

文章编号 1004-924X(2015)07-1978-06

宽波段全息-离子束刻蚀光栅的设计及工艺

吴 娜*, 谭 鑫, 于海利, 张方程

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:设计和制作了一种在同一基底上具有多闪耀角的宽波段全息-离子束刻蚀光栅。提出了组合形成宽波段全息-离子束刻蚀光栅的分区设计方法,优化了 3 种闪耀角混合的宽波段全息光栅设计参数,并利用反应离子束刻蚀装置对该光刻胶掩模进行刻蚀图形转移,采用分段、分步离子束刻蚀技术开展了获得不同闪耀角的离子束刻蚀实验。最后在同一光栅基底上分区制作了位相相同,并具有 9°,18°,29° 3 个不同闪耀角,口径为 60 mm×60 mm,使用波段为 200~900 nm 的宽波段全息光栅。衍射效率测试结果显示其在使用波段的最低衍射效率超过 30%,最高衍射效率超过 50%,实验结果与理论计算结果基本符合。与其它方式制作的宽波段光栅相比,采用宽波段全息-离子束刻蚀光栅不但工艺成熟,易于控制光栅槽形,而且光栅有效面积尺寸较大,便于批量复制。

关键词:全息光栅;宽波段光栅;离子束刻蚀;刻蚀模拟

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1978

Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings

WU Na*, TAN Xin, YU Hai-li, ZHANG Fang-cheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: chinagrating_wuna@126.com

Abstract: A broadband holographic ion beam etching grating with three different blazed angles was designed and fabricated on the same substrate. A new divisional design method for the broadband holographic ion beam etching grating was proposed and the design parameters for the grating were optimized. A reactive ion beam etching equipment was used in the pattern transfer of photosensitive resist and the divided and stepped ion beam etching technology was used in the experiment. Finally, a broadband holographic ion beam etching grating with a diameter of 60 mm×60 mm worked at 200—900 nm was fabricated on a K9 substrate, which has the same phase but three different blazed angles of 9°,18° and 29° on different areas. The experimental results show that the lowest and the highest diffraction efficiencies of holographic ion beam etching grating are higher than 30% and 50%, respectively in the broadband of 200—900 nm, which is well in agreements with that of the theoretical calculation and meets the

收稿日期:2015-01-07;修订日期:2015-03-17.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ120023)

design requirements. As compared with other fabricating methods for grating, the proposed method is characterized by controllable groove shapes, larger sizes and to be easy for bulk fabrication.

Key words: holographic grating; broadband grating; ion beam etching; etching simulation

1 序 言

光谱仪器是测量、分析和处理物质结构和成分的基本设备,按光谱范围可分为真空紫外光谱仪、紫外-近红外光谱仪和红外光谱仪。光谱仪主要由光源、分光系统和接收系统3部分组成^[1-4]。其中分光系统是光谱仪器的主体,而衍射光栅(以下简称光栅)是分光系统的核心部分,它使复色光发生空间分离形成光谱。因此,光谱技术的进步及发展与光栅制造技术水平息息相关。

根据光谱仪器的工作原理,光栅在较宽的波段范围都有较高的衍射效率(衍射光能量与入射光能量之比),同时整个衍射效率曲线比较平滑,这是光栅制造领域始终追求的目标之一。而相较于单闪耀角光栅,宽波段光栅在光谱分析领域具有更独特且不可替代的优势,其光谱更宽,能满足多种光谱仪全波段使用的需求,使成像探测器更加简单。另外,同一块光栅具有多个闪耀角使仪器结构更简单、使用更便捷,不但减小了光谱仪器的体积也降低了设备成本。

目前,国内外主要采用机械刻划和电子束刻蚀两种工艺制作微结构不同的宽波段光栅^[5-6]。20世纪70年代末,科研人员通过光栅刻划机刻制出一种可以代替多块光栅的中红外(刻槽密度在100 gr/mm以下)宽光谱范围的双闪耀光栅^[7-10]。这种光栅具有两个闪耀角,对应两个闪耀波长,闪耀角的选择原则是既要照顾两端的能量,又不使中间波段所对应的能量过低。在刻划双闪耀光栅的过程中需要两个闪耀角,两个闪耀面长度以及槽顶角等参数,由于双闪耀光栅的衍射效率对上述各参数的变化非常敏感,所以这些参数只能在很窄的范围内选取,而满足设计要求的工艺重复性极低,因此双闪耀光栅制作难度大,工艺上很难实现。1998年,美国加州理工学院的喷气动力实验室(JPL)通过优化光栅槽形研制了一种凸面双闪耀光栅^[11-12]。与前文所述的双闪耀光栅不同,它的两个闪耀角依次分布在两种刻槽

上,在0.4~2.5 μm波段的-1级衍射效率大约为20%~55%。2004年,JPL进一步改进了光栅槽形^[13],通过SGG优化设计方法设计了一种新型的宽波段光栅。这种光栅具有单一槽形,在0.4~2.5 μm波段的-1级衍射效率大约为35%~40%。2008年,芬兰Joensuu大学Juha等人在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,在300~800 nm波段的衍射效率可达60%^[14]。JPL和芬兰Joensuu大学制作的宽波段光栅都采用了电子束刻蚀法,通过制作复杂的光栅槽形来消除光栅异常。这些光栅虽然具有较宽的光谱范围和相对较高的衍射效率,但是存在两点不足:(1)光栅无法复制,其主要原因是槽形复杂或深宽比较大,复制时槽形会变形或塌陷,从而导致光栅无法批量生产;(2)可制作光栅口径较小且有鬼线,使其应用受到限制。

与机械刻划光栅、电子束曝光光栅相比,全息-离子束刻蚀光栅具有无鬼线、高信噪比、制造周期短、口径大等诸多优点^[15-17]。通过优化离子束刻蚀工艺参数可以在同一光刻胶掩模条件下获得不同闪耀角的光栅,从而使得在同一基底上制作双闪耀或多闪耀角的组合型光栅成为可能。本文提出了一种多闪耀角组合的宽波段全息-离子束刻蚀光栅优化方法,以1 200 gr/mm刻槽密度、200~900 nm的宽波段全息光栅为例进行了槽形优化设计,并与传统方法进行了对比。然后针对同一参数光刻胶掩模可获得不同闪耀角开展了离子束刻蚀实验,获得了稳定可控的工艺参数,并最终制作了3种闪耀角混合的宽波段光栅。

2 宽波段全息光栅设计

本文以光谱为200~900 nm、刻槽密度为1 200 gr/mm、口径为60 mm×60 mm和膜层材料为铝(铝的复折射率引自美国光学学会1995出版的《Handbook of Optical Constants in Solids》)的平面宽波段光栅为例进行设计。在同一基底上

沿栅线垂直方向制作 3 个或 4 个不同角度的闪耀光栅区域,如图 1 所示。为达到全波段高衍射效率且衍射效率分布均匀的目的,基底上的这些不同区域的光刻胶掩模为一次曝光获得,其相位完全一致,故无论如何分区进行图形转移都不影响宽波段光栅的衍射波前。

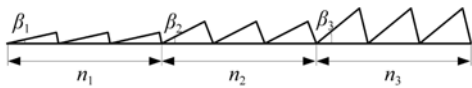


图 1 宽波段全息光栅设计原理图

Fig. 1 Principle of broadband holographic grating design

经优化设计得到所有区域均为三角槽形的宽波段光栅,设计结果如图 2 所示。

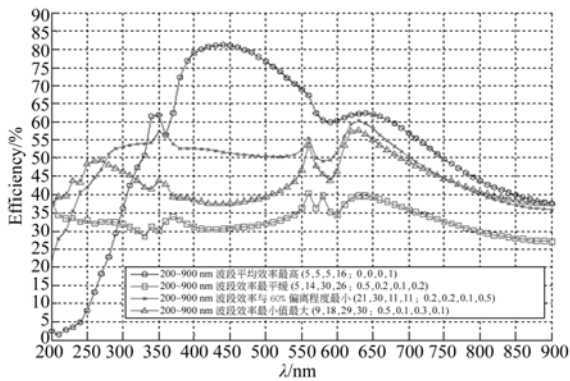


图 2 1 200 gr/mm 宽波段光栅—级衍射效率的理论分析
Fig. 2 Theoretical analysis on diffraction efficiencies of first order light of 1200 gr/mm broadband grating

在 MATLAB 优化过程中,光栅分为四个区,采用了四种优化设计方式:第一,全波段平均效率最高;第二,全波段衍射效率起伏最小;第三,全波段衍射效率与 60% 偏离程度最小;第四,全波段衍射效率最小值最大。其各区闪耀角及权重如表 1 所示。

从图 2 可知,第一、二种优化方式虽然在 300~600 nm 波段具有较高的衍射效率,但在 200~300 nm 波段的衍射效率明显降低;而第三、四种优化方式在 200~900 nm 波段的平均衍射效率较高,符合宽波段光谱仪设计的要求。但从表 1 可知,闪耀角要在 26°~30°,这在图形转移工艺上难度较大。利用长春光机所已有的补偿效应法设计这种宽波段光栅^[18-20]时,发现补偿效应法不适用于 1 200 gr/mm 光栅在 200~900 nm 波段的设计,如图 3 所示。因此决定按照第四种优化方

式制作不同闪耀角的宽波段光栅。

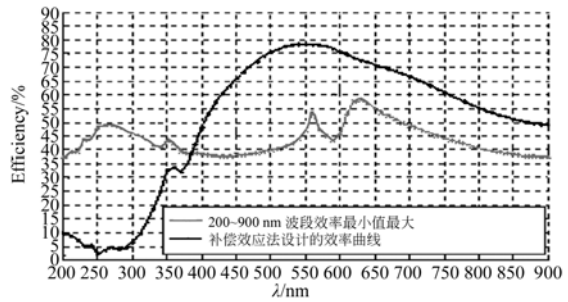


图 3 各区域全部闪耀槽形的衍射效率设计结果
Fig. 3 Diffraction efficiencies of each region's blazed groove

表 1 闪耀宽波段光栅槽形参数设计结果

Tab. 1 Design results of optimum groove geometric parameters for blazed broadband grating

优化方式	项目	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
1	闪耀角/(°)	—	—	—	16
	权重	0	0	0	1
2	闪耀角/(°)	5	14	16	30
	权重	0.5	0.2	0.2	0.1
3	闪耀角/(°)	—	11	26	30
	权重	0	0.6	0.2	0.2
4	闪耀角/(°)	9	18	29	30
	权重	0.5	0.1	0.3	0.1

优化结果中将光栅分为 4 个区域,每个区域有不同的闪耀角,分别为 9,18,29,30°,在实际刻蚀过程中,相邻区域间会存在接缝,虽然不影响衍射波前,但影响衍射效率,所以应尽量控制接缝的面积。相对于无缝情况,此时衍射效率将下降,而 29°与 30°闪耀角的衍射效率差异较小,接缝对于衍射效率的影响大于闪耀角的衍射效率差异,因此,实验将第四种优化方式的区域修正为 3 个,其值如表 2 所示。将区域 3 的闪耀角定为 29°,权重定为 0.4。

表 2 优化方式 4 的结果修正

Tab. 2 Correction for design result of optimization 4

优化方式	项目	区域 1	区域 2	区域 3
4	闪耀角/(°)	9	18	29
	权重	0.5	0.1	0.4

依据表 2 的闪耀角要求,利用 BLAZING 模拟程序^[21]对优化方式 4 的结果进行反应离子束刻蚀参数及掩模槽形优化模拟。表 3 给出了基于

优化模拟和大量实验基础上光刻胶掩模各个区域的反应离子束刻蚀参数要求。

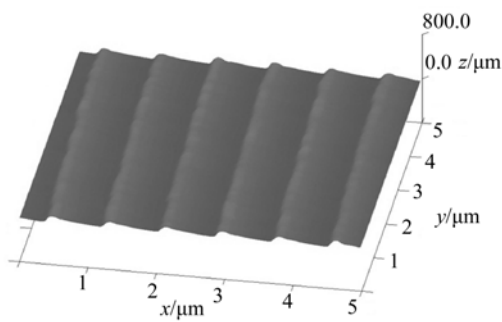
表 3 优化结果 4 所需的反应离子束刻蚀参数

Tab. 3 Parameters of reactive ion beam etching for optimization 4

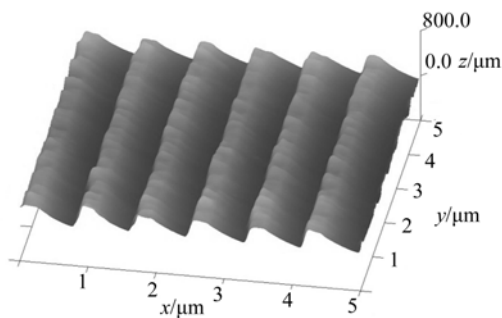
项目	区域 1	区域 2	区域 3
闪耀角/(°)	9	18	29
入射角/(°)	44	44	44
Ar/(mL·min ⁻¹)	8.4	8	4
CHF ₃ /(mL·min ⁻¹)	1.5	1.8	0.9
O ₂ /(mL·min ⁻¹)	4.2	1.8	0
离子能量/eV	300	300	400
束流密度/mA	100	100	100
速率比	5.2 : 1	2.2 : 1	1 : 1

3 实验结果及讨论

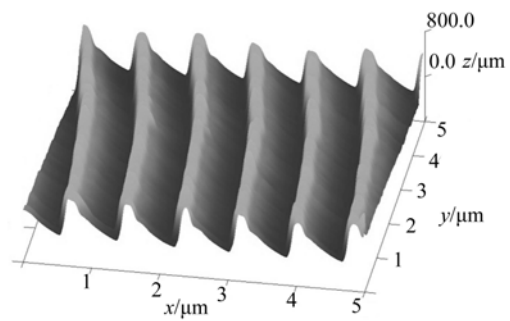
利用阴极灯丝离子源的 KZ-150 型离子束刻蚀机对光栅进行反应离子束刻蚀,获得如图 4 所示的图形转移结果。对 3 个不同区域分别进行 AFM 测试,每个区域测试 10 个点,对测试结果进行算术平均得到表 4。



(a) 区域 1 闪耀角为 9.2°
(a)Blazed angle of 9.2° in region 1



(b) 区域 2 闪耀角为 17.7°
(b)Blazed angle of 17.7° in region 2



(c) 区域 3 闪耀角为 29.2°
(c)Blazed angle of 29.2° in region 3

图 4 优化结果 4 的三个区域闪耀角实验结果
Fig. 4 Blazed angles made by optimization 4

表 4 优化结果 4 图形转移后的槽形测试结果

Tab. 4 Gained grooves after pattern transfer of optimization 4

项目	闪耀角/(°)	非闪耀角/(°)	权重
区域 1	9.2	68	0.51
区域 2	17.7	70	0.08
区域 3	29.2	64	0.38

从表 4 可以看出,槽形参数满足设计要求;而权重由于挡板位置精度和离子束流的衍射作用,与设计值稍有差别。光栅口径为 60 mm × 60 mm,整面光栅中接缝占约 0.03,对于衍射效率的影响不大。

基于具有三种闪耀角的全息离子束刻蚀宽波段光栅优化设计结果,结合离子束刻蚀工艺试验,制作了 1 200 gr/mm 宽波段全息光栅,实物如图 5 所示。

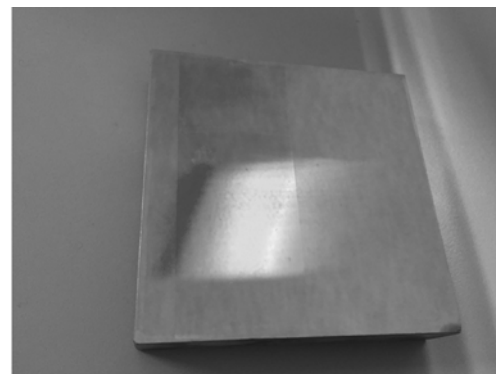


图 5 1 200 gr/mm 宽波段全息光栅外观
Fig. 5 Image of 1 200 gr/mm broadband grating

通过平面光栅衍射效率自动测试仪^[22],使用连续扫描法对优化制作的口径为 60 mm×60 mm 的宽波段光栅进行衍射效率测试,测试波段为 200~900 nm,间隔为 10 nm,测试结果如图 6 所示。

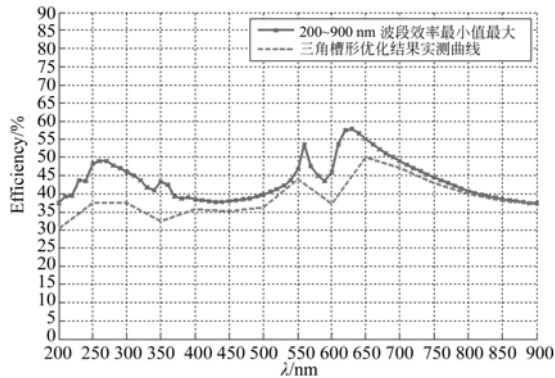


图 6 宽波段光栅衍射效率

Fig. 6 Diffraction efficiency of broadband holographic grating

由图 6 可以看出,以优化方式 4 制作的宽波段光栅的衍射效率较高,与理论值相差不大,200~

900 nm 全波段最低衍射效率超过 30%,最高衍射效率超过 50%,满足光谱仪器行业的需求。

4 结 论

本文提出了在同一基底上分段制作多闪耀角光栅,再加权组合形成宽波段全息-离子束刻蚀光栅的分区设计方法,获得了 3 个区域全是闪耀槽形的宽波段光栅分区优化设计结果。在此基础上通过大量图形转移工艺实验,确定了实现不同闪耀角的离子束刻蚀工艺参数,制作了具有 9, 18, 29° 3 个不同闪耀角,口径为 60 mm×60 mm,使用波段为 200~900 nm 的宽波段全息光栅。通过衍射效率测试,全波段最低衍射效率超过 30%,最高衍射效率超过 50%,达到了国外同类产品的制作水平。

与其它方式制作的宽波段光栅相比,宽波段全息-离子束刻蚀光栅的工艺成熟,不仅易于控制光栅槽形,而且光栅的有效面积较大,可以批量复制,满足光谱仪器行业的迫切需求。

参考文献:

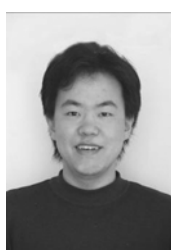
- [1] LOEWEN E G, POPOV E. *Diffraction Gratings and Applications*[M]. New York: Marcel Dekker, 1997.
- [2] 吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [3] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [4] K. H. 塔拉索夫. 光谱仪器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] MASATO O, HISAO K, YOSHIHIKO H, et al.. Optimization of diffraction grating profiles in fabrication by electron-beam lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(27): 5137-5142.
- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] BRUGEL W. *An Introduction to Infrared Spectroscopy*[M]. London: Methuen & Co. LTD., New York: John Wiley & Sons Inc., 1962.
- [9] MAKOTO I, MASARU I, TOSHIKI K, et al.. Infrared spectrophotometers using a double blazed grating[J]. *Spectrosc. Soc. Jpn.*, 1978, 27(4): 304-310.
- [10] 庄夔, 梁浩明, 张庆英, 等. 衍射光栅集光效率的研究[J]. *光学精密工程*, 1980, 1: 74-84.
- [11] ZHUANG K, LIANG H M, ZHANG Q Y, et al.. The study on efficiency of diffraction grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1980, 1: 74-84. (in Chinese)
- [12] 庄夔. 影响衍射光栅集光效率的几个因素[J]. *光学精密工程*, 1979, 2: 1-10.
- [13] ZHUANG K. Several factors that influence efficiency of diffraction grating[J]. *Opt. Precision*

- Eng. , 1979, 2: 1-10. (in Chinese)
- [11] MAKER P D, MULLER R E, WILSON D W, *et al.*. New convex grating types manufactured by electron beam lithography[C]. *Proceedings of the Diffractive Optics and Micro-Optics, Pasadena*: OSA, 1998: 234-236.
- [12] WILSON D W, MAKER P D, MULLER R E, *et al.*. Recent advances in blazed grating fabrication by electron-beam lithography[J]. *SPIE*, 2003, 5173: 115-126.
- [13] BACKLUND J P, WILSON D W, MULLER R E. Structured-groove phase gratings for control and optimization of spectral efficiency[C]. *Proceedings of the Diffractive Optics and Micro-Optics, Pasadena*: OSA, 2004, 10(10):1364.
- [14] JUHA P, TUOMAS V. Double groove broadband gratings[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(18):13824-13830.
- [15] 孔鹏. 平场全息凹面光栅设计方法及制作关键技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.
KONG P. *The research on design methods and key fabricating technologies of flat-field holographic concave gratings* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [16] JOHNSON L F, INGERSOLL K A. Asymmetric triangular grating profiles with 90 degrees groove angles produced by ion-beam erosion[J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20(17): 2951-2961.
- [17] 韩建. 全息光栅曝光光学系统优化及光栅掩模参数控制方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
HAN J. *The research on the lithography system optimization and the grating mask profile parameters controlling in the fabrication of the holographic grating*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [18] 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, BAYANHESHIG. 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)
- [19] ZHANG S W, BAYANHESHIG. Using the compensating effect for Rayleigh anomalies to design a type of broadband mid-IR grating[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(10):7049-7054.
- [20] HUTLEY M C. *Diffraction Gratings*[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [21] 吴娜, 谭鑫, 巴音贺希格, 等. 闪耀全息光栅离子束刻蚀工艺模拟及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9):1904-1912.
WU N, TAN X, BAYANHESHIG, *et al.*. Simulation and experiments of ion beam etching process for blazed holographic grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1904-1912. (in Chinese)
- [22] 于宏柱. 全自动光栅衍射效率测试仪设计[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
YU H ZH. *Design of automatic grating diffraction efficiency testing instrument* [D]. Jilin: Graduate University of Jilin University, 2013. (in Chinese)

作者简介:



吴娜(1983—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,2007年于长春理工大学获得学士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事衍射光学元件精密加工的研究。E-mail: chinagrating_wuna@126.com



谭鑫(1981—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,2003年,2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术的研究。E-mail: xintan_grating@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)