

# 电子束光刻-近场全息法制作平焦场光栅的 误差分析及补偿方法

林达奎, 陈火耀, 刘正坤, 刘颖

中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

**摘要** 在激光等离子体诊断等领域中,以平焦场光栅为核心器件的软 X 射线光谱仪发挥着重要作用。利用电子束光刻-近场全息法制作的平焦场光栅兼具电子束光刻线密度变化灵活,以及全息光栅低杂散光、抑制高次谐波等特点。采用光线追迹方法分析电子束光刻-近场全息法制作平焦场光栅的主要制作误差对其光谱成像特性的影响。结果表明:电子束光刻制备熔石英掩模和近场全息图形转移过程的制作误差均会导致谱线展宽;以目前应用较多的软 X 射线平焦场光栅(中心线密度为 2400 line/mm、工作波段在 0.8~6.0 nm)为例,当熔石英掩模在光栅矢量方向的长度为 50 mm 时,电子束光刻分区数目应保证在 1500 以上;熔石英掩模线密度偏差引入的谱线展宽可以通过调整近场全息制作参数来消除;确定了近场全息中的两个主要影响因素——熔石英掩模与光栅基底的间距和夹角;近场全息中各误差因素之间有相互补偿的效果,故除了尽可能消除制备过程中的每一种制作误差外,也可以通过优化不同误差之间的分配来降低制备误差。本研究对优化电子束直写掩模策略、降低掩模制作难度、设计和调整近场全息光路有重要帮助。

**关键词** 光栅; 电子束光刻; 近场全息; 平焦场光栅; 谱线宽度

中图分类号 O434

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0505003

## Errors Analysis of Flat-Field Gratings Fabricated by EBL-NFH and Errors Compensation

Lin Dakui, Chen Huoyao, Liu Zhengkun, Liu Ying

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

**Abstract** Soft X-ray spectrographs based on flat-field diffraction gratings play important roles in the fields of laser plasma diagnostics, etc. The flat-field gratings fabricated by electron beam lithography-near field holography (EBL-NFH) integrate the advantages of both sides, including the flexibility and high accuracy of spatial distribution of groove density due to EBL, and low stray light and low high-order harmonics similar to those of holographic gratings. This paper simulates the effect of dominating fabrication errors during EBL and NFH on the spectral images of flat-field gratings based on ray tracing theory. The results indicate that the fabrication errors of EBL and NFH will broaden spectral lines and degrade spectral images. We take a typical soft X-ray flat-field grating with a central density of 2400 lines/mm ranging from 0.8 nm to 6.0 nm as an example, when the length of the fused silica mask is 50 mm (along the direction of grating vector), the segment number should not be less than 1500. And the broadening of spectral lines due to the groove density error of the fused silica mask during EBL can be compensated by adjusting the parameters of NFH, such as the spacing and angle between the fused silica mask and the photoresist-coated grating substrate. The dominating factors are spacing and angle between the fused silica mask and the photoresist-coated grating substrate. And during NFH, rather than removing every fabrication parameter errors, the spectral line broadening can be eliminated by optimizing relative values among different errors. The

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-12-05

基金项目: 中德科学基金研究交流中心资助中德合作研究项目(GZ983)

作者简介: 林达奎(1992—),男,博士研究生,主要从事近场全息和软 X 射线平焦场光栅方面的研究。

E-mail: lindk@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 刘颖(1972—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事衍射光学、微纳米结构、全息,以及熔石英与离子束和激光束相互作用机制方面的研究。E-mail: liuychch@ustc.edu.cn(通信联系人)

simulation results are helpful to optimize the EBL-writing strategy for the mask, reduce the complexity of mask fabrication, and design and adjust the light path of NFH.

**Key words** gratings; electron beam lithography; near field holographic; flat-field grating; spectral line width

**OCIS codes** 050.1950; 340.7440; 220.4241

## 1 引 言

具有聚焦和消像差特性的软 X 射线平焦场光栅光谱仪在等离子体诊断<sup>[1-2]</sup>、透射电子显微镜<sup>[3-4]</sup>、电子束离子阱<sup>[5-6]</sup>和托卡马克<sup>[7-8]</sup>等领域得到了广泛应用。平焦场光栅在可见光波段也有相应的应用,如光谱相机<sup>[9]</sup>。软 X 射线平焦场光谱仪的核心是平焦场光栅,平焦场光栅是一种制作在曲面基底上的变间距光栅。

目前,软 X 射线平焦场光栅通常采用机械刻划或全息方法制备<sup>[10-12]</sup>。与全息法相比,机械刻划法制作的平焦场光栅的杂散光水平高,抑制高次谐波特性的能力较弱<sup>[10]</sup>,但机械刻划法在产生平焦场光栅线密度空间分布的灵活性方面具有比较明显的优势。随着非球面波全息技术的发展<sup>[13-14]</sup>,全息法在制作平焦场光栅线密度空间分布方面得到了一定程度的改善,但由于实际制作出的平焦场光栅的线密度空间分布与设计结果仍存在一定偏差,导致全息平焦场光栅的成像特性还有一定的提升空间<sup>[10]</sup>。

2003 年, Kley 等<sup>[15]</sup>提出将电子束光刻与近场全息(EBL-NFH)相结合,并初步展示了 EBL-NFH 在制作一维光栅、二维等间距和变间距光栅等方面的潜力。为满足平焦场光栅激光等离子体诊断和同步辐射等的迫切需求,本课题组与 Kley 小组合作,提出了基于 EBL-NFH 方法开展软 X 射线变间距光栅关键制作技术的研究,将 EBL-NFH 应用于制作高线密度软 X 射线变间距光栅<sup>[16-17]</sup>。以中心线密度分别为 2400 line/mm 和 3600 line/mm 的软 X 射线平焦场光栅为例,模拟设计了其线密度空间分布及槽形轮廓参数<sup>[16]</sup>。为了提高 NFH 制作光刻胶掩模的质量,提出在熔石英掩模的非光栅面上采用减反膜,以降低界面反射的干扰。基于此技术, Li 等<sup>[17]</sup>已经利用 EBL-NFH 方法制作出线密度为 2400 line/mm 的软 X 射线等间距光栅。EBL-NFH 制作平焦场光栅的基本过程是以 EBL 方法<sup>[18-19]</sup>产生可重复使用的平焦场光栅的初始熔石英掩模;基于此熔石英掩模再采用 NFH 方法<sup>[15,17-18,20]</sup>快速转移熔石英掩模图形,获得可对后续图形进行转移的光刻胶掩模,最终经过离子束刻蚀过程完成平焦场

光栅的制备。将 EBL 用于制作软 X 射线平焦场光栅可充分发挥 EBL 在产生高线密度光栅图形及高精度线密度空间分布上的优势。与上述一般全息法产生的软 X 射线平焦场光栅掩模图形相比,通过与 EBL 的结合,NFH 仅用于转移图形,无需产生变间距光栅图形,可显著降低平焦场光栅全息曝光系统的复杂性。

在设计和制备全息光栅过程中,可通过分波段设计并联光栅光谱仪来提高整个波段的光谱分辨率<sup>[21-22]</sup>,或通过凹面全息光栅和聚焦反射镜一体化设计提高系统的消像差能力<sup>[23]</sup>。分析全息曝光光路的各种误差对光栅最终线密度空间分布及成像特性的影响,对于合理分配各种相关误差、降低制作难度十分必要<sup>[24-27]</sup>。分析 EBL 和 NFH 过程中每个步骤可能引入光栅线密度空间分布误差对光谱成像特性的影响十分重要。为了深入发展 EBL-NFH 法,制作出高质量的平焦场变间距光栅,本文首先介绍了 EBL-NFH 制备平焦场光栅方法中 EBL 直写熔石英掩模及 NFH 获得平焦场光栅光刻胶掩模之间线密度空间分布的转移关系,然后分析这种方法中 EBL 和 NFH 制作误差对相关光栅线密度空间分布的影响,并基于光线追迹模拟分析制作误差对光栅成像光谱宽度的影响,且给出相应的互相补偿方法。

## 2 光栅光谱仪参数设计

本研究以用于 0.8~6.0 nm 波段的平焦场光栅光谱仪为例进行相关的分析工作。图 1 为设计的平焦场光栅光谱仪的结构示意图。光栅基底曲率半径  $R=15650$  mm,光栅中心线密度为 2400 line/mm,光栅宽度为 50 mm。

重要色散元件平焦场光栅的线密度空间分布  $N(X)$  为

$$N(X) = 2400(1 + 10^{-3}a_1X + 10^{-5}b_1X^2 + 10^{-7}c_1X^3), \quad (1)$$

式中: $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为平焦场光栅线密度分布式系数。利用光线追迹原理以及遗传算法编程优化设计出与光谱仪结构相匹配的消像差平焦场光栅线密度分布式系数分别为: $a_1=7.785$ 、 $b_1=4.873$ 、 $c_1=2.734$ 。

采用光线追迹法评价平焦场光栅的成像质

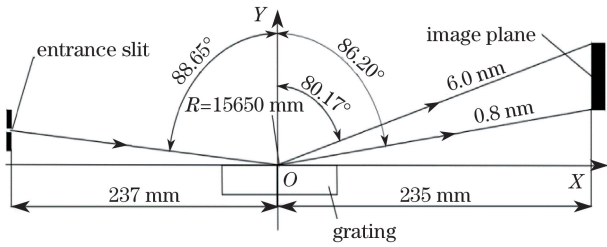


图1 工作在 0.8~6.0 nm 光谱范围的软 X 射线平焦场光栅光谱仪的设计示意图

Fig. 1 Schematic of soft X-ray flat-field spectrometer with the spectral range of 0.8-6.0 nm

量<sup>[28-29]</sup>。在评价平焦场光栅成像质量的模拟计算中,假设某一波长的理想点光源产生的一束光随机投射到光栅的某一位置上,再从该位置追迹此光线的焦平面位置及其在探测器平面上的成像情况。重复此光线追迹步骤累积得到足够多的光线模拟数据,进而统计平焦场光栅在此波长下的焦点位置和谱线宽度<sup>[29]</sup>。图 2(a)为设计的工作波段为 0.8~6.0 nm、中心线密度为 2400 line/mm 的软 X 射线平焦场光栅聚焦曲线与探测面的相对位置,可以看出在长波段离焦量较小。图 2(b)为此平焦场光栅理论谱线宽度的分布曲线图。短波段由于离焦量较大,谱线展宽严重,因此其分辨率较低;长波段的离焦量较小,谱线宽度较小,分辨率较高。

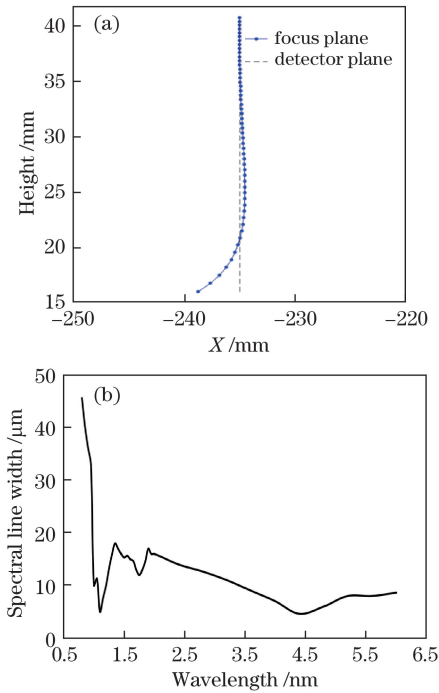


图2 软 X 射线平焦场光栅的成像特性。  
(a) 聚焦曲线; (b) 谱线宽度

Fig. 2 Imaging property of soft X-ray flat-field grating.  
(a) Focal curves; (b) spectral line width

### 3 EBL 直写熔石英掩模与平焦场光栅线密度分布的转移关系

平焦场光栅的线密度空间分布是决定平焦场谱仪成像特性的关键因素。本节首先推导软 X 射线平焦场光栅与其 NFH 熔石英掩模线密度空间分布的基本转移关系,然后给出满足(2)式中软 X 射线平焦场光栅线密度空间分布所需的 EBL 直写熔石英光栅掩模(下文简称熔石英掩模)的线密度空间分布。

利用 NFH 制备软 X 射线平焦场光栅的实验原理如图 3 所示。NFH 使用波长为 441.6 nm 的激光以接近中心线密度自准直角<sup>[17]</sup>附近  $\theta_i$  入射到 EBL 直写的熔石英掩模上,保证在此入射角下熔石英掩模上的每一光栅位置仅产生零级与负一级衍射,利用零级与负一级衍射光之间的干涉产生所需软 X 射线平焦场光栅图形,并记录到涂覆有光刻胶层的平焦场光栅基底上,平焦场光栅基底是曲率半径为 R 的凹面基底;再经显影得到平焦场光栅的光刻胶光栅。

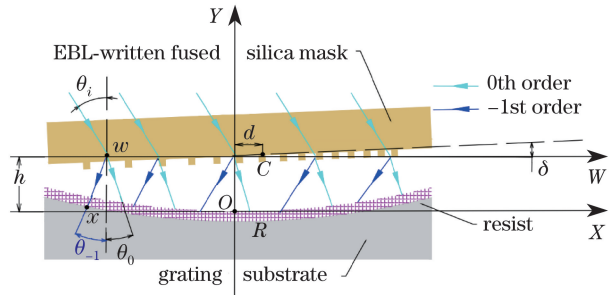


图3 制备软 X 射线平焦场光栅的原理图  
Fig. 3 Principle schematic of fabricating soft X-ray flat-field gratings

为保证 NFH 过程中得到尽可能高的干涉条纹对比度,要求熔石英掩模在 NFH 曝光条件下(曝光波长、入射角度)的零级与负一级衍射效率尽可能接近。根据严格耦合波分析方法<sup>[30-31]</sup>,可通过数值模拟得到 NFH 曝光条件下熔石英掩模的零级和负一级衍射效率随光栅槽形轮廓参数(线密度、占宽比和槽深)的演化规律,从而优化设计出熔石英掩模的槽深和占宽比。针对变间距熔石英掩模,以中心线密度为 2400 line/mm 的熔石英掩模为例,取 2100, 2250, 2400, 2600, 2800 line/mm 这 5 个典型的线密度,利用严格耦合波方法模拟这 5 个等间距熔石英掩模的衍射效率随占宽比和槽深的变化规律。根据 EBL 制作变间距熔石英掩模的工艺特点,

采用等槽深、占宽比渐变的优化策略,目的是保证熔石英掩模上不同线密度光栅在 NFH 曝光条件下具有尽可能一致的干涉条纹对比度。优化设计的结果是:熔石英掩模上不同线密度光栅的槽深设计值为 360 nm,占宽比为 0.42~0.54,可保证熔石英掩模在 NFH 时的干涉条纹对比度达到 90%。

如图 3 所示,以涂覆有光刻胶且曲率半径为  $R$  的凹面平焦场光栅基底中心为原点  $O$ ,熔石英掩模中心为  $C$ ,凹面光栅基底中心法线为  $Y$  轴,平焦场光栅凹面基底的中心切线方向设为  $X$  轴;建立平行于  $X$  轴的  $W$  轴,设熔石英掩模与平焦场光栅基底夹角为  $\delta$ (下文称夹角  $\delta$ ); $h$  表示熔石英掩模中心  $C$  到原点  $O$  的纵向距离(下文称间距  $h$ )。熔石英掩模线密度分布式为

$$N(w) = 2400[1 + 10^{-3}a_2(w-d) + 10^{-5}b_2(w-d)^2 + 10^{-7}c_2(w-d)^3], \quad (2)$$

式中: $w$  为熔石英掩模某一位置在  $W$  轴上的坐标; $d$  为熔石英掩模中心  $C$ (线密度 2400 line/mm 位置)到原点  $O$  的横向距离; $a_2$ 、 $b_2$  和  $c_2$  为熔石英掩模线密度分布方程式的系数。

入射激光经熔石英掩模后产生零级与负一级衍射光,衍射角度由光栅方程决定:

$$\theta_m(w) = \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \left[ \frac{m\lambda N(w)}{10^6} + \sin \theta_i \right] \right\}. \quad (3)$$

式中: $m$  为 0 或 -1,表示零级和负一级衍射光; $n$  为熔石英掩模与光刻胶光栅基底之间材料的折射率; $\lambda$  为曝光激光波长; $\theta_i$  为入射角。由(3)式可以看出,零级衍射角度恒定,与熔石英掩模的横向位置无关,负一级衍射角  $\theta_{-1}(w)$  与熔石英掩模位置  $w$  相关。熔石英掩模  $w$  处产生的负一级衍射光投射在光栅基底上的横向坐标为  $x$ ,它们之间的关系为

$$[x - R \sin(\delta)]^2 + \{R \cos(\delta) - h + (w - x) \tan[90^\circ - \theta_m(w)]\}^2 = R^2. \quad (4)$$

熔石英掩模位置  $w$  上的光栅图形转移到平焦场光栅基底位置  $x$  上,平焦场光栅在该位置的线密度满足:

$$N(x) = N(w). \quad (5)$$

上述分析推导出了平焦场光栅及其熔石英掩模线密度空间分布的转移关系式。由熔石英掩模线密度空间分布式、线密度空间分布转移关系式以及(5)式可以计算拟合出平焦场光栅的线密度空间分布式。设计熔石英掩模的线密度空间分布是其逆过程,通过经设计的平焦场光栅线密度空间分布式、线密度空间分布转移关系式以及(5)式可以计算拟合出熔石英掩模的线密度空间分布式:

$$N(w) = 2400(1 + 7.514 \times 10^{-3}w + 4.061 \times 10^{-5}w^2 + 1.184 \times 10^{-7}w^3). \quad (6)$$

NFH 制作平焦场光栅的参数为:曝光波长  $\lambda = 441.6$  nm,入射角  $\theta = 35.5^\circ$ ,光刻胶基底与熔石英掩模的间距  $h = 3$  mm,光刻胶基底与熔石英掩模夹角  $\delta = 0^\circ$ ,熔石英掩模线密度分布  $N(w)$  如式(6)所示。

## 4 EBL-NFH 实验过程的误差模拟分析

在利用 EBL-NFH 方法制备平焦场光栅过程中,分析 EBL 和 NFH 的主要制备误差对平焦场光栅线密度空间分布、平焦场谱仪光谱成像特性的影响,是优化设计 EBL-NFH 制作过程、最终实现平焦场光栅的主要研究内容之一。影响平焦场光栅线密度空间分布的主要因素包括:EBL 过程中的熔石英掩模制作偏差会随着 NFH 过程转移到平焦场光栅的光刻胶光栅掩模中,NFH 过程中曝光光路参数调整误差会导致光栅线密度空间分布的转移发生偏移。

### 4.1 EBL 熔石英掩模的实际制作误差分析

近年来,EBL 技术已经被用于制作大面积高性能衍射光栅<sup>[18]</sup>。由于 EBL 的位置精度有限,EBL 写光栅图形时的拼接误差不可避免,会导致衍射光栅存在罗兰鬼像<sup>[19]</sup>。在本研究中,NFH 制作软 X 射线平焦场光栅的熔石英掩模尺寸约为 50 mm × 30 mm,也会存在拼接误差。针对 EBL 写熔石英掩模存在的拼接误差,可以分别从 EBL 和 NFH 两方面进行抑制。2017 年,Heusinger 等<sup>[19]</sup>提出在 EBL 过程中将多通道曝光及精密调控两种方法相结合,可以将 EBL 拼接误差引入的罗兰鬼像强度的相对主衍射级次强度比值降低至约  $10^{-5}$  量级。罗兰鬼像会增加光谱的背景噪声,但由于信噪比为  $10^5$  量级,与采用机械刻划制作的光栅的杂散光水平相当<sup>[32]</sup>,因此电子束直写引入的拼接误差在可接受的范围内。本研究发现,在 NFH 曝光时通过沿着垂直于光栅矢量方向移动光栅基底,也可进一步有效抑制此方向的拼接误差,相关工作将另文总结。

受电子束分辨率的制约,EBL 制备的熔石英掩模的线密度空间分布不是连续变化的,而是呈阶跃式变化的,这也是 EBL 与 NFH 制备平焦场光栅线密度空间分布的主要区别。采用 EBL 光刻熔石英掩模图形时,要在熔石英掩模上分出多个小区域,在每个小区域逐一写等间距光栅<sup>[19]</sup>,而相邻小区域之

间光栅线密度的渐变规律根据第 3 部分设计的熔石英掩模的线密度空间分布(式(6))决定,由此实现了在整个熔石英掩模上线密度呈近似连续变化的变间距光栅。

以平焦场光栅光谱仪的光谱宽度为评价指标,此节主要进行两方面的模拟:EBL 分区数量对最终成像特性的影响,确定可接受的 EBL 直写熔石英掩模的最小分区数;给出可接受的 EBL 直写熔石英掩模线密度空间分布式系数的宽容度范围。

图 4 给出了在长度为 50 mm 的熔石英掩模上,分区数从 500 到 6000 递变过程中谱线宽度-波长的分布曲线,可以看出熔石英掩模分区数对光谱仪谱线展宽的影响。图中每条曲线对应在某一定分区数下 6 个典型工作波长的谱线宽度。虽然图 4 所示的谱线宽度曲线没有体现谱线宽度随波长的细节变化,但已能充分体现熔石英掩模分区数对光谱成像特性的影响。

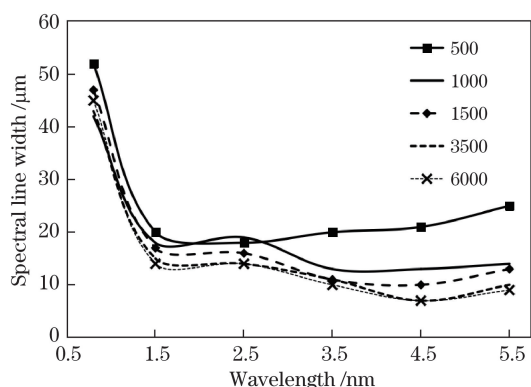


图 4 EBL 直写熔石英掩模分区数目对谱线展宽的影响  
Fig. 4 Effect of the subarea number of fused silica mask written by EBL on the spectral broadening

从图 4 可知,不同波段谱线宽度随分区数目的变化受到的影响程度不同。在短波段(0.8~2.5 nm)范围内,由于原本像差较大而受影响较小;在较长波段(2.5~6.0 nm)范围内,谱线宽度随着熔石英掩模光刻分区数增加而逐渐下降,当分区数大于 2000 时,谱线宽度基本较为稳定,不再变化。因此在 EBL 过程中,电子束分区光刻分区数目应取大于 2000,此时分区周期为  $50\text{ mm}/2000=25\ \mu\text{m}$ ,对应相邻分区的光栅周期增量为  $0.08\text{ nm}\pm 0.01\text{ nm}$ 。虽然目前可控的最小周期增量可以小于  $0.1\text{ nm}$ ,但要保证在整个面积( $50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ )内均实现高精度周期增量难度较大。在保证熔石英掩模质量的前提下,可以降低对电子束光刻的要求。从图 4 中可知当分区数目为 1500 时谱线展宽较小,此时分区周期为  $34\ \mu\text{m}$ ,

相邻分区光栅周期增量为  $0.11\text{ nm}$ ,因此将分区数目取为 1500。

对于 EBL 制作的熔石英掩模,影响谱线宽度的另一因素是整块熔石英掩模线密度分布式系数误差。为了确定其影响程度,分别对各个系数的变化情况进行模拟。设计的熔石英掩模线密度分布式系数误差表达式为

$$N(\omega) = 2400[1 + 7.514(1 + \delta_1\%)10^{-3}\omega + 4.061(1 + \delta_2\%)10^{-5}\omega^2 + 1.184(1 + \delta_3\%)10^{-7}\omega^3], \quad (7)$$

式中: $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 和 $\delta_3$ 为线密度分布式系数误差量,其取值范围分别为 $\pm 0.15$ 、 $\pm 0.65$ 和 $\pm 2.5$ 。线密度分布式中第一个系数值决定了平焦场光栅的焦平面位置<sup>[27]</sup>。图 5 为由线密度分布式第一个系数误差引起的离焦量(焦平面偏离 CCD 探测面的程度)的变化。当第一个系数沿着一个方向发生偏移时,焦平面相对于 CCD 探测面沿着一个方向整体偏移。根据此结果可采取平移光谱仪探测面位置来补偿此部分的离焦量。

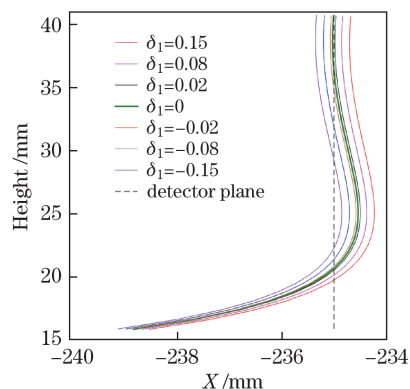


图 5 EBL 直写熔石英掩模线密度空间分布式系数误差  $\delta_1$  对聚焦曲线的影响

Fig. 5 Effect of the coefficient error  $\delta_1$  of the groove density distribution equation of an EBL-written fused silica mask on focal curve

图 6 所示为线密度分布式各系数误差对应的谱线展宽情况。由图 6(a)~(c)可知,线密度分布式三个系数误差中的  $\delta_1$  对谱线展宽的影响最大, $\delta_2$ 和 $\delta_3$ 对谱线展宽量的影响依次减小。这是由每个系数的数量级不同导致的。图 6(d)表示三个系数同时变化时的谱线展宽,可以直观地看出这种 EBL 熔石英掩模线密度误差量级引入的谱线展宽量,这种谱线展宽可通过 NFH 过程的光路调节得以补偿(分析见 4.3 节),即为 EBL 直写熔石英掩模线密度空间分布式系数的宽容度范围。

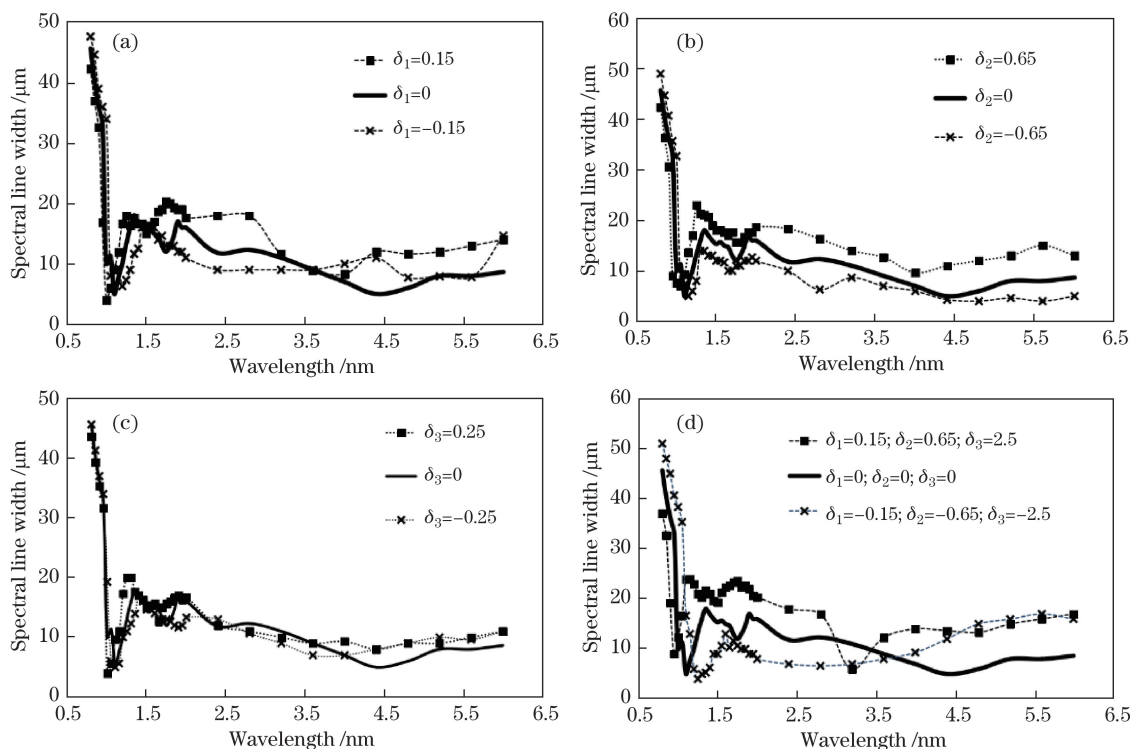


图 6 EBL 直写熔石英掩模的线密度空间分布式系数误差对谱线宽度的影响。(a)  $\delta_1$  误差；(b)  $\delta_2$  误差；(c)  $\delta_3$  误差；(d)  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  误差

Fig. 6 Effects of the coefficient errors of the groove density distribution equation of an EBL-written fused silica mask on spectral line width. (a) Error  $\delta_1$ ; (b) error  $\delta_2$ ; (c) error  $\delta_3$ ; (d) errors of  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  and  $\delta_3$

#### 4.2 NFH 过程中光刻胶光栅制作误差分析

NFH 过程是光栅制作的关键步骤之一。为了更好地评估通过 EBL-NFH 方法制得的光栅的质量,需评估 NFH 过程中各个制作参数误差对光谱宽度展宽的影响,并寻找相应的补偿方法。

对于具有一定曲率半径的球面光栅基底,进行 NFH 曝光光路调整的关键步骤包括:确定熔石英掩模与光栅基底两者的中心,以及两者之间姿态的调整。

由于熔石英掩模与光栅基底之间存在间隙,NFH 过程中必须将光栅基底中心与熔石英掩模中心横向错开一定距离  $d$  (如图 3 所示), $d$  由熔石英掩模中心处光栅的衍射角度及熔石英掩模与光栅基底的间距  $h$  决定。在 NFH 曝光光场中进行光路调节时首先要分别确定两者的中心,将熔石英掩模中心线密度为 2400 line/mm 的位置定义为熔石英掩模的中心。对准时首先让曝光光束以熔石英掩模中心位置(2400 line/mm 位置)的自准直角入射至熔石英掩模,将接收屏放入曝光光路中接收经熔石英掩模反射后的衍射光,沿熔石英掩模光栅矢量方向移动接收屏,直到接收屏接收到的反射衍射光自准直返回入射光源方向,此时接收屏边沿在

熔石英掩模上的投影位置即为熔石英掩模中心,再标记出熔石英掩模中心对应的曝光光场位置;最后移动光栅基底使其中心与曝光光场标记位置重合,便能使干涉条纹线密度为 2400 line/mm 的光场被记录在光刻胶基底中心上。熔石英掩模自准直衍射角测试误差为  $0.03^\circ$ ,则熔石英掩模中心位置的定位精度约为 0.06 mm,曲面光栅基底中心的测试误差为 0.002 mm,而平移台的移动精度为 0.002 mm,所以熔石英掩模与光栅基底中心的对准误差可控制在 0.1 mm 以内。

图 7 为模拟得到的光栅基底中心偏移量 ( $D_c$ ) 对成像特性的影响。考虑实际的对准精度, $D_c$  的模拟取值为 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1 mm。由图 7(a)可知,基底中心发生偏移时,焦平面发生少量移动(小于 0.5 mm),其对应的谱线宽度基本不变,如图 7(b)所示。说明即使中心误差为 1 mm,对其成像特性也几乎没有影响,而实际制作中对于保证 1 mm 以内的精度是能实现的。究其原因是光栅基底的曲率半径(15650 mm)相对于基底尺寸(光栅矢量方向 50 mm)而言很大,因此基底面型接近平面(基底中心与其外边沿高度差小于 0.02 mm),故当基底中心

发生偏移时光栅中心的线密度发生平移,而其线密度的分布式几乎不变(系数变化小于万分之一),所以成像时焦平面发生微量横向平移不会造成谱线展宽。

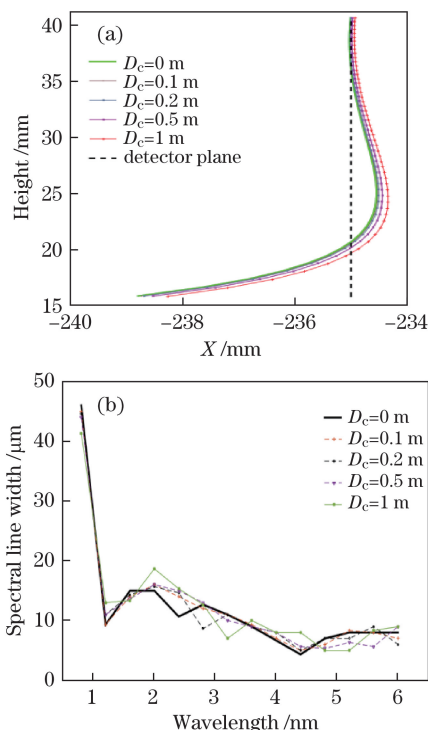


图 7 光栅基底中心偏移对光谱成像的影响。(a)焦平面;(b)谱线宽度

Fig. 7 Effect of the displacement of substrate center on spectral imaging character. (a) Focus plane; (b) spectral line width

图 8 所示为 NFH 中熔石英掩模与光栅基底间方位角的调整,包括 XY 面上的水平夹角  $\delta$ 、XZ 面上的转动角  $\epsilon$  及 ZY 面上的俯仰夹角  $\gamma$ 。当存在水平夹角  $\delta$  时,光栅矢量方向上的线密度分布会受到影响,下文对其影响程度进行了模拟分析。当转动角  $\epsilon$  存在误差时,例如转动角  $\epsilon=0.1^\circ$  时,会引入光栅线条方向与基底边沿夹角  $0.1^\circ$ ,但此偏转可以在使用光谱仪中的光栅时通过衍射方向对准进行纠正。若俯仰夹角  $\gamma$  存在误差,则当 X 轴方向距离恒定时,Z 轴方向上可以等效成存在渐变的间距误差,因为光栅有效面积为  $50\text{ mm}(X\text{ 轴})\times 30\text{ mm}(Z\text{ 轴})$ ,故当俯仰角度为  $0.1^\circ$  时,转换成距离误差时最侧边位置的偏差  $\Delta h=0.035\text{ mm}$ ,相对于距离误差  $0.1\text{ mm}$  很小,因此模拟时不考虑此误差。因此以下模拟基底曲率半径( $R$ )误差、入射角( $\theta$ )误差、间距( $h$ )误差和水平夹角(平行度, $\delta$ )误差的影响。

图 9 所示为 NFH 中各个参数误差对平焦点光栅谱线宽度影响的模拟。每个因素的模拟前提都是

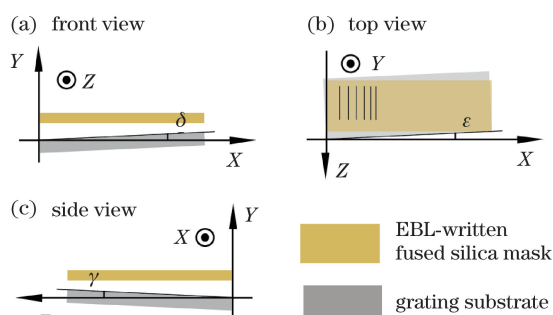


图 8 熔石英掩模与光栅基底的相对姿态角示意图  
Fig. 8 Schematic of the relative attitude angular of mask and grating substrate

先假定其它参数为理想设计值。图 9(a)为凹面光栅基底加工误差对光栅谱线宽度的影响分析,曲率半径误差模拟取值根据实际制作的基底面型误差决定。图 9(b)、图 9(c)和图 9(d)考虑了  $\theta$ 、 $h$  和  $\delta$  误差对光栅谱线宽度的影响。为了使讨论具有实际意义,根据实验确定各误差模拟值分别为  $\theta=35.5^\circ\pm 0.1^\circ$ 、 $h=(3\pm 0.1)\text{ mm}$  和  $\delta=0^\circ\pm 0.1^\circ$ 。

图 9(a)和图 9(b)表明, $R$  误差和  $\theta$  误差对谱线宽度的影响较小,几组曲线基本接近设计值。图 9(c)与图 9(d)分别表示  $h$  误差及  $\delta$  误差引入的谱线展宽。从两图可以看到,当参数误差的变化范围较小时,夹角  $\delta$  增加引入的谱线展宽趋势与厚度  $h$  增加引入的谱线展宽的变化趋势一致,因此在文中将这两种参数误差组成配对误差。相比较于  $\theta$  误差,可以很明显地看出这两个误差引入的谱线宽度曲线的变化较明显,因此认为 NFH 过程中光栅基底与熔石英掩模的距离  $h$  和夹角(或平行度) $\delta$  是导致谱线展宽的主要参数误差因素。

从以上分析可知,不同参数误差对谱线展宽的影响不一样。而实际的 NFH 光栅制作过程中不同的参数误差是同时存在的,因此还需要分析各参数误差对成像特性的综合影响。

图 10 所示为 NFH 过程中入射角  $\theta$ 、距离  $h$  和夹角  $\delta$  三种参数误差组合的作用结果。图 10(a)中为夹角和厚度均产生  $+0.1$ (或  $-0.1$ ) 误差时,谱线宽度整体展宽加大,即夹角与厚度的同方向误差导致谱线展宽严重。图 10(b)为夹角和厚度分别产生  $(+0.1\text{ 和 }-0.1)$  或  $(-0.1\text{ 和 }+0.1)$  误差时对谱线展宽的影响,此情况下的谱线宽度更接近设计值,即夹角和厚度的反向误差对谱线展宽有互相补偿的作用。因此可以得出结论:在 NFH 过程中虽然难以完全消除各参数误差,但是可以通过反向匹配误差来消除谱线展宽。

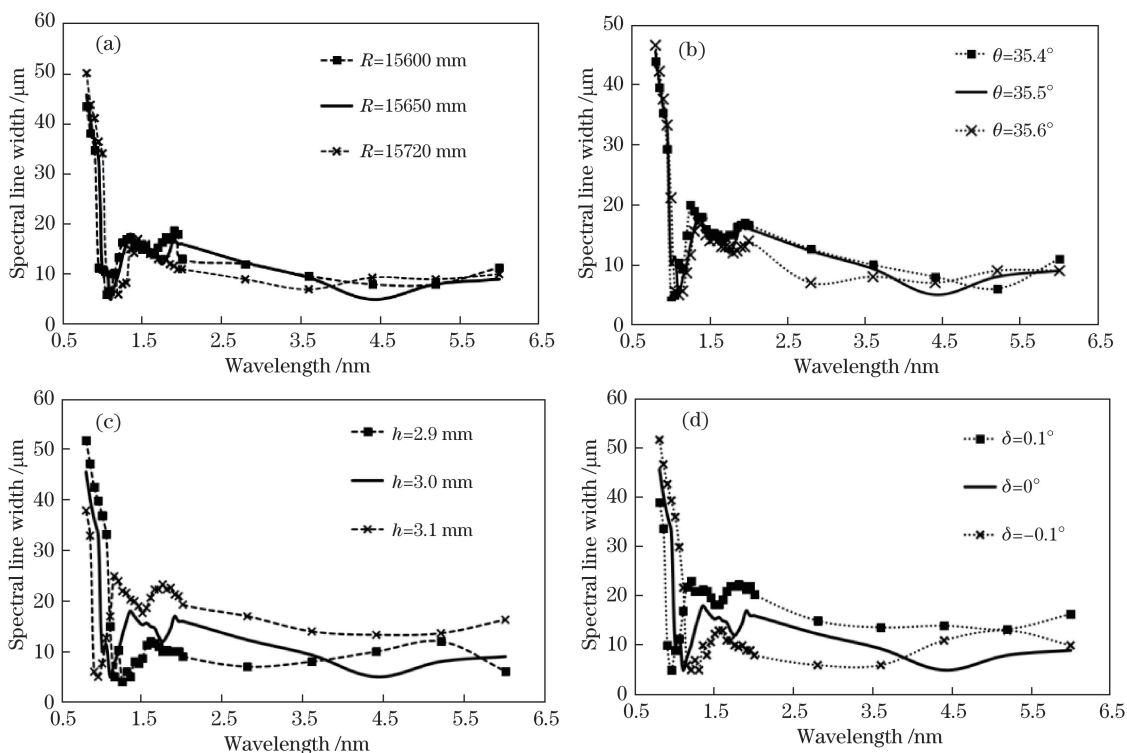


图 9 NFH 主要参数误差对谱线宽度的影响。(a)  $R$  误差;(b)  $\theta$  误差;(c)  $h$  误差;(d)  $\delta$  误差

Fig. 9 Effects of the main parameter errors of NFH on spectral line width.

(a)  $R$  error; (b)  $\theta$  error; (c)  $h$  error; (d)  $\delta$  error

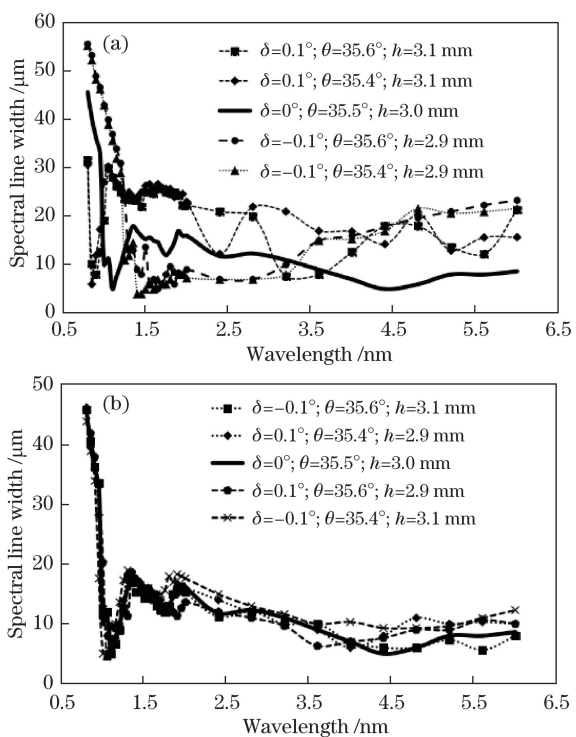


图 10 NFH 光路调整参数误差组合对谱线展宽的影响。

(a) 展宽严重;(b) 相互补偿

Fig. 10 Effects of different combinations of the alignment errors of the NFH optical configuration on spectral line width.

(a) Serious broadening; (b) mutual compensation

近场全息过程中多种影响因素引入的光栅制作误差会反映到光栅基底上,从宏观上看就是光栅有效面积发生改变,从微观上看就是上述线密度相对分布发生变化。在 NFH 光路调整的可控范围内(如图 9 和图 10 所示的误差范围内),引起光栅面积的变化量很小(光栅矢量方向变化小于 0.15 mm),而且导致光栅面积变化对光谱成像特性的影响隐含在线密度变化对成像特性(谱线宽度)的影响之中,因此本研究未分析各种 NFH 光路调整误差对光栅面积变化的影响。

### 4.3 EBL-NFH 过程误差补偿分析

理论上,EBL 制作熔石英掩模的线密度空间分布和 NFH 制作平焦场光栅光刻胶掩模的线密度空间分布对光谱成像效果相互影响。由于实际的光栅制备过程是先进行 EBL 后进行 NFH,因此针对 NFH 对 EBL 的误差补偿进行讨论,即若 EBL 直写熔石英掩模过程中有一定的误差,讨论通过调整 NFH 过程中的曝光光路参数,控制最终谱线展宽的程度,有可能降低对 EBL 过程线密度分布光刻精度的要求。

图 11 中的实线显示了 EBL 和 NFH 均没制作误差的谱线宽度曲线,虚点线对应仅存在 EBL 熔石英掩模误差带来的谱线展宽的变化。可以看出,该



误差导致的谱线展宽的变化趋势与图 9(c)、(d) 中误差夹角  $\delta$  增加和厚度  $h$  增加引入的谱线展宽的变化趋势一致。所以在 NFH 补偿过程中可以采取减小夹角  $\delta$  或减小厚度  $h$  的措施来消除谱线展宽。如图 11 所示的模拟结果显示, 分别对 NFH 的夹角  $\delta$  设置  $-0.17^\circ$  或厚度  $h$  设置  $-0.17$  mm 的调整偏差后, 在 EBL 存在线密度空间分布误差的条件下, 仍然将谱线展宽有效控制到理论设计水平附近, 此结果表明 NFH 曝光光路参数调整可以弥补 EBL 熔石英掩模误差的有效性。

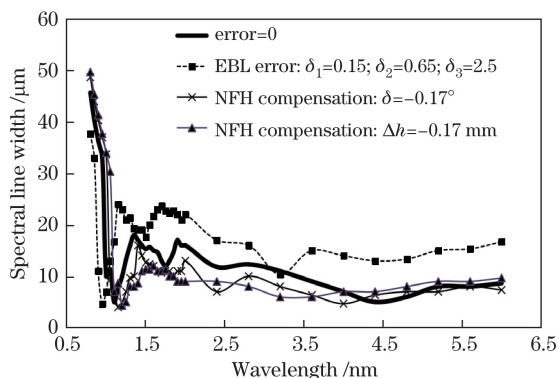


图 11 EBL 和 NFH 制作相关参数误差对光谱线宽的补偿

Fig. 11 Compensation of spectral line width by the fabrication error of EBL with NFH

综上所述, 对 EBL-NFH 过程参数误差采取有针对性的优化设计, 可以有效地对两者的制作误差进行补偿, 实现对最终光谱成像特性的有效调控。

## 5 结 论

电子束光刻-近场全息 (EBL-NFH) 是一种颇具潜力的制作软 X 射线平焦场光栅的制备方法, 兼具 EBL 和 NFH 两种制备方法的优势。本研究以工作波段在  $0.8 \sim 6.0$  nm 的软 X 射线平焦场光栅为例, 推导了 EBL 直写熔石英掩模与平焦场光栅线密度空间分布的转移关系; 在此基础上, 利用光线追迹的方法模拟分析了 EBL-NFH 法制作误差对平焦场光栅成像特性的影响, 以及 NFH 与 EBL 之间的误差补偿效果。分析结果表明, 在 EBL 法制备熔石英掩模过程中, EBL 分区数目对成像的影响较大, 但只要保证 EBL 直写宽度为 50 mm 的熔石英掩模分区数目至少在 1500 以上, 就可基本消除由此带来的谱线展宽。EBL 直写熔石英掩模线密度分布式系数误差会对谱线宽度产生影响, 前两个系数  $a_2$  和  $b_2$  的影响较大, 因此在采用 EBL 制备熔石英掩模过程中应尽可能保证线密度分布式中这两个参数的精度。

对 NFH 过程的制作误差进行分析后可知: 曝光入射角度误差对光谱成像的影响较小; 光栅基底与熔石英掩模二者之间的平行度误差及间距误差对光谱成像的影响较大, 可以通过反向匹配这两个误差有效抑制谱线展宽。通过优化 NFH 过程光栅基底与熔石英掩模之间的间距和平行度的调整参数误差组合, 可以有效地补偿 EBL 熔石英掩模的线密度空间分布误差对光栅光谱仪成像特性的影响。本工作是基于 EBL-NFH 方法开展的软 X 射线平焦场光栅的关键研究内容之一, 有利于发展 EBL-NFH 法制备高线密度、高精度线密度空间分布衍射光栅的研究。

致谢 感谢德国弗雷德里希席勒耶拿大学应用物理所 Ernst-Bernhard Kley 博士和 Kay Dietrich 博士关于电子束光刻方案的有益讨论。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y T, Zhang Q R, Gu Y Q, *et al.* Space-resolved study of neon-like titanium soft X-ray lasing[J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 46(6): 1103-1107.  
李玉同, 张启仁, 谷渝秋, 等. 类氖钛软 X 射线激光空间发射区域研究[J]. *物理学报*, 1997, 46(6): 1103-1107.
- [2] Weller M E, Safronova A S, Clementson J, *et al.* Extreme ultraviolet spectroscopy and modeling of Cu on the SSPX Spheromak and laser plasma "Sparky"[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E101.
- [3] Masami T, Hideto Y, Michiyoshi T. Development of a sub-eV resolution soft-X-ray spectrometer for a transmission electron microscope[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2001, 50(2): 101-104.
- [4] Imazono T, Koike M, Koeda M, *et al.* A multilayer grating with a novel layer structure for a flat-field spectrograph attached to transmission electron microscopes in energy region of 2-4 keV[C/OL]. (2017-05-17)[2017-10-26]. <https://www.osti.gov/biblio/22004041>.
- [5] Lepson J K, Beiersdorfer P, Clementson J, *et al.* EUV spectroscopy on NSTX[J]. *Journal of Physics B*, 2010, 43: 144018.
- [6] Beiersdorfer P, Magee E W, Brown G V, *et al.* Extended-range grazing-incidence spectrometer for high-resolution extreme ultraviolet measurements on an electron beam ion trap[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11E422.
- [7] Shen Y C, Lyu B, Du X W, *et al.* Impurity emission behavior in the soft X-ray and extreme ultraviolet

- range on EAST[J]. Plasma Science and Technology, 2015, 17(3): 183-187.
- [8] Shen Y C, Lyu B, Wang F D, *et al.* Observation of molybdenum emission from impurity-induced long-lived  $m=1$  mode on the experimental advanced superconducting tokamak[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(6): 065205.
- [9] Liu S Y, Liu Z T, Wu J R, *et al.* Hyperspectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints with application of flat-field grating[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0511004.  
刘盛盈, 刘震涛, 吴建荣, 等. 基于平场光栅的稀疏约束鬼成像高光谱相机[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0511004.
- [10] Chowdhuri M B, Morita S, Goto M, *et al.* Spectroscopic comparison between 1200 grooves/mm ruled and holographic gratings of a flat-field spectrometer and its absolute sensitivity calibration using bremsstrahlung continuum[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 023501.
- [11] Chen H Y, Liu Z K, Liu Y, *et al.* Design of multi-area grating for soft X-ray flat-field spectrograph[J]. Applied Optics, 2015, 54(18): 5675-5679.
- [12] Wang Q B, Liu Z K, Zheng Y C, *et al.* Alignment method for fabricating a parallel flat-field grating used in soft X-ray region[J]. Applied Optics, 2015, 54(18): 5782-5787.
- [13] Namioka T, Koike M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings[J]. Applied Optics, 1995, 34(13): 2180-2186.
- [14] Koike M, Namioka T. Plane gratings for high-resolution grazing-incidence monochromators: holographic grating versus mechanically ruled varied-line-spacing grating[J]. Applied Optics, 1997, 36(25): 6308-6318.
- [15] Kley E B, Clausnitzer T. E-beam lithography and optical near field lithography: new prospects in fabrication of various grating structures[C]. SPIE, 2003, 5184: 115-125.
- [16] Lin D K, Chen H Y, Kroker S, *et al.* Design of soft X-ray varied-line-spacing grating based on electron beam lithography-near field lithography[C]. SPIE, 2016, 10022: 100220S.
- [17] Li Y F, Chen H Y, Kroker S, *et al.* Near-field holography enhanced with antireflection coatings: an improved method for fabricating diffraction gratings[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(9): 090501.
- [18] Zeitner U D, Oliva M, Fuchs F, *et al.* High performance diffraction gratings made by e-beam lithography[J]. Applied Physics A, 2012, 109(4): 789-796.
- [19] Heusinger M, Banasch M, Zeitner U D. Rowland ghost suppression in high efficiency spectrometer gratings fabricated by e-beam lithography[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6182-6190.
- [20] Gâté V, Bernaud G, Veillas C, *et al.* Fast dynamic interferometric lithography for large submicrometric period diffraction gratings production[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 091712.
- [21] Wang Q B, Liu Z K, Chen H Y, *et al.* Design of parallel flat-field gratings in soft X-ray region[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0805001.  
王庆博, 刘正坤, 陈火耀, 等. 软 X 射线并联平场光栅的设计[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0805001.
- [22] Kong P, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0205001.  
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0205001.
- [23] Zhao X L, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Integrated design to complement aberrations of spherical focusing mirrors and concave holographic gratings in spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0605002.  
赵旭龙, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 光谱仪中球面聚焦反射镜和凹面全息光栅像差互补的一体化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0605002.
- [24] Zhou Q, Zeng L J, Li L F. Numerical simulation and experimental demonstration of error compensation between recording structure and use structure of flat-field holographic concave gratings[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(7): 1674-1678.  
周倩, 曾理江, 李立峰. 平场全息凹面光栅制作结构与使用结构之间误差补偿作用的数值模拟与实验验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1674-1678.
- [25] Pi D R, Huang Y S, Zhang D W, *et al.* Optimization of the flat-field holographic concave grating in wide spectral range[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1009-1016.  
皮道锐, 黄元申, 张大伟, 等. 宽光谱平像场全息凹面光栅的优化研究[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 1009-1016.
- [26] Kong P, Tang Y G, Bayanheshig, *et al.* Compensation effects between parameter errors of flat-field holographic concave gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0705001.  
孔鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 平场全息凹面光栅结构参量误差之间的补偿作用[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0705001.
- [27] Chen H Y, Liu Z K, Wang Q B, *et al.* Effect of curve groove on the spectral resolution for soft X-ray

- holographic flat-field gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23): 234203.
- 陈火耀, 刘正坤, 王庆博, 等. 软 X 射线全息平焦场光栅的条纹弯曲现象及其对光谱分辨率的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63(23): 234203.
- [28] Dong Q L, Liu Y Q, Teng H, *et al.* Ray tracing method for the grazing incidence flat-field imaging soft X-ray spectrometer[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(6): 065206.
- [29] Chen H Y. Design and fabrication of soft X-ray holographic flat-field gratings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 17-26.
- 陈火耀. 软 X 射线全息平焦场光栅的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 17-26.
- [30] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.
- [31] Zhang J M, Wu X J, Ma X H, *et al.* Design and optimization of transmission gratings for spectral beam combining technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1005001.
- 张俊明, 吴肖杰, 马晓辉, 等. 用于光谱合束技术的透射光栅设计与优化[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1005001.
- [32] Li X T, Yu H L, Qi X H, *et al.* 300 mm ruling engine producing gratings and echelles under interferometric control in China[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1819-1826.