

文章编号 1004-924X(2012)08-1676-08

## 大尺寸衍射光学元件的扫描离子束刻蚀

邱克强, 周小为, 刘颖\*, 徐向东, 刘正坤, 盛斌, 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:**总结了大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀技术的研究进展。针对自行研制的 KZ-400 离子束刻蚀装置, 提出了组合石墨束阑结构和多位置分步刻蚀策略来提高离子束刻蚀深度的均匀性, 目前在 450 mm 尺寸内的刻蚀深度均匀性最高可达  $\pm 1\%$ 。建立了针对多层介质膜光栅的衍射强度一维空间分布在线检测系统以及用于透射衍射光学元件离子束刻蚀深度的等厚干涉在线检测系统, 实现了对大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀终点的定量、科学控制, 提高了元件离子束刻蚀工艺的成功率。利用上述技术, 成功研制出一系列尺寸的多层介质膜光栅、光束采样光栅、色分离光栅以及同步辐射光栅等多种衍射光学元件。

**关键词:**衍射光学元件; 离子束刻蚀; 刻蚀深度; 在线检测; 多层介质膜光栅

**中图分类号:** O436.1; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1676

## Ion beam etching of large aperture diffractive optical elements

QIU Ke-qiang, ZHOU Xiao-wei, LIU Ying\*, XU Xiang-dong,  
LIU Zheng-kun, SHENG Bin, HONG Yi-lin, FU Shao-jun

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

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

**Abstract:** Ion beam etching technologies for developing large aperture Diffractive Optical Elements (DOEs) were reviewed. To meet the requirements of large aperture DOEs in high-power laser systems, an integrated graphite mask for ion beams and a multi-position etching strategy were investigated for a self-established KZ-400 etching facility to improve the uniformity for ion beam etching and the uniformity of  $\pm 1\%$  for ion beam current along the major axis of the ion source was achieved in a range of 1430 mm. On-line optical measurement methods and experimental setups for Multilayer Dielectric Gratings (MDGs) and transmission DOEs were presented to measure the 1D spatial distribution of diffraction intensity and the ion beam etching depth based on fringes of equal thickness, respectively, by which the quantitative control of ion beam etching for large size DOEs was completed. Based on above techniques, a series of large aperture DOEs, especially MDGs with diffraction efficiencies more than 95% at 1 064 nm, beam sampling gratings, color separation gratings and beam sampling gratings for synchrotron radiation were fabricated successfully.

**收稿日期:** 2011-12-11; **修订日期:** 2012-03-15.

**基金项目:** 国家 863-804 项目; 国家重大专项; 国家自然科学基金资助项目 (No. 10676032, No. 10875128, No. 10975135, No. 10975139)

**Key words:** Diffractive Optical Elements(DOE); ion beam etching; etching depth; on-line measurement; Multilayer Dielectric Grating(MDG)

## 1 引言

随着强激光系统输出能量的提高,部分光学元件的尺寸已达 0.5 m、口径甚至达 1 m<sup>[1-7]</sup>。强激光系统的大尺寸衍射光学元件在采用光刻产生周期微结构的光刻胶掩模之后,均利用离子束刻蚀将掩模图形转移到基底上。离子束刻蚀产生的刻蚀深度及均匀性,直接影响元件的衍射效率及均匀性。因此,离子束刻蚀是制作大尺寸衍射光学元件的关键环节,在刻蚀中须准确选择刻蚀终点以提高离子束刻蚀深度的均匀性。

采用某一固定形状的束阑遮挡离子束是国内外提高离子束流密度均匀性的基本方法<sup>[8]</sup>。实验中,为了获得尽可能高的离子束流均匀性,需不断对束阑形状进行修正,甚至更换,这使刻蚀实验极为不便。此外,优化样品与离子束的相对位置也可提高刻蚀均匀性。J. Keck 等<sup>[9]</sup>使样品位置交替旋转 180°来提高刻蚀均匀性,其光束采样光栅的设计刻蚀深度为 20 nm,刻蚀深度宽容度误差仅为 ±1 nm。上述方式均不能满足大尺寸光束采样光栅的刻蚀要求。

刻蚀深度可根据时间法确定,即刻蚀深度等于刻蚀速率与刻蚀时间的乘积。实际上,每次实验的刻蚀速率在一定范围内波动,对每个目标深度需经多次刻蚀、逐次逼近的方法控制,这样大大延长了制作周期。国内外关于在线监测半导体材料刻蚀深度的成果已有不少,但是,尚无完全适用于大尺寸衍射光学元件刻蚀终点的检测方法。目前,美国 Lawrence Livermore 国家实验室采用截止层<sup>[10]</sup>控制多层介质膜光栅的刻蚀终点。针对透射式衍射光学元件,赵光兴等<sup>[11]</sup>搭建了刻蚀深度实时监测系统,但此方法不能用于扫描离子束刻蚀的深度监测;本课题组徐作冬等<sup>[12]</sup>利用楔形平板等厚干涉原理,建立了针对透射光学元件扫描离子束刻蚀的刻蚀深度在线检测系统,并成功用于位相型 Ronchi 光栅和色散分离光栅的研制。清华大学林华等<sup>[13]</sup>通过实时监测光栅某一固定位置上衍射光强随刻蚀时间连续变化的特征点确

定离子束刻蚀终点,但该方法不适合判断大尺寸多层介质膜光栅的扫描离子束刻蚀终点。

为了实现 400 mm×400 mm 左右衍射光学元件的离子束刻蚀,中国科学技术大学国家同步辐射实验室自行研制了 KZ-400 离子束刻蚀装置<sup>[14]</sup>;发展了组合束阑结构和多位置分步刻蚀策略以提高刻蚀深度的均匀性;建立了扫描离子束刻蚀的衍射光学元件刻蚀终点在线检测方法和系统;并已成功刻蚀出一系列大尺寸衍射光学元件。本文总结了近年来国家同步辐射实验室大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀技术的主要进展。

## 2 扫描离子束刻蚀装置简介

KZ-400 离子束刻蚀装置采用尺寸为 6 cm×66 cm 的射频条形离子源<sup>[15]</sup>,在装置中条形离子源竖直放置,即离子源的长、短轴方向分别对应输出离子束的纵向(竖直方向)和横向(水平方向)。真空室的体积约为 1 m<sup>3</sup>,此刻蚀装置可以使用惰性气体或反应气体作为工作气体。刻蚀装置的本底真空度约为  $5 \times 10^{-4}$  Pa,充入工作气体后的真空度约为  $2 \times 10^{-2}$  Pa。图 1 是扫描离子束刻蚀过程中离子源、离子束束阑、工作台和待刻蚀光学元件间的示意图。在刻蚀过程中,离子源产生的离子束穿过石墨束阑后,照射到待刻蚀元件上,放置待刻蚀元件的工作台可沿水平(X)或竖直(Y)

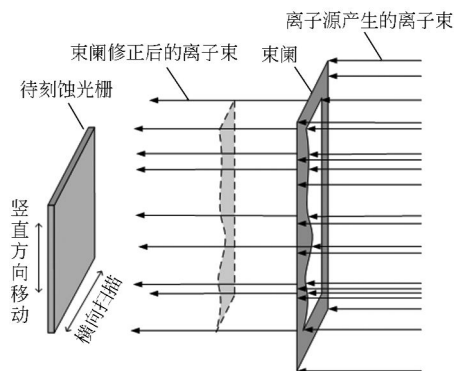


图 1 扫描离子束刻蚀的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning ion beam etching process

方向往复平移。由于离子源竖直放置,水平方向尺寸仅为 6 cm,大尺寸光学元件的刻蚀通过工作台沿水平方向扫描完成。一个扫描刻蚀周期刻蚀元件完全经过有离子束范围 2 次,即元件初始停靠于离子束之外,刻蚀开始元件随工作台沿 +X 方向平移,进入离子束范围,直到被刻蚀元件完全经过离子束范围后工作台停止沿 +X 方向运动,并沿 -X 方向返回,直至元件完全退出离子束范围,完成一个扫描周期刻蚀。目前,此装置可以刻蚀衍射光学元件的最大尺寸约为 450 mm × 500 mm。

### 3 提高离子束刻蚀深度均匀性的原理与方法

刻蚀深度与该位置接收到的离子能量(屏栅电压)与数量(束流)相关。提高刻蚀深度均匀性的实质是控制待刻蚀元件上任何位置接收到相同能量的离子数量的均匀性。为了实现稳定的离子束刻蚀状态,文中所有实验均使用相同的离子源参数:屏栅电压为 500 eV,束流为 250 mA,加速电压为 200 V,以确保离子源产生具有相同能量的离子,这样仅需考虑由于离子束流密度空间分布引起的刻蚀深度均匀性。

对于扫描离子束刻蚀方式,样品的刻蚀深度等于扫描刻蚀周期数和单位扫描刻蚀周期内刻蚀深度的乘积。刻蚀速率(单位时间的刻蚀深度)与离子束流密度成正比,条形离子源束流密度的横向空间分布呈高斯分布<sup>[15]</sup>。经过一个扫描刻蚀周期之后,样品某一纵向高度对应的“直线”区域上接收到的离子数量总和(即离子束横向束流密度空间分布沿 X 方向的积分)相同。因此,经过单位刻蚀周期后,待刻元件上纵向高度相同的“直线”区域,其刻蚀深度是相同的。经过扫描刻蚀后,刻蚀深度的不均匀指由于离子源纵向束流的不均匀而引起的样品纵向刻蚀深度的不均匀,故提高刻蚀深度均匀性的主要方法是使不同纵向位置上经过束阑后的离子数量趋于均匀。

在 KZ-400 装置的束阑与待刻蚀元件之间,使用一个口径为 120 mm(横向,水平方向) × 10 mm(纵向,竖直方向)、可沿竖直方向匀速平移的条形法拉第探头测试离子束的纵向束流分布。由

于法拉第探头宽度大于束阑的宽度,法拉第探头在某一纵向高度测得的电流值即样品上相应高度各处接收到的离子数量可以表示为:

$$I = \int_{-a}^a g(x) D_0 dx. \quad (1)$$

其中,积分范围  $[-a, a]$  表示水平方向的束阑开口大小,  $g(x)$  表示离子源横向(水平方向)束流密度的空间分布,  $D_0$  是离子源中心束流密度的大小。法拉第探头在竖直方向扫描获得的束流积分分布  $I(y)$ , 代表到达元件表面的离子数量分布, 正比于刻蚀深度。因此,提高刻蚀深度的均匀性归结为提高由法拉第探头测量得到的束流积分分布的均匀性。调节离子源 3 路工作气体的流量分布,可以在一定程度上调节纵向束流积分分布,但是,由此获得的离子束流均匀性还不能满足大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀深度均匀性的要求。由公式(1)可以看出,改变离子束束阑的开口大小,即可有效改变横向离子束流通量的大小,因此,本文针对 KZ-400 离子束刻蚀装置,提出了组合石墨束阑结构来提高其刻蚀深度均匀性。

在实际工作中,改变工作气体会引起离子束束流纵向空间分布的变化,因此,更换工作气体需要使用不同形状的离子束束阑。即使是同一种工作气体,离子源工作一段时间后,也需要对其束阑形状进行适当的修正。也就是说,采用固定形状的束阑无法获得纵向空间分布均匀的离子束。为了获得尽可能均匀的纵向离子束束流,需要不断地对束阑形状进行修正。为此,提出了组合石墨束阑结构,如图 2 所示。本刻蚀装置所用组合石墨束阑由 60 个相同宽度的石墨束阑单元组成,每个石墨束阑单元的尺寸为 100 mm(H) × 10 mm(V)。所有的石墨束阑单元沿着纵向紧密排列,每一个石墨束阑单元用一个螺钉固定在束阑框架上,并且可以沿水平方向在一定范围内单独移动。改变束阑单元在水平方向的位置,即改变束阑形状,由此达到适当遮挡离子束横向通量,调节离子束流纵向均匀性的目的。在实际的修正过程中,需要经过几次逼近过程才能获得较为均匀的离子束纵向分布。这种组合石墨束阑在使用中的主要特点是:可以多次反复使用、组合出多种形状的束阑轮廓。

理论上,只要束阑单元的尺寸无限小、且束阑位置的控制精度足够高,石墨束阑结构矫正束流

均匀性的理论极限可以达到无限小。利用这种方法得到的离子束流均匀性与石墨束阑单元的纵向单元尺寸及其横向空间移动精度相关。束阑单元的纵向尺寸越小,可调整的纵向束流分布越精细。目前,束阑单元的横向移动精度约为 0.5 mm,随着束阑单元逐步向束阑中心(即离子束的中心)靠近,单位移动长度对应的离子束流呈非线性增加,其修正离子束束流的精度越难以控制。影响修正精度的另一个因素是在修正中不同纵向位置离子束流通量时均采用相同的空间分布;虽然不同纵向位置的离子束横向空间分布都呈高斯分布,但是具体轮廓的大小和形状还略有差别。

实验中,受多种因素的影响,采用组合束阑结构获得的离子束流纵向均匀性通常在  $\pm 2\% \sim 3\%$ 。在此基础上,还可以采用多位置分步刻蚀方式来进一步提高刻蚀均匀性。其基本思想是:在不同的扫描刻蚀周期中,改变样品的纵向位置(如上移、下移、或将样品的上下方向调转  $180^\circ$  等),等效于改变样品接收的离子束流纵向分布。通过改变刻蚀中样品位置,避免样品某一位置始终处于束流的最大或最小值处,使样品刻蚀深度的均匀性好于离子束束流纵向均匀性。根据束流纵向分布和预期的扫描周期数来预先设计和优化样品移动的方向和距离。

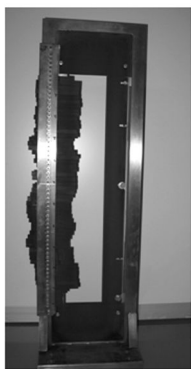


图 2 组合石墨束阑照片

Fig. 2 Photo of integrated graphite mask

#### 4 扫描离子束刻蚀终点的光学在线检测

大尺寸衍射光学元件可以分为反射式(如多

层介质膜光栅)和透射式(如光束采样光栅)两种,可针对反射和透射式衍射光学元件建立不同的在线检测系统。作者在 KZ-400 装置上建立了针对透射衍射元件刻蚀终点检测的实验系统,并成功用于位相型 Ronchi 光栅的研制,具体参见文献[12]。下面将介绍用于多层介质膜光栅刻蚀的在线检测系统。

多层介质膜光栅是在多层介质膜基底的顶层制作出光栅结构,其衍射效率与离子束刻蚀过程中形成的光栅刻蚀深度密切相关。清华大学林华等提出的刻蚀终点监测方法<sup>[13]</sup>,仅适用于刻蚀过程中光栅保持不动的情况。随着光栅尺寸的增加,利用全息光刻的方法很难在光栅全部面积上制作出槽形完全一致的光刻胶光栅掩模,离子束刻蚀前初始掩模形状的差异将导致刻蚀过程中不同位置光栅槽形演化过程不完全同步。因此,上述方法不能保证监测点之外的光栅区域也达到最佳刻蚀终止时刻。在上述监测原理的基础上,针对多层介质膜光栅的扫描离子束刻蚀方式,本文提出了一种在线扫描检测方法,即通过在线检测刻蚀过程中光栅衍射光强一维分布的均匀性变化,判断光栅的离子束刻蚀终点。

在 KZ-400 刻蚀装置中,多层介质膜光栅衍射强度空间分布的在线检测装置如图 3 所示。将待刻蚀光栅的光刻胶掩模样品放置在工作台上,离子束垂直光栅平面入射。波长为 1 064 nm 的 TE 偏振激光经刻蚀机窗口和反射镜照射到待刻蚀光栅表面,调节入射激光、反射镜和光栅的相对

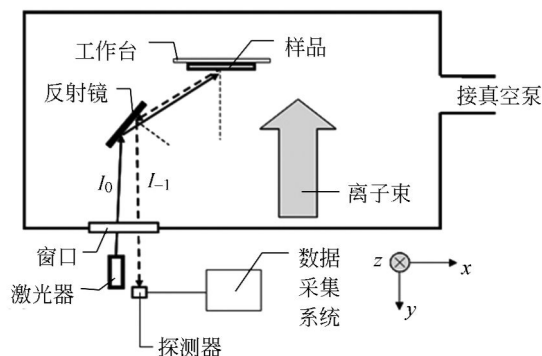


图 3 KZ-400 刻蚀装置中,在线检测多层介质膜光栅衍射强度一维空间分布的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of on-line measurement system of one-dimension uniformity of diffraction intensity for MDG

位置,使得光栅的负一级衍射光以自准直角度附近再经反射镜和刻蚀机窗口出射,经光电探测器接收,再由数据采集和计算机系统对探测器输出信号进行分析处理。

## 5 实验结果与讨论

上述提高刻蚀深度均匀性技术和大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀的在线检测技术,已经成为进行大尺寸衍射光学元件离子束刻蚀的常规工艺环节,成功用于相关大尺寸衍射光学元件的离子束刻蚀。下面给出代表性实验结果。

### 5.1 刻蚀深度均匀性

图 4 给出了通过组合束阑结构和多位置分步刻蚀策略提高刻蚀深度均匀性的实验结果。实验结果显示,在  $9\sim 537\text{ mm}$  修正前束流均匀性为  $\pm 12.5\%$ ;通过优化石墨束阑形状,获得的离子束流纵向空间分布均匀性如图 4 所示,在  $12\sim 541\text{ mm}$  的均匀性可达  $\pm 3.5\%$ ;在  $71\sim 539\text{ mm}$  达到  $\pm 2.2\%$ 。为了刻蚀尺寸为  $430\text{ mm}\times 430\text{ mm}$  的衍射光学元件,根据离子束流密度分布曲线,采用三次刻蚀,样品相对离子源的纵向位置和刻蚀时间分别为:位置 1 ( $17\sim 447\text{ mm}$ ),刻蚀 2 个周期 ( $2T$ );位置 2 ( $105\sim 535\text{ mm}$ ), $2T$ ;位置 3 ( $528\sim 98\text{ mm}$ )且样品调转  $180^\circ$ , $3T$ 。按照此刻蚀方案,计算得到的束流密度分布曲线如图 4 所示,在  $430\text{ mm}$  范围内束流密度分布均匀性可达到

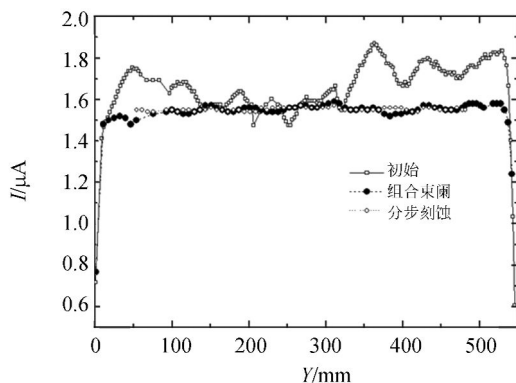


图 4 利用组合石墨束阑技术和多位置刻蚀策略提高离子束密度的纵向空间分布

Fig. 4 Uniformity of ion beam current along major axis of ion source before and after correction by integrated graphite mask and multi-step etching strategy, respectively

$\pm 1.0\%$ ,满足了刻蚀的均匀性要求。样品的实际刻蚀深度与上述模拟结果一致。利用此技术成功刻蚀出多块光束采样光栅以及同步辐射光栅<sup>[16-18]</sup>等多种衍射光学器件。

### 5.2 多层介质膜光栅衍射强度空间分布的在线检测

图 5 是一个典型的多层介质膜光栅衍射强度空间分布的在线检测曲线,其中  $T_0$  是初始光刻胶光栅掩模衍射强度空间分布, $T_3$ 、 $T_6$ 、 $T_9$  和  $T_{12}$  分别是经过 3,6,9 和 12 个周期后光栅衍射强度空间分布的在线检测结果。由图 5 可以看出,不同区域衍射强度随刻蚀时间变化趋势的不同,主要是由于不同区域光刻胶掩模轮廓(槽深和占宽比)引起;随刻蚀时间的增加,光栅衍射强度空间分布趋于均匀。这种多层膜光栅获得高衍射效率对应的槽形占宽比和刻蚀深度宽容度较大,是这种方法可行的基础。影响刻蚀终点控制精度的主要因素是每个扫描刻蚀周期内刻蚀深度的大小。一个刻蚀周期内刻蚀深度越大,相邻刻蚀周期刻蚀深度偏差越大,越容易造成最终刻蚀深度与设计值的偏差、导致衍射效率的不均匀。因此,在实际刻蚀中,在接近刻蚀终点时,可适当降低单位刻蚀周期的刻蚀深度,使刻蚀深度逐渐逼近刻蚀深度的宽容度范围,以提高光栅的衍射效率均匀性。在扫描离子束刻蚀过程中,利用多层介质膜光栅衍射强度空间分布的在线检测系统,已经成功研制出工作波长为  $800\text{ nm}$  和  $1\ 053\text{ nm}$ 、一系列尺寸

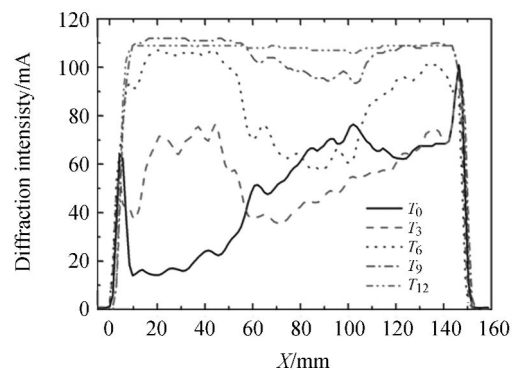


图 5 多层介质膜光栅衍射强度一维空间分布的在线检测结果

Fig. 5 On-line measurement of one-dimension diffractive intensity distribution of a MDG during scanning ion beam etching process

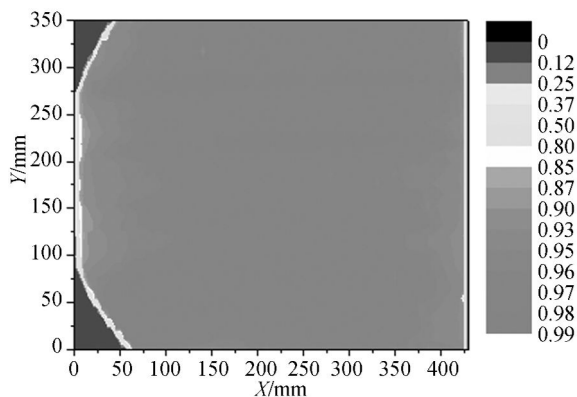


图 6 430 mm×350 mm 多层介质膜光栅衍射效率的空间分布图(平均衍射效率达到 96.6%,衍射效率均匀性 RMS 值为 0.5%)

Fig. 6 Diffraction efficiency map of a MDG across 430 mm×350 mm aperture at 1 064 nm with average diffraction efficiency of 96.6% and diffraction efficiency uniformity RMS of 0.5%.

的多层介质膜光栅等大尺寸衍射光学元件。图 6 给出了利用全息离子束刻蚀技术制作出的 430 mm×350 mm 多层介质膜光栅衍射效率的空间分布及其统计结果,光栅在工作波长为 104 nm 自准直条件下的负一级衍射效率平均值达到 96.6%,衍射效率均匀性 RMS 为 0.5%。

## 6 结 论

本文总结了作者近年来在大尺寸衍射光学元

件离子束刻蚀技术方面的主要研究工作进展。为了满足刻蚀大尺寸衍射光学元件在刻蚀深度均匀性和刻蚀深度定量控制的要求,基于 KZ-400 离子束刻蚀装置上,提出了组合石墨束阑结构和多位置组合刻蚀策略,显著提高了离子束刻蚀深度的均匀性;建立了针对多层介质膜光栅的衍射强度一维空间分布在线检测系统,以及基于楔形平板等厚干涉的透射衍射光学元件刻蚀深度在线测试系统,实现对刻蚀终点的定量、科学控制。利用上述技术,成功研制出工作波长为 800 nm 和 1 053 nm、一系列尺寸的多层介质膜光栅,工作波长为 351 nm 的光束采样光栅,色分离光栅以及同步辐射光栅等多种衍射光学器件。

由于离子束的纵向均匀性与每一次的离子源工作状态相关,在工作参数设置相同的条件下,离子束的均匀性仍会略有改变,为了进一步提高束流均匀性,拟发展在线束阑形状调节技术。在此基础上,拓展离子束技术在抛光、修正面形等领域的潜力。

## 7 致 谢

作者感谢清华大学、中科院上海光学精密机械研究所和苏州大学在光栅设计、多层膜制备及光栅掩模制备中的支持!作者感谢清华大学在建立多层膜光栅离子束刻蚀在线检测系统方面给予的帮助!

## 参考文献:

- [1] Lawrence Livermore National Laboratory. Advanced optics:critical and enabling optical technologies [EB/OL]. [https://lasers.llnl.gov/programs/psa/advanced\\_optics/](https://lasers.llnl.gov/programs/psa/advanced_optics/)[2011-11-11].
- [2] Plymouth Grating Laboratory. Technology: scanning-beam interference lithography [EB/OL]. <http://www.plymouthgrating.com/Technology/Technology Page.htm>. [2011-11-11].
- [3] JITSUNO T, MOTOKOSHI S, OKAMOTO T, *et al.*. Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEFX laser system[J]. *J. Phys: Conf Ser*, 2008,112:032002.
- [4] 邵忠喜,张庆春,白清顺,等.高精度大口径光栅拼接装置的控制算法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):158-165.
- [5] SHAO ZH X, ZHANG Q CH, BAI Q SH, *et al.*. Design method of controlling device for tiling high precision and large aperture grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):158-165. (in Chinese)
- [6] 张军伟,王道,林东晖.大口径光栅拼接架动力响应控制分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1):0112010-1-5.
- [7] ZHANG J W, WANG X, LIN D H. Dynamic response control and analysis of large aperture tiled grating mount [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1):0112010-1-5. (in Chinese)
- [8] 李朝明,吴建宏,陈新荣,等.脉冲压缩光栅光学拼接方法研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(7):1943-

- 1946.
- LI CH M, WU J H, CH X R, *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7):1943-1946. (in Chinese)
- [7] 石磊. 大尺寸衍射光栅的制造:基于潜像的曝光拼接方法[D]. 北京:清华大学, 2011.
- SHI L. *Fabrication of large-size diffraction gratings: Latent image-based optical mosaic technique* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [8] NGUYEN H T, BRYAN S R, BRIFTEN J A, *et al.*. Fabrication of efficient, large aperture transmission diffraction gratings by ion-beam etching [R]. Technical Report, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, 2000, UCRL-ID-140249-REV-1.
- [9] KECK J, OLIVER J B, KESSLER T J, *et al.*. Manufacture and development of multilayer diffraction gratings[J]. *SPIE*, 2005, 5991:59911G.
- [10] BARTY C P J, KEY M, BRITTEN J, *et al.*. An overview of LLNL high-energy short-pulse technology for advanced radiography of laser fusion experiments[J]. *Nuclear Fusion*, 2004, 44: S266-S275.
- [11] 赵光兴, 陈洪, 侯西云, 等. 微加工中一种新型刻蚀深度实时检测系统[J]. *光学学报*, 1997, 17(6): 745-749.
- ZHAO G X, CHEN H, HOU X Y, *et al.*. A novel real-time etching depth testing system for micro-fabrication[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 745-749. (in Chinese)
- [12] 徐作冬, 刘颖, 徐向东, 等. 衍射光学元件的扫描刻蚀深度在线检测[J]. *微细加工技术*, 2008(4): 19-21, 42.
- XU Z D, LIU Y, XU X D, *et al.*. On-line etch depth detection of diffractive optical elements[J]. *Microfabrication Technology*, 2008 (4): 19-21, 42. (in Chinese)
- [13] LIN H, LI L F, ZENG L J. In-situ end-point detection during ion-beam etching of multilayer dielectric gratings [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(2):63-65.
- [14] 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]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, 26(1):48-53. (in Chinese)
- [15] SIEGFRIED D, BUCHHOLTZ B, BURTNER D, *et al.*. Radio frequency linear ion beam source with 6 cm×66 cm beam [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(2):1029-1031.
- [16] HE SH N, LIU Y, ZHU J T, *et al.*. SiC/W/Ir multilayer-coated grating for enhanced efficiency in 50-100 nm wavelength range in Seya-Namioka mount[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(2):163-165.
- [17] 徐向东, 刘正坤, 邱克强, 等. 同步辐射角分辨光电子能谱光束线 1 200 lp/mm 光栅研制 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10):1005008-1-5.
- XU X D, LIU ZH K, QIU K Q, *et al.*. Fabrication of 1 200 lp/mm laminar gratings for combustion and flame endstation at NSRL [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10):1005008-1-5. (in Chinese)
- [18] 徐向东, 刘正坤, 邱克强, 等. 国家同步辐射实验室燃烧站用的 1 200 lp/mm Laminar 光栅研制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1):1-8.
- XU X D, LIU ZH K, QIU K Q, *et al.*. Fabrication of 1 200 lp/mm laminar gratings for combustion and flame endstation at NSRL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):1-8. (in Chinese)

## 作者简介:



邱克强(1980—),男,四川仪陇人,博士后,2008年于中国科学技术大学获得博士学位,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

## 通讯作者:



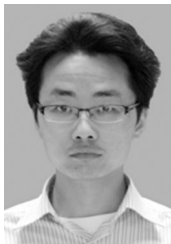
刘颖(1972—),女,天津人,副研究员,主要从事短波段衍射光学元件设计和微细加工技术的研究。E-mail: liuy-chch@ustc.edu.cn



徐向东(1963—),男,安徽庐江人,高级工程师,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: xxd@ustc.edu.cn



洪义麟(1963—),男,安徽合肥人,教授级高级工程师,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



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



付绍军(1952—),男,吉林人,教授级高级工程师,博士生导师,1977年中国科学技术大学物理系毕业,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



盛 斌(1980—),男,浙江金华人,博士后,2002年、2009年于中国科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事衍射光学元件制作和短波光学研究。E-mail: bsheng@ustc.edu.cn



周小为(1981—),女,安徽庐江人,2010年于中国科学技术大学博士毕业,主要从事衍射光学元件离子束刻蚀技术的研究。E-mail: zhouxw@mail.ustc.edu.cn

## ●下期预告

# 大画幅等待式转镜分幅相机系统设计

李 剑,汪 伟,肖正飞,尚长水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

根据先进常规武器研制的需求,采用共轴设计理论和控制离焦的方法,设计了大画幅等待式转镜分幅相机。该相机的画幅尺寸达到了  $30\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ ,同时具备了相对孔径大和分辨率高的特点,对底片的相对孔径为空间方向  $1/15$ 、扫描方向  $1/35$ ,动态目视分辨率达到了  $35\text{ lp/mm}$ ,总画幅数为 80,摄影频率为  $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5\text{ frame/s}$ 。高速转镜部件采用光纤传感器系统实现转速信号的产生和传输,避免了高速直流电机对转速信号的干扰,确保了测速准确度。研制的相机在爆轰物理和冲击波物理实验研究中得到了满意的应用,采用  $2 \times 10^5\text{ frame/s}$  的拍摄频率对某爆轰过程进行了试验记录,得到了高分辨率的图像。试验结果表明:相机的画幅尺寸大、空间分辨率高,适用于冲击、爆轰和弹体姿态等试验过程和目标的拍摄。