ROSETTA mission [C]. 1995 *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Firenze, Italy*. IEEE, 1996, 2819: 1604-1606.
- [57] PAUL D M, RICHARD E M, DANIEL W W, *et al.* Proc. of the Diffractive Optics and Micro-Optics [C]. Pasadena: OSA, 1998: 234-236.
- [58] BELAY G Y, HOVING W, VAN DER PUT A, *et al.* Miniaturized broadband spectrometer based on a three-segment diffraction grating for spectral tissue sensing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106157.
- [59] OTTEVAERE H, SHCHEGLOV A, NIE Y F, *et al.* Miniaturized broadband spectrometers using concave blazed gratings [C]. 2023 *28th Microoptics Conference (MOC)*. September 24-27, 2023. Miyazaki, Japan. IEEE, 2023: 1-2.
- [60] LIU Q, WU J H, CHEN M H, *et al.* The fabrication of the holographic dual-blazed grating [C]. 2013 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Micro/Nano Photonics and Fabrication*. Beijing, China. SPIE, 2013: 90470F.
- [61] 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.
- WU N, TAN X, YU H L, *et al.* Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7) : 1978-1983. (in Chinese)
- [62] 朱嘉诚, 靳阳明, 黄绪杰, 等. 宽波段凸面闪耀光栅优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (11): 1120003.
- ZHU J CH, JIN Y M, HUANG X J, *et al.* Design and optimization of broadband convex blazed grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1120003. (in Chinese)
- [63] 糜小涛, 丛敏, 于宏柱, 等. 一种平面双闪耀光栅的制备方法: CN201711434100.5 [P]. 2019-11-15.
- MI X T, CONG M, YU H ZH, *et al.* A method for preparing a planar dual-shining grating: CN201711434100.5 [P]. 2019-11-15. (in Chinese)
- [64] 糜小涛, 李文昊, 于宏柱, 等. 一种中阶梯光栅拼接方法和系统: CN202110930520.2 [P]. 2022-08-30.
- MI X T, LI W H, YU H ZH, *et al.* A method and system for splicing medium-step gratings: CN202110930520.2 [P]. 2022-08-30. (in Chinese)
- [65] NI D W, CHENG D W, LIU Y, *et al.* Uniformity improvement of two-dimensional surface relief grating waveguide display using particle swarm optimization [J]. *Optics Express*, 2022, 30 (14) :

- 24523-24543.
- [66] 尚琰. 光栅衍射型宽波段大视场二维激光告警图像处理[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- SHANG Y. *Two-dimensional Laser Warning Image Processing with Grating Diffraction, Wide Band and Wide Field of View* [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
- [67] 李逸凡. 三种非典型平面光栅的机械式拼接方法及技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
- LI Y F. *Research on Mechanical Tiling Methods of Three Atypical Gratings* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [68] TI Y Z, MI X T, ZHOU J X, *et al.* Zoned blaze broadband gratings mosaicked using a device made from high-stability special materials[J]. *Optics Express*, 2025, 33(5): 9467-9478.
- [69] DAI W, FENG P F, CHEN Z M, *et al.* Fabrication of angle-gradient echelle grating on metallic glass using shaped vibration cutting with time-varying trajectory [J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 678-691.
- [70] HARRISON G R, ARCHER J E. Interferometric calibration of precision screws and control of ruling engines [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1951, 41(8): 495.
- [71] HARRISON G R, STROKE G W. Interferometric control of grating ruling with continuous carriage advance [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1955, 45(2): 112.
- [72] HARRISON G R, THOMPSON S W. Large diffraction gratings ruled on a commercial measuring machine controlled interferometrically [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1970, 60(5): 591.
- [73] HARRISON G R, THOMPSON S W, KAZUKONIS H, *et al.* 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(6): 751.
- [74] HINKLE K H, JOYCE R R, LIANG M. Astronomical near-infrared echelle gratings[C]. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. Montréal, Québec, Canada. SPIE, 2014: 91514A.
- [75] XIE S J, MENG Y, BLAND-HAWTHORN J, *et al.* Silicon nitride/silicon dioxide echelle grating spectrometer for operation near 1.55 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-7.
- [76] MI X T, QI X D, ZHANG S W, *et al.* High-quality and large-area echelle grating ruled on 500-mm ruling engine for the fiber array solar optical telescope (FASOT) [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 38268-38279.
- [77] MA K Q, CHEN K X, ZHU N, *et al.* High-resolution compact on-chip spectrometer based on an echelle grating with densely packed waveguide array [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-7.
- [78] KAKKAR C, THYAGARAJAN K. Novel fiber design for broadband long period gratings [J]. *Optics Communications*, 2003, 220 (4/5/6): 309-314.
- [79] KLEEMANN B H, RUOFF J. Journal of the european optical society rapid publication [J]. *European Optical Society* 2008, 3: 08015.
- [80] RATHGEN H, OFFERHAUS H L. Large bandwidth, highly efficient optical gratings through high index materials [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4268-4283.
- [81] MARTZ D H, NGUYEN H T, PATEL D, *et al.* Large area high efficiency broad bandwidth 800 nm dielectric gratings for high energy laser pulse compression [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23809-23816.
- [82] VÁRALLYAY Z, DOMBI P. Design of high-efficiency ultrabroadband dielectric gratings [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(25): 5769-5774.
- [83] ALESSI D A, NGUYEN H T, BRITTEN J A, *et al.* Low-dispersion low-loss dielectric gratings for efficient ultrafast laser pulse compression at high average powers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 239-243.
- [84] SANDFUCHS O, KRAUS M, BRUNNER R. Structured metal double-blazed dispersion grating for broadband spectral efficiency achromatization [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2020, 37(8): 1369-1380.
- [85] WANG J P, JIN Y X, MA J Y, *et al.* Design and analysis of broadband high-efficiency pulse compression gratings [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(16): 2969-2978.
- [86] HU A D, ZHOU C H, CAO H C, *et al.* Polariza-

- tion-independent wideband mixed metal dielectric reflective gratings [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (20): 4902-4906.
- [87] WANG B, CHEN L, LEI L, *et al.* Modal analysis and numerical design of wideband two-layer grating with low polarization dependence [J]. *Optics Communications*, 2013, 306: 74-77.
- [88] 毕拉力, 邱克强, 郑衍畅, 等. 宽带镀金正弦光栅 [J]. 光子学报, 2015, 44(04): 177-181.
BI L L, QIU K Q, ZHENG Y CH, *et al.* Fabrication of Broadband Sinusoidal Gold-coated Gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 44(04): 177-181. (in Chinese)
- [89] 陈会. 宽带脉冲压缩光栅研制: 金属—介质膜光栅与后镀膜光栅[D]. 北京: 清华大学, 2015.
CHEN H. *Broadband, High-Efficiency Gratings for Laser Pulse Compression: Metal-Multilayer Dielectric Gratings and Metal-Multilayer-Dielectric Coated Gratings*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [90] LI L X, LIU Q, CHEN J M, *et al.* Polarization-independent broadband dielectric bilayer gratings for spectral beam combining system [J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 97-103.
- [91] XIE Y F, JIA W, SUN P, *et al.* Ultra-broadband polarization-independent high-efficiency transmission grating based on three-layer dielectric rectangle groove [J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(7): 075606.
- [92] XIE L Y, ZHANG J L, ZHANG Z Y, *et al.* Rectangular multilayer dielectric gratings with broadband high diffraction efficiency and enhanced laser damage resistance [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2669-2678.
- [93] HAN Y X, LI Z Y, ZHANG Y B, *et al.* 400nm ultra-broadband gratings for near-single-cycle 100 petawatt lasers [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3632.

作者简介:



陈鹏元(2001—),男,吉林辽源人,硕士研究生,2023年于中国石油大学(华东)获得学士学位,主要研究方向为光栅衍射波前误差校正、衍射光栅制作等。E-mail: chenpengyuan23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



糜小涛(1988—),男,山东滕州人,博士,研究员,2018年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光栅刻划机、刻划光栅和光学精密仪器等方面的研究。E-mail: mixiaotao@ciomp.ac.cn