

文章编号 1004-924X(2012)01-0001-08

用于 1 m Seya-Namioka 单色仪的 1 200 lp/mm Laminar 光栅

徐向东*, 刘正坤, 邱克强, 刘颖, 洪义麟, 付绍军
(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要: 针对国家同步辐射实验室燃烧与火焰实验站中 1 m Seya-Namioka 单色仪对光栅的需求, 采用全息离子束刻蚀工艺制作了 1 200 lp/mm Laminar 光栅。首先, 通过光刻胶灰化技术调节光刻胶光栅掩模占空比, 在理论设计的误差允许范围内, 对此光栅掩模进行扫描离子束刻蚀; 然后, 将光栅图形转移到光栅基底中去除残余光刻胶; 最后, 采用离子束溅射法镀制厚约 40 nm 的金反射膜, 采用热蒸发法镀制厚约 60 nm 的铝反射膜。用原子力显微镜分析光栅微结构, 结果显示光栅槽深为 40 nm, 占空比为 0.45。同步辐射在线波长扫描测试结果表明, 镀铝光栅效率明显高于镀金光栅, 获得的实验结果与理论计算结果基本符合。镀金光栅已替代进口光栅在线使用 3 年, 其寿命大大超过复制光栅, 基本满足了燃烧实验站的实验研究需求。

关键词: 单色仪; 衍射光栅; 全息光刻; 离子束刻蚀; 真空紫外

中图分类号: O436.1; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0001

Fabrication of 1 200 lp/mm Laminar gratings for 1 m Seya-Namioka monochromator at NSRL

XU Xiang-dong*, LIU Zheng-kun, QIU Ke-qiang, LIU Ying, HONG Yi-lin, FU Shao-jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and
Technology of China, Hefei 230029, China)

* Corresponding author, E-mail: xxd@ustc.edu.cn

Abstract: To meet the need of 1 m Seya-Namioka monochromator for gratings in the combustion and flame endstation at National Synchrotron Radiation Laboratory(NSRL), 1 200 lp /mm Laminar gratings were successfully fabricated with holographic lithography and ion beam etching. The duty cycle of a resist grating mask was adjusted by resist-ashing, then the resist grating mask was etched in the range of theory design error and its pattern was transferred on a substrate by the scanning ion beam etching method. A gold film with a thickness of 40 nm was coated by ion beam sputtering and an aluminium film with a thickness of 60 nm by evaporating on gratings, respectively, after the rest resist was removed and cleaned. The microstructures of gratings were characterized by an Atomic Force Microscopy(AFM), and results show that the groove depth is 40 nm and duty cycle is 0.45 for the gratings. Synchrotron radiation wavelength scanning were also performed at the exit slit of the combustion and flame endstation, the results indicate that the photon intensity of Al-coated

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10875128)

grating is better than that of Au-coated one which agrees well with the calculated results. The Au-coated grating has been used for experimental investigation for 3 years, furthermore its lifetime has been larger than that of the replica grating.

Key words: monochromator; diffraction grating; holographic lithography; ion beam etching; vacuum ultraviolet

1 引言

在真空紫外和软 X 射线波段,衍射光栅是同步辐射光束线中核心的分光元件^[1]。全息-离子束刻蚀是制作同步辐射光栅的主导方法,用该方法刻蚀衍射光栅首先用全息光刻制作出光栅掩模,然后通过离子束刻蚀将其转移到光栅基片材料中,该方法集中了机械刻划光栅的高效率和全息光栅的无鬼线、低杂散光、高信噪比等优点^[2]。商品化的全息离子束刻蚀衍射光栅基本由国外制造商垄断,如法国的 Jobin-Yvon 公司、德国的 Carl Zeiss 公司、美国的 Richardson 光栅实验室(已被 Newport 收购)、Spectrogon 公司、日本的 Hitachi 和 Shimadzu 公司等。Jobin-Yvon 公司是同步辐射光栅的主要生产商。目前我国同步辐射装置上所使用的光栅主要依赖进口,进口的原刻光栅价格十分昂贵,而且供货周期长,而样本上的标准参数复制光栅相对便宜很多,且供货周期短。

合肥国家同步辐射实验室燃烧与火焰实验线站(束线编号 U10)原为光化学实验站,光束线 U10 由前置镜、真空紫外单色仪和后置光学系统组成。实验站采用 1 m Seya-Namioka 单色仪,该单色仪具有结构简单和波段覆盖宽等优点。色散元件采用曲率半径为 1 m 的球面光栅,工作波段为 30~300 nm,用两块复制闪耀光栅覆盖上述工作波段:其一为表面镀金,闪耀波长为 80 nm,工作波段为 30~120 nm 的 2 400 lp/mm 光栅,二为表面镀 Ir 或 Al + MgF₂,闪耀波长为 150 nm,工作波段为 80~300 nm 的 1 200 lp/mm 光栅。复制光栅主要来自美国 Milton Roy 公司,即现在的 Newport Richardson Gratings 公司。由于同步辐射存在的辐照碳污染问题^[3]造成了光栅衍射效率的下降,同时紫外段也加速了复制光栅树脂层的老化作用^[4],因此传统的有机树脂类复制光栅的使用寿命较短,一般几个月就需要更换新的复制光栅。

1999 年,课题组对全息-离子束刻蚀制作闪

耀光栅工艺进行了系统的研究。在全息离子束刻蚀光栅制作工艺中,首次引入 O₂ 离子刻蚀对光刻胶进行灰化处理以便获得要求的占空比及栅条高度,这一新工艺的突出优点是反应离子刻蚀条件易于控制,降低了苛刻的全息曝光显影要求。利用此工艺制作出了有效面积为 35 mm×35 mm、闪耀波长为 130 nm 的 1 200 lp/mm 球面闪耀光栅^[5-6]。扫描探针显微镜观测和同步辐射光源的衍射效率检测结果表明其已达到实用水平,并替代进口用于国家同步辐射实验室光化学实验站的实验研究。

Laminar 光栅是一种位相光栅^[7],是用于真空紫外及软 X 射线波段的一种重要的色散元件,其基本特点是截面为浅槽矩形轮廓,光栅条和槽对衍射强度(效率)都有贡献。通过选择合适的槽深、入射角,能引起光栅条和槽的衍射在零级发生相消干涉,以致更多的能量分布在其它能级。占空比和槽深是 Laminar 光栅的两个重要参数,优化的占空比决定了光栅的最大衍射效率。相对于全息离子束刻蚀闪耀光栅, Laminar 光栅制作工艺的难度有所降低,其衍射效率峰值比闪耀光栅低,但衍射效率覆盖波段较宽。本文设计并研制了 Laminar 光栅,给出了 U10 光束线 1 m Seya-Namioka 单色仪用 Laminar 光栅的设计参数,简述了光栅制作工艺流程,并通过实验实现了对影响衍射效率的主要因素严格控制,研制出了实用水平的 Laminar 光栅。最后,给出了该光栅近几年的使用情况。

2 光栅参数

设计的光栅基片尺寸为 63.5 ± 0.2 mm,厚度 $12.5 \sim 0.5$ mm,面形为球面,曲率半径为 998.8 ± 0.2 mm,材料为 K9 玻璃,光栅刻划面积 $\Phi > 50$ mm,线密度为 1200 lp/mm。根据 1 m Seya-Namioka 单色仪光路配置,本文利用 PCGRATE 软件计算了不同占空比和槽深下光栅的衍射效率,优

化的光栅结构参数为槽深 $40 \times (1 \pm 0.1)$ nm, 占空比 $(0.42 \sim 0.5)(1 \pm 0.1)$ 。图1显示了槽深40 nm及不同占空比和镀膜材料的光栅理论衍射效率曲线,不同占空比的镀金光栅效率基本重合,即制作工艺的宽容度较大。波长大于110 nm后镀铝光栅的衍射效率明显高于镀金光栅。

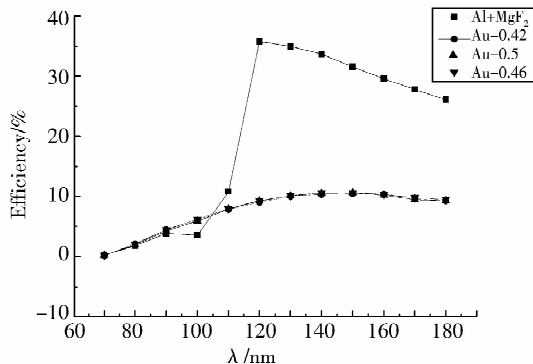


图1 不同占空比及镀膜材料的1 200 lp/mm Laminar 光栅的理论衍射效率

Fig. 1 Theoretically diffraction efficiency of 1 200 lp/mm Laminar grating at different duty cycles and coating films

3 光栅制作工艺流程

全息离子束刻蚀制作 Laminar 光栅的整个工艺流程如图2所示。首先在洁净的 K9 光栅基底表面涂上光刻胶,经曝光、显影等处理后,在光栅基底上形成浮雕光刻胶光栅。用等离子体灰化调整占空比,以此光刻胶光栅为掩模,进行离子束刻蚀,把掩模图形转移到光栅基底上。最后,去除残余光刻胶、清洁处理、镀制反射膜即成反射的 Laminar 光栅。具体工艺如下:

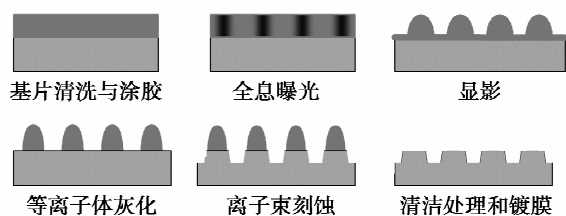


图2 全息离子束刻蚀衍射光栅制备流程

Fig. 2 Fabrication process of holographic ion beam etched grating

3.1 基片清洗和涂胶

相对于熔石英和硅光栅基底,K9 光栅基底的

光刻胶附着力较好,采用常规的清洗步骤即可。为了去除可能的湿气分子,制作时将光栅基片用丙酮超声清洗几分钟后,用超纯水清洗,高纯氮气吹干,接着放入烘箱在 120°C 下干燥 1 h。待冷却至室温后采用离心旋转在基片表面涂上合适厚度的光刻胶,光刻胶为美国 Shipley 公司的 S1805,烘胶条件为 90°C , 30 h。

3.2 全息曝光、显影

光栅图形是利用分波前干涉使两相干的激光束(美国光谱物理 2080 氦离子激光器,波长 413.1 nm)在记录平面光刻胶上叠加产生的。为了在整个光栅基底范围内形成均匀、衬度好的干涉条纹,应注意调节光路使两束光强相近。曝光后基片用 0.5% 的 NaOH 溶液显影,从而得到光刻胶浮雕光栅图形。

3.3 等离子体灰化

由于光栅基底厚度只有 12.5 mm,可以利用中科院微电子中心研制的 ME-3A 型多功能磁增强反应离子刻蚀机对光刻胶光栅掩模进行灰化处理^[8],也可以利用热蒸发镀膜机或专用灰化机进行灰化处理,灰化处理的目的是调节光栅占空比及使线条平滑。

3.4 离子束刻蚀

离子束刻蚀是在 KZ-400 离子束刻蚀装置^[9](Veeco 条形离子源,中国科学技术大学研制)中进行的。该刻蚀机稳定性、重复性很好,根据相应离子束刻蚀条件下的 K9 刻蚀速率调整扫描刻蚀时间,即可获得所要槽深的 Laminar 光栅。

3.5 清洁处理

光栅刻蚀完成后,先用丙酮超声去除残余的光刻胶,之后用硫酸和双氧水混合液浸泡,再用超纯水超声清洗。用高纯氮气吹干后放入烘箱,在 120°C 下烘干。

3.6 镀膜

Au, Ir, Al 是真空紫外波段常用的金属反射膜材料^[10-12]。波长在 83 nm 以上时,Al 在所有已知的薄膜材料中反射率最高($>80\%$)。Al 膜镀制结束后,须立即涂覆一层保护膜,以防止其表面氧化,这是目前采用的唯一保护 Al 膜在紫外区高反射率的方法。Al 反射膜采用电阻热蒸发方式镀膜,所用设备为北京仪器厂生产的 DM-450A 型电阻蒸发镀膜机。Au 反射膜采用离子束溅射

方式镀膜,所用设备为中国航天总公司 23 所研制的 LDJ-2A-F150 双离子束薄膜沉积系统。

4 实验结果与讨论

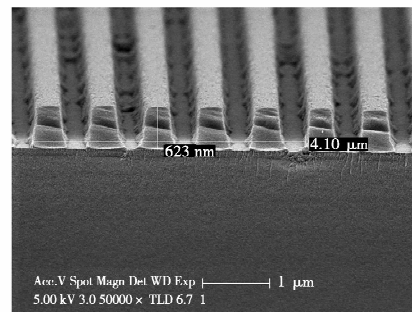
影响 Laminar 光栅衍射效率的主要因素是光栅基片的粗糙度、占空比、槽深及反射膜层质量等。与普通全息光栅不同的是,由离子束刻蚀的光栅掩模图形的光栅线条间需要完全露出基底材料(即无残余光刻胶)。符合要求的光栅掩模制作完成后,即可利用离子束刻蚀将其转移到光栅基底材料中,因此,工艺过程中的检测十分重要。扫描电子显微镜(SEM)是检测光栅槽型结构的最直观手段,但该方法检测样品较小,需溅射导电层,垂直线条掰断样品看截面等,属于破坏性检测,不能检测大尺寸的正式光栅。原子力显微镜(AFM)检测的分辨率更高,且不用对样品进行任何处理,属非破坏性检测,目前已广泛用于光栅槽型结构及线条粗糙度的测量,但是由于各种物理因素的影响,对同一尺寸参数可能测出不同的结果,甚至不能反映真实的情况^[13]。光学显微镜(OM)只能用于检查光栅掩模是否露底,不能有效检测 1 200 lp/mm 光栅的占空比。基于 SEM、AFM 和 OM 在光栅制作工艺检测中的作用和特点,本文先用相同材料薄基片进行工艺研究,然后将其应用到正式基片上。

4.1 占空比调节

占空比是 Laminar 光栅的一个重要参数,优化的占空比决定了光栅的最大衍射效率。由设计参数可知,占空比在 0.38~0.55 都可以获得高衍射效率(设计值 $\pm 10\%$)。为了降低后表面微小反射面导致的线条根部弯曲,这里不直接通过显影达到所要求的占空比,而是通过在线监测技术在显影露底后终止显影。图 3 是用薄试验片制作光刻胶光栅掩模的 SEM 照片,可以看出,经过热蒸发镀膜机灰化 4 min 后,原始光栅掩模线条根部的弯曲及槽底“搭桥”残胶均已去除,占空比也得到调控,当光刻胶光栅掩模的占空比调节到目标值时即为符合要求的光栅掩模,可进入离子束刻蚀工艺步骤。

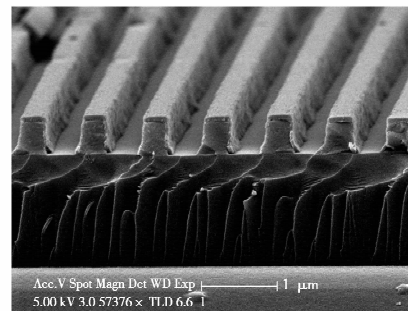
4.2 刻蚀深度确定

槽深是 Laminar 光栅的另一个重要参数,它



(a)原始光刻胶光栅掩模

(a)Original resist grating mask



(b)灰化 4 min 后光栅掩模

(b)Resist grating mask after resist-ashing for 4 min

图 3 初始光刻胶光栅掩模及灰化 4 min 后的 SEM 图片

Fig. 3 SEM images of resist grating mask before and after resist-ashing for 4 min

决定了光栅的闪耀波长,即优化最大衍射效率所对应的波长。槽深的控制可通过离子源刻蚀参数及扫描速率来控制,不同材料刻蚀速率不一样,相同材料不同厂家及不同批次也有微弱差异。为此,在离子束刻蚀正式光栅基片之前,需根据大致的材料刻蚀速率先在试验片上进行不同扫描周期刻蚀深度测定,然后确定刻蚀的扫描周期数。一般情况下,扫描刻蚀 3 个周期的刻蚀深度为 34 nm,刻蚀 4 个周期的深度为 45 nm。图 4 是离子束刻蚀 3.5 个周期后光栅微结构的 SEM 图片,可以看出槽深近 39 nm,占空比为 0.5。

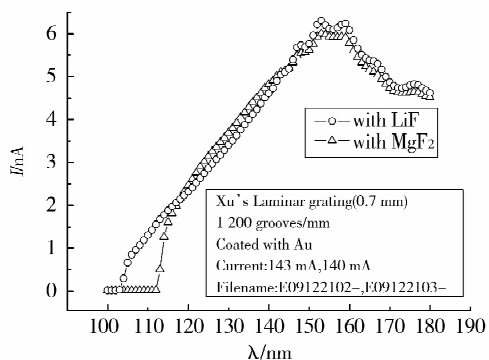
根据实验结果,采用全息光刻离子束刻蚀工艺在正式基片上制作出了 1 200 lp/mm Laminar 光栅,如图 5 所示。图 5(a)中的时间是光栅首次镀膜后的拍照时间,由后文可知该光栅重复镀膜几次,一直使用至今;由图 5(b)可知光栅占空比约为 0.45,槽深为 42 nm。

的光斑形状,如图 7 所示,这是复制光栅有机树脂层在同步辐射光斑的作用下碳化所形成的,其对应的光栅正面也受到比较严重的破坏。作者研制的镀金 1 200 lp/mm Laminar 光栅已在线使用了近三年,图 8 是 2009 年 12 月初重新镀膜后,不同时期对光栅在线波长扫描的结果。可以看出,相对于复制光栅,其使用寿命已大大增加。另外,全



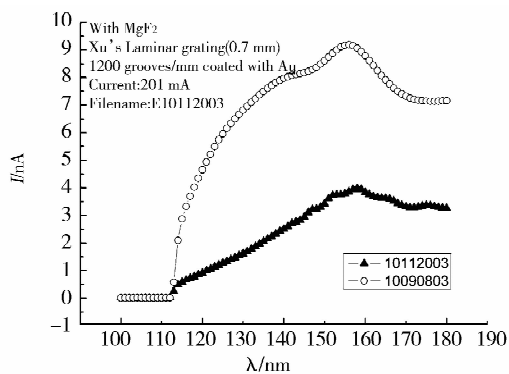
图 7 复制闪耀光栅使用后损伤情况照片

Fig. 7 Photo of damage morphology of replica grating



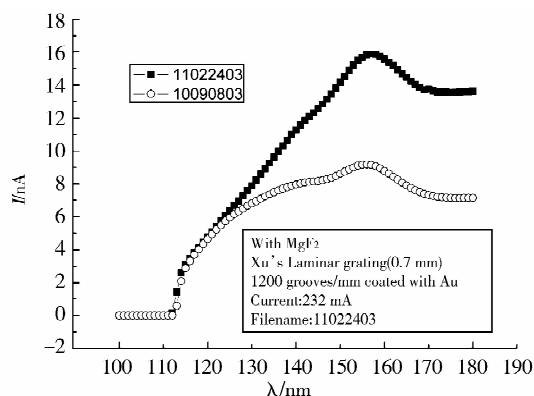
(a) 2009 年 12 月 21 日

(a) Date on Dec. 21, 2009



(b) 2010 年 9 月 8 日及 11 月 20 日

(b) Date on Sept. 8 and Nov. 20, 2010



(c) 2010 年 9 月 8 日及 2011 年 2 月 24 日

(c) Date on Sept. 8, 2010 and Feb. 24, 2011

图 8 同一光栅不同时间的波长扫描光谱

Fig. 8 Synchrotron radiation wavelength scanning spectra of same Au-coated grating at different dates

息离子束刻蚀光栅效率低至不能使用时,取出重新镀膜仍能继续使用。但 1999 年研制的全息离子束镀铝闪耀光栅使用污染后(正面可以看到咖啡色的光斑),取出重新镀膜却效果不佳,无法继续使用,这也许与当时的光栅清洗技术及认识不足有关。针对 U10 光束线及清华大学物理系莫宇翔教授制作的镀金 Laminar 光栅^[14]经一段时间使用后,效率均有所下降,作者对其实施清洗、镀膜,实验证明,处理后光栅均可继续使用。

5 结 论

利用全息-离子束刻蚀工艺制作了线密度为 1 200 lp/mm,槽深为 40 nm,占空比为 0.45, Au 膜厚为 40 nm 左右的 1 m Seya-Namioka 单色仪用 Laminar 光栅。为了验证理论设计,还镀制一块厚 60 nm 左右的 Al 反射膜光栅。镀 Au 和 Al 光栅的在线波长扫描结果与理论计算的结果基本一致,即在 120~180 nm 波段,镀 Al 光栅的衍射效率明显高于镀 Au 光栅。闪耀波长与美国 Newport 进口的闪耀复制光栅一致,说明制作的光栅槽型结构参数满足设计要求。受技术及工艺条件限制,镀膜质量不够理想,影响了光栅的性能。同步辐射在线波长扫描结果表明,镀铝光栅衍射效率已高于进口复制光栅,如果镀膜工艺设备及技术得到改善,得到的光栅性能会大大提高,不逊于进口的复制光栅。镀 Au 光栅已在线使用 3 年,替代

进口光栅用于国家同步辐射实验室燃烧实验站的实验研究。

感谢国家同步辐射实验室齐飞教授提供了光栅在线波长扫描结果。

参考文献:

- [1] 王秋平, 张允武. 软 X 光和极紫外光波段的分光技术[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(4-5): 375-380.
WANG Q P, ZHANG Y W. Soft X-ray and EUV monochromator development at NSRL[J]. *Journal of University of Science and Technology*, 2007, 37(4-5):375-380. (in Chinese)
- [2] 巴音贺希格, 邵先秀, 崔继承, 等. 制作平面全息光栅的立轴抛物镜/洛埃镜干涉系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1):56-63.
BAYANHESHIG, SHAO X X, CUI J CH, *et al.*. Off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric systems for manufacturing plane holographic gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1):56-63. (in Chinese)
- [3] 徐向东, 周洪军, 洪义麟, 等. 同步辐射光学元件辐照污染及其清洁处理[J]. 真空科学与技术学报, 2000, 20(2):114-119.
XU X D, ZHOU H J, HONG Y L, *et al.*. Cleaning of contaminated optics devices by synchrotron radiation[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2000, 20(2):114-119. (in Chinese)
- [4] HANSEN R W C. Replica grating radiation damage in a normal incidence monochromator[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, 67(9):3350-1-5.
- [5] 徐向东, 洪义麟, 霍同林, 等. 同步辐射球面闪耀光栅的研制[J]. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(2):248-250.
XU X D, HONG Y L, HUO T L, *et al.*. Fabrication of spherical blazed grating for synchrotron radiation[J]. *Journal of University of Science and Technology*, 2000, 30(2):248-250. (in Chinese)
- [6] XU X D, HONG Y L, FU S J. VUV and soft X-ray diffraction gratings fabrication by holographic ion beam etching[J]. *SPIE*, 2005, 5636:165-175.
- [7] 谭鑫, 刘颖, 徐向东, 等. 13.9 nm Lamina 分束光栅的研制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1):33-37.
TAN X, LIU Y, XU X D, *et al.*. 13.9 nm Lamina grating as beam splitter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):33-37. (in Chinese)
- [8] 盛斌, 徐向东, 刘颖, 等. 真空紫外硅闪耀光栅的制作[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):94-99.
SHENG B, XU X D, LIU Y, *et al.*. Vacuum-ultraviolet blazed silicon grating anisotropically etched KOH solution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):94-99. (in Chinese)
- [9] 徐朝银, 董晓浩, 赵飞云, 等. KZ-400 离子束刻蚀装置的研制[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(1):48-53.
XU CH Y, DONG X H, ZHAO F Y, *et al.*. Development of KZ-400 ion beam etching facility[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2006, 26(1):48-53. (in Chinese)
- [10] 刘颖, 李福田. 紫外-真空紫外波段的 Al+MgF₂ [J]. 光学精密工程, 2001, 9(2):165-168.
LIU Y, LI F T. MgF₂-overcoated aluminium films for ultraviolet and vacuum ultraviolet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):165-168. (in Chinese)
- [11] 干蜀毅, 徐向东, 洪义麟, 等. K9 和石英玻璃基片上 Au 膜真空紫外反射特性研究[J]. 光学学报, 2007, 27(8):1529-1535.
GAN SH Y, XU X D, HONG Y L, *et al.*. Reflectivity of Au film on K9 and quartz substrate in vacuum ultraviolet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8):1529-1535. (in Chinese)
- [12] 干蜀毅. 真空紫外反射膜特性及相关技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
GAN SH Y. *Research on the performance of vacuum ultraviolet reflective films and related technology* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [13] DESTOUCHES N, HERZIG H, PNAKAGAWA W, *et al.*. AFM benchmark for the profile characterisation of subwavelength diffractive elements within the EC Network of Excellence on Micro-Optics(NEMO) [J]. *SPIE*, 2006, 6188:61881k-1-11.
- [14] MO Y X, YANG J, CHEN G Y. Zero kinetic energy photoelectron study of SO₂⁺ (X² A₁) using coherent extreme ultraviolet radiation [J]. *J. Chem. Phy.*, 2004, 120(3):1263-1270.

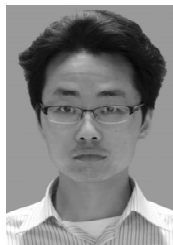
作者简介:



徐向东(1963—),男,安徽庐江人,博士,高级工程师,1993年于中国地质大学(北京)获得理学硕士学位,2001年于中国科学技术大学获得工学博士学位,主要从事全息离子束刻蚀衍射光栅制作技术方面的研究。E-mail: xxd@ustc.edu.cn



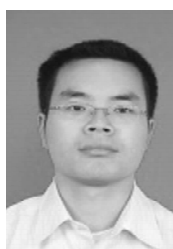
刘颖(1972—),女,天津人,博士,副研究员,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事微细加工技术,衍射光学元件设计与制作的研究。E-mail: liuychch@ustc.edu.cn



刘正坤(1981—),男,河南信阳人,博士,主要从事衍射光学元件设计与制作的研究。E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn



洪义麟(1963—),男,安徽合肥人,教授级工程师,主要从事微细加工技术,衍射光学元件设计与制作的研究。E-mail: ylhong@ustc.edu.cn



邱克强(1980—),男,四川仪陇人,博士,主要从事衍射光学元件制作和短波光学的研究。E-mail: blueleaf@ustc.edu.cn



付绍军(1952—),男,吉林伊通人,教授级工程师,博士生导师,研究方向为衍射光学,微细加工技术,短波光学。E-mail: sjfu@ustc.edu.cn

● 下期预告

模拟退火-爬山混合法用于无波前传感器快速像差校正

刘莹,马剑强,何挺,李保庆,褚家如

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,安徽合肥 230027)

为了校正激光光束波前像差,建立了一种基于压电微变形镜的自适应光学系统。系统通过采用模拟退火-爬山混合算法对37单元单压电片变形镜进行控制,补偿激光光束波前像差,实现对光斑的校正。模拟退火-爬山混合算法联合使用模拟退火算法和爬山法,先使用模拟退火算法为爬山法提供一个较好的校正起点,再用爬山法对像差进行精确校正。本算法仅需要少量的模拟退火迭代过程提供一个好的校正起点,又由于精确校正阶段的爬山法速度快,因此获得相同校正效果需要的迭代次数要比普通模拟退火算法减少50%以上,同时由于爬山法校正起点较好,大大降低了进入局部最优值的可能。通过实验验证了模拟退火-爬山法对激光光束波前具有更佳的校正效率。