

文章编号 1004-924X(2013)07-1780-06

# 软 X 射线双频光栅设计及制作

刘正坤\*, 刘颖, 邱克强, 徐向东, 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:**以软 X 射线双频光栅作为剪切干涉元件,研究了剪切干涉法在激光等离子体诊断实验中的应用。为提高实验成功率,研究了双频光栅栅线的平行度及光栅效率。根据软 X 射线双频光栅栅线平行度与剪切干涉系统的干涉图像的关系,理论计算得出光栅平行度的指标要求。在全息曝光工艺中,通过衍射光斑位置检测法和莫尔条纹法确认光栅平行性,保证光栅平行度达到  $0.01^\circ$ 。利用合肥国家同步辐射实验室计量站对双频光栅的两组 -1 级衍射效率进行测试。测试结果显示,光栅平行性满足系统要求,光栅的两组 -1 级衍射效率均达到 10%。软 X 射线双频光栅剪切干涉实验结果表明,双频光栅平行度及衍射效率满足激光等离子体诊断实验需求。

**关键词:**软 X 射线双频光栅;全息曝光;剪切干涉仪

**中图分类号:**O436.1;TH 744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1780

## Design and fabrication of soft X-ray double frequency grating

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

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

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

**Abstract:** Applications of a soft X-ray double frequency grating shearing interferometer to laser plasma diagnostics were explored by using a soft X-ray double frequency grating as the shearing interferometric element. To improve the success rate of experiment, this paper analyzed the line parallelism and diffraction efficiency of the double frequency grating. On the basis of the relationship between the line parallelism of the double frequency grating and the interferogram of shearing interferometer, it calculated the technical requirements of line parallelism of the grating. The fabrication method was described, the line parallelism of the grating was realized with the diffraction spot position monitoring, and the moiré fringe method was applied in line parallelism judgment for the grating. A double frequency grating with line parallelism less than  $0.01^\circ$  was fabricated. The two groups of diffraction efficiencies of -1 order for the grating were examined in spectral radiation standard and metrology beamline of Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory, and the results show both of them are over 10% at 13.9 nm. A shearing interferometer was set up for dense plasma diagnostics, whose results demonstrate that the parallelism and diffraction efficiency of the double-frequency grating can meet the experimental requirements.

**Key words:** soft X-ray double frequency grating; holographic exposure; shearing interferometer

## 1 引言

X射线激光具有波长短、强度高和相干性好等优点。以X射线激光作探针,利用软X射线马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪可以直接测量到临界面附近激光等离子体电子密度的空间分布,是诊断稠密等离子体电子密度的直接而有效的方法<sup>[1-2]</sup>。但该方法结构复杂,调节比较繁琐,使得实验的效率很低。在可见光波段,以双频光栅(Double Frequency Grating, DFG)为核心元件的剪切干涉系统,对温度场、光学元件等进行测试,是一种成熟的光学测试方法<sup>[3-4]</sup>。但可见光波段的DFG结构不能应用于软X射线波段,因此本文提出一种软X射线DFG的结构及制作方法。利用该方法制作的DFG已成功应用于激光等离子体电子密度诊断实验,但实验研究发现DFG的平行性对系统有较大的影响。

剪切干涉系统得到的数据处理中剪切方向精度决定了后续数据处理的精度<sup>[5]</sup>。常规剪切干涉系统中剪切方向由系统中元件的相对位置决定<sup>[6]</sup>,而DFG剪切干涉系统的剪切方向由剪切元件——DFG决定,因此,分析光栅与剪切干涉结果的关系并提出相应的指标参数是将软X射线DFG剪切干涉系统成功应用于等离子体密度诊断的关键。在可见光波段,系统通过一次全息曝光中转动基片在曝光光路中角度的方法产生DFG中的两组频率<sup>[3,7]</sup>。由于在同一光路中曝光,转台精度即可保证两组光栅的平行性要求<sup>[7]</sup>。另外,栅线平行度造成的误差远低于系统误差。因此,现有文献中均未对平行性进行分析。而软X射线短波长、辐射强,应用于软X射线波段的光栅槽深多为纳米级,槽型结构要求严格<sup>[8]</sup>,为了保证软X射线DFG结构得到精确控制,分2次全息光刻—离子束刻蚀法制作光栅。制作工艺中基片被2次装夹于全息曝光光路系统中,2组光栅的平行度偏差远大于文献<sup>[7]</sup>中可见光波段DFG。因此,本文主要研究软X射线DFG对剪切干涉系统的影响,理论计算光栅参数要求,并提出相应的制作及检测方法。本文第2部分分析平行度对剪切干涉系统的测试的偏差,提出对光栅平行度的要求;第3部分介绍在制作工艺中的实现方法及判断标准;第4部分介绍了软X射线

DFG在等离子体诊断中的实验结果。

## 2 双频光栅平行度对剪切干涉系统的影响分析

入射光入射到DFG表面,经光栅衍射后形成的2组-1级衍射光束,衍射角度满足文献<sup>[9]</sup>公式。DFG的两组光栅栅线平行时,CCD接收到的剪切干涉条纹平行于Z轴,剪切系统剪切量及干涉条纹周期和理论设计相同<sup>[10]</sup>。

当DFG的2组光栅存在倾角 $\Delta\varphi$ 时,剪切干涉条纹相对于理想情况产生倾角 $\gamma$ ,剪切干涉方向发生变化。如图1所示,当光栅完全平行时,被测光学元件只存在X轴方向的剪切 $\Delta x$ 。当DFG不平行时,由于锥角衍射的影响,被测波面或光学元件在X轴方向( $\Delta x$ )及Z轴方向( $\Delta z$ )均存在剪切,剪切方向偏离实验预期(仅产生X轴向剪切 $\Delta x$ ),对干涉系统的设计及数据处理均产生影响。

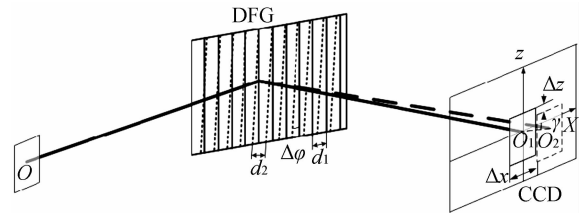


图1 双频光栅栅线夹角对剪切干涉系统的影响  
Fig. 1 Effects of DFG lines' angle on shearing interferometer

以文献<sup>[11]</sup>中光栅衍射普适公式为基础,建立光栅衍射的示意图如图2。以垂直于光栅1栅线的平面为 $X_1Y_1$ 面,以光栅栅线方向为 $Z_1$ 轴建立坐标系。为了方便计算,以光栅2的栅线方向为 $Z_2$ 轴,建立坐标系 $X_2Y_2Z_2$ 。当光栅1与光栅2栅线存在夹角 $\Delta\varphi$ 时,入射面与 $X_1Y_1$ 平面的夹角为 $\varphi_1$ ,与 $X_2Y_2$ 平面的夹角为 $\varphi_2$ ( $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$ ),通过锥角衍射方程计算出两组衍射光线在 $X_1Y_1Z_1$ 及 $X_2Y_2Z_2$ 坐标系中的四组参数 $\theta_{-1(1)}$ ,  $\varphi_{-1(1)}$ ,  $\theta_{-1(2)}$ ,  $\varphi_{-1(2)}$ ,分析2组衍射光的夹角。

根据文献<sup>[11]</sup>中给出的普适光栅衍射方程:

$$\sin \theta_m \cos \varphi_m = \sin \theta \cos \varphi + m \frac{\lambda}{d},$$

$$\sin \theta_m \sin \varphi_m = \sin \theta \sin \varphi. \quad (1)$$

由式(1)可知,由于DFG的两组光栅的周期不同,当DFG的2组光栅平行,入射面与光栅

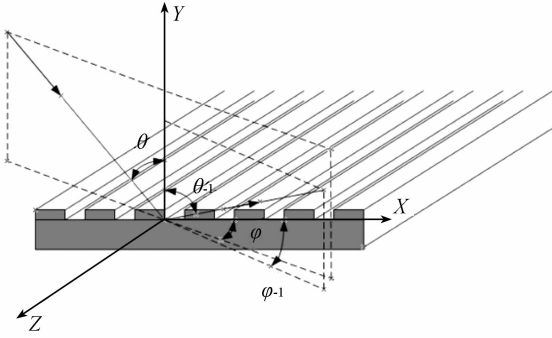


图 2 入射面与光栅栅线不垂直时的衍射角示意图  
Fig. 2 Diffraction angle on the grating lines not perpendicular to the plane of incidence

$$\mathbf{N}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \sin \theta_{-1(1)} & \cos \theta_{-1(1)} & 0 \\ \sin \theta_{-1(2)} \cos(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi) & \cos \theta_{-1(2)} \sin(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi) & \sin(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi) \end{vmatrix} =$$

$$(\cos \theta_{-1(1)} \sin \theta_{-1(2)} \sin(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi))i - (\sin \theta_{-1(1)} \sin \theta_{-1(2)} \sin(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi))j +$$

$$(\sin \theta_{-1(1)} \cos \theta_{-1(2)} - \sin \theta_{-1(2)} \cos(\varphi_{-1(2)} - \Delta\varphi) \cos \theta_{-1(1)})k. \quad (3)$$

光栅栅线不平行造成的夹角  $\gamma$  为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{N}_2}{|\mathbf{N}_1| |\mathbf{N}_2|}\right). \quad (4)$$

Z 轴向产生的剪切量为:

$$\frac{\Delta z}{\Delta x} = \tan \gamma. \quad (5)$$

软 X 射线剪切干涉系统中, 波长为 13.9 nm, 入射角为  $84^\circ$ , 剪切干涉条纹的方向随 DFG 中 2 组光栅夹角的变化关系见图 3。根据等离子体诊断中物理实验要求, 这里将 DFG 的平行度精度确定为  $0.01^\circ$ , 剪切干涉条纹转动角度为  $0.8^\circ$ ,  $\Delta x$  理论

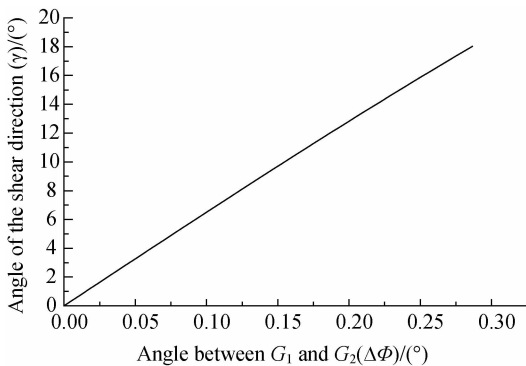


图 3 剪切干涉条纹偏转角度与 DFG 夹角的关系  
Fig. 3 Relationship between the grating angles in DFG and the angles of shearing fringes

栅线不垂直时, 也会引起衍射光的夹角发生变化。但这里主要分析元件的制作误差, 不考虑剪切干涉系统中光学元件的装调误差。设入射面垂直于光栅 1 的光栅线条, 不存在锥角衍射, 即  $\varphi_{-1(1)} = 0$ ,  $-1$  级的衍射角为  $\theta_{-1(1)} = \arcsin\left(\sin \theta_0 - \frac{\lambda}{d}\right)$ ;

光栅 2 的衍射角按照公式(1)计算  $\theta_{-1(2)}$ ,  $\varphi_{-1(2)}$ 。

如图 1 所示, 当栅线完全平行时, 2 组衍射光线均位于平面 XY 中, 而栅线不完全平行时, 2 组衍射光线决定的平面与 XY 平面的夹角  $\gamma$ :

平面的  $z=0$ ; 法向量:  $\mathbf{N}_1 = (0, 0, 1)$ ; (2)

光栅 2 的  $-1$  级衍射光线与光栅 1 的  $-1$  级衍射组成的平面的法向量:

设计约为  $80 \mu\text{m}$ , 光栅栅线不平行性的影响  $\Delta z$  约为  $1 \mu\text{m}$ , 考虑到系统的精度要求在  $5 \mu\text{m}$  以内, 因此该误差对系统的影响可以忽略不计。

### 3 双频光栅的制作及平行度判断方法

#### 3.1 双频光栅制作工艺

DFG 的全息制作光路系统如图 4 所示。Kr<sup>+</sup> 激光器波长为 413.1 nm, 光束经分束镜(BS)后, 经扩束系统(物镜和针孔及透镜系统)扩束为 2 路平行光, 两束光与光栅基底的夹角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。下面以实际系统中设计的 DFG 参数为例进行说明。光栅 1(1 000 L/mm)的曝光角度为  $\alpha = 45.374^\circ$ ,  $\beta = 17.374^\circ$ , 选取转动光栅基底的方法得到光栅 2(线密度为 1 002.5 L/mm)的曝光角度为  $\alpha = 45.138^\circ$ ,  $\beta = 17.138^\circ$ 。由光栅 1 的全息光路转变为光栅 2 的全息光路时, 光栅的转动角度变为  $0.236^\circ$ , 精密转台精度为  $0.002^\circ$ , 能够保证两组光栅的周期与设计值的偏差在误差范围内。

DFG 中 2 组光栅的平行性是通过在全息曝光光路中对衍射光及反射光的位置监测保证的。首先制作光栅 1, 石英基底上  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  的 Shipley S1400 光刻胶, 经全息曝光后, 用 He-Ne 激光

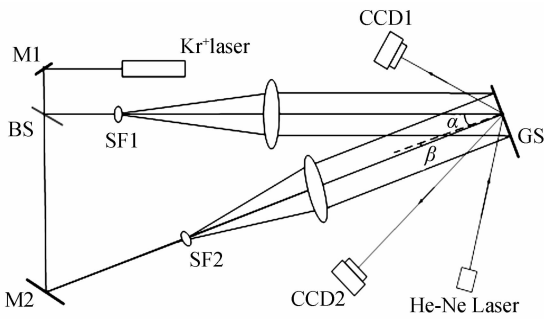


图 4 DFG 的全息制作光路

Fig. 4 Holographic arrangement for soft X-ray DFG

入射到基底上,利用光栅潜像<sup>[12]</sup>,用 CCD1 及 CCD2 分别记录光栅的 0 级和 -1 级衍射光斑的位置 A0 和 A1,作为第二次全息曝光制作光栅 2 时光栅基底姿态调整的基准。经显影、后烘、灰化及离子束刻蚀等光栅制作工艺<sup>[13]</sup>得到光栅 1。清洗去胶,再次涂光刻胶,将基片装入光路,调整基片姿态,将 He-Ne 激光入射到光栅 1 产生的 0 级和 -1 级衍射光斑在 CCD1 及 CCD2 上的位置与 A0 及 A1 重合,保证装夹后光栅与全息光路的干涉条纹平行。调节完成后,转台转动 0.236°,得到光栅 2 的全息光路。全息曝光、显影,完成光栅 2 的光刻胶掩模的制作。

光栅平行度的判断标准:

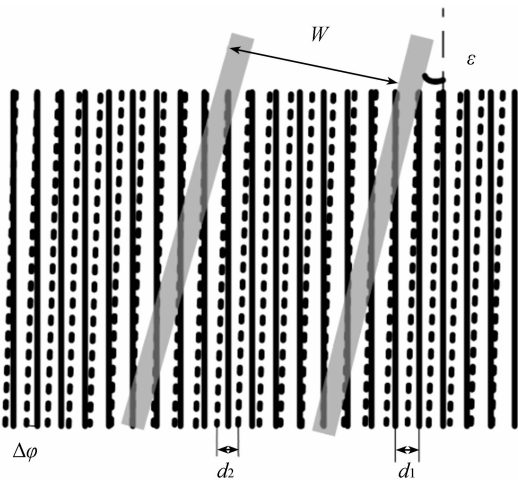


图 5 DFG 倾角与莫尔条纹倾角关系

Fig. 5 Relationship between the angles of grating lines in DFG and moiré fringe

2 组不同频率的光栅制作在同一基底上,会产生莫尔条纹,如图 5 所示。当光栅的周期分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,夹角为  $\Delta\varphi$  时,两组光栅形成的莫尔条纹

与光栅 1 栅线之间形成夹角  $\epsilon$ 。

莫尔条纹的周期与 2 组光栅夹角的关系:

$$W = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \Delta\varphi}}, \quad (6)$$

$$\tan \epsilon = \left(1 - \frac{d_2}{d_1 \cos \theta}\right) \cot \Delta\varphi. \quad (7)$$

DFG 的线密度分别为 1 000 L/mm 和 1 002.5 L/mm,当光栅 1、2 栅线夹角很小时,莫尔条纹与光栅 1 之间倾角  $\epsilon \gg \Delta\varphi$ 。莫尔条纹的周期约为 400  $\mu\text{m}$ ,当 DFG 的倾角  $\Delta\varphi = 0.01^\circ$  时,  $\epsilon = 4^\circ$ ,在显微镜下即可判断莫尔条纹的倾斜。在完成光栅 2 的掩模制作时,利用光栅 2 的掩模与光栅 1 形成的莫尔条纹的倾角  $\epsilon$ ,进一步判断 DFG 的平行性。当倾角  $\epsilon > 4^\circ$  时,不进行离子束刻蚀工艺,重复光栅 2 的制作工序,从而提高 DFG 制作成功率。

### 3.2 衍射效率检测

根据干涉系统实验需求,本文按照上述工序制作了软 X 射线 DFG,线密度分别为 1 000 L/mm 和 1 002.5 L/mm,两组光栅占空比控制在 0.3~0.4,槽深为 14~15 nm,清洗后,表面镀金膜 40 nm。利用合肥同步辐射光束线中计量站进行衍射效率测试,入射角为  $84^\circ$ ,入射光波长为 13.9 nm,衍射角约为  $78.7^\circ$ ,测试结果见图 6,图中给出了入射光、0 级反射光及 -1 级衍射光的相对强度值。横坐标为光束与光栅法线的夹角,入射光测试时,将光栅平移出光路,用探测器对入射光斑进行测试,光栅移入光路时,探测器进行角度扫描测试 -1 级和 0 级衍射效率。

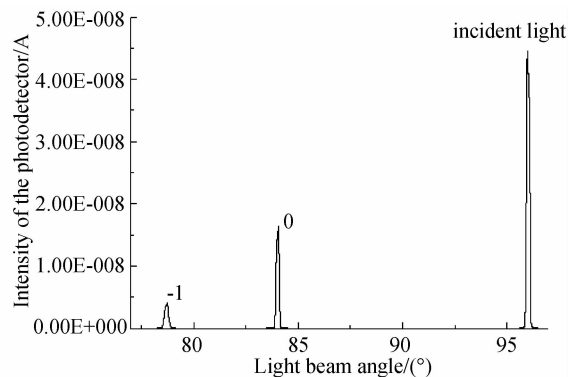


图 6 DFG 的 0 级和 -1 级衍射强度测试

Fig. 6 Measured intensity for DFG (1 000 L/mm, 1 002.5 L/mm) in order 0, -1, and incident light at wavelength of 13.9 nm

由于 DFG 的两组光栅仅相差 2.5 L/mm, 衍射角分别为  $78.70^\circ$  和  $78.71^\circ$ , 在同步辐射计量站无法将两组衍射光分开测试, 因此, 这里测试的衍射效率是两组光栅的 -1 级衍射效率之和。衍射效率是衍射光强度与角度的积与直通光强度和扫描角度的积二者间的比值, 由图 6 的结果计算得出 DFG 两组光栅 -1 级衍射效率之和约为 12%, 达到预期设计指标 10%。

## 4 实验结果

利用制作的软 X 射线 DFG 作为剪切分束元件, 2011 年, 在上海神光九路系统上进行了软 X 射

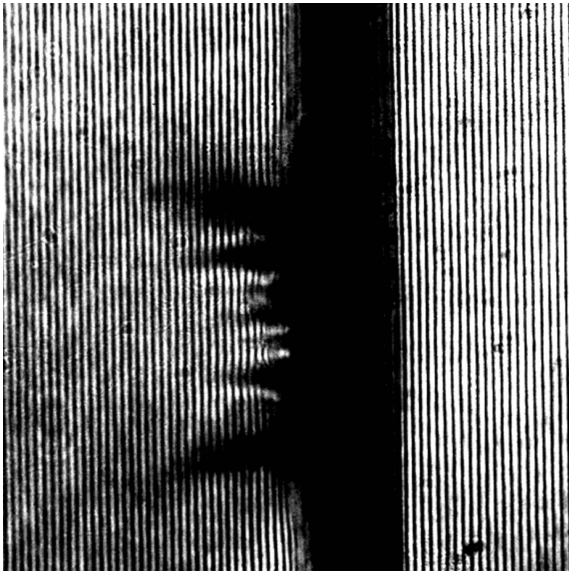


图 7 软 X 射线 DFG 剪切干涉系统试验结果

Fig. 7 Experiment result of shearing interferometer with soft X-ray DFG

线剪切干涉实验, 取得了初步试验成果, 如图 7 所示。图中黑色为等离子体平面靶, 左边黑色絮状物为靶面被激光轰击出溅射物, 靶及等离子体边缘的干涉条纹为双频光栅的 2 组 -1 级衍射光束间的干涉条纹, 即剪切干涉条纹。由于轰击激光能量偏弱, 等离子体较弱, 剪切干涉条纹弯曲度不明显。但从实验结果可知, 采用全息曝光系统中衍射光对准法满足软 X 射线 DFG 干涉系统对平行性的要求, 被测靶的剪切方向与实验预期偏差在实验测试精度范围以内。同时剪切干涉条纹强度呈正弦曲线分布, 数据处理方便, 结果表明光栅衍射效率满足实验要求。

## 5 结 论

本文主要针对软 X 射线 DFG 剪切干涉系统中的软 X 射线 DFG 平行性及其对剪切干涉系统的影响进行了分析, 并提出了在制作工艺中保证平行度及判断平行性的方法, 为提供高质量的软 X 射线剪切元件提供了技术保障。剪切干涉实验结果表明光栅的平行度优于  $0.01^\circ$ , 光栅衍射效率高于 10% 时, 能够满足目前激光等离子诊断实验需求。文中主要从剪切干涉元件—DFG 角度进行了分析, 对光栅平行性及衍射效率进行了测试。目前的工作主要是从工程的角度解决应用问题, 仍存在许多问题需要进一步研究: 实际中 DFG 的效率理论计算及光栅的槽型优化问题; 诊断系统中剪切干涉系统成像质量的进一步提高; 该结构的 DFG 能否应用于更短波段等。软 X 射线 DFG 剪切干涉系统在等离子体诊断中的应用研究仍处于研究阶段, 目前存在的问题将在后续研究中逐步解决。

## 参考文献:

- [1] SMITH R F, DUNN J, NILSE J, *et al.*. Picosecond X-ray laser interferometry of dense plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89: 065004-1.
- [2] JORGE F, JORGE J R, MARIO C M, *et al.*. Picosecond-resolution soft-X-ray laser plasma interferometry [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(19): 3938-3946.
- [3] WYANT J C. Double frequency grating lateral shear interferometer [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(9): 2057-2060.
- [4] 钱江源, 明海, 谢建平. 双频光栅剪切干涉术在激光

光场相干性测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(5): 139-143.

QIAN J Y, MING H, XIE J P. Application of double frequency grating shearing interferometry in measurement of coherence of laser light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(5): 139-143. (in Chinese)

[5] KEVIN L B. X-ray wavefront analysis and phase reconstruction with a two-dimensional shearing interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(8): 086501.

[6] 陈光华, 陈林, 刘寿先. 剪切干涉测量电缆枪等离子体电子密度 [J]. *光子学报*, 2007, 36(12):

2192-2195.

CHEN G H, CHEN L, LIU S X. Electron density measurement for C-Gun plasma using shearing interferometer [J]. *Acta Photonica. Sin.*, 2007, 36 (12): 2192-2195. (in Chinese)

[7] LIU Y, TAN X, LIU ZH K, *et al.*. Soft X-ray holographic grating beam splitter including a double frequency grating for interferometer pre-alignment [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14761-14770.

[8] 谭鑫,刘颖,徐向东,等. 13.9 nm Laminar 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 Laminar grating as beam splitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 33-37. (in Chinese)

[9] 付绍军,洪义麟,陶晓明,等. 离子束刻蚀双频光栅的实验研究 [J]. *量子电子学报*, 1992, 9(2): 186-190.

FU SH J, HONG Y L, TAO X M, *et al.*. Experimental research of double frequency grating with ion beam etching technique [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1992, 9(2): 186-190. (in Chinese)

[10] 孙晓泉,明海,谢建平,等. 双频光栅剪切干涉术检测钛宝石棒热焦距 [J]. *中国激光*, 1995, 22(2):

126-128.

SUN X Q, MING H, XIE J P, *et al.*. Measurement of the thermal lensing of a Ti: sapphire rod with double frequency holographic grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, 22(2): 126-128. (in Chinese)

[11] 李立峰. 光栅的电磁场理论 [M]. 2003:13-14.

LI L F. *Electromagnetic theory of grating* [M]. 2003: 13-14. (In Chinese)

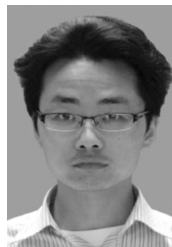
[12] 赵劲松,李立峰,吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术 [J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 851-858.

ZHAO J S, LI L F, WU ZH H. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 851-858. (in Chinese)

[13] 徐向东,刘正坤,邱克强,等. 用于 1 m Seya-Namioka 单色仪的 1 200 lp/mm Laminar 光栅 [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 1m Seya-Namioka monochromator at NSRL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 1-8. (in Chinese)

#### 作者简介:



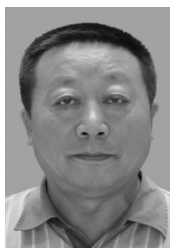
刘正坤(1981-)男,河南信阳人,博士,副研究员,2004年于中国科学技术大学获学士学位,2009年于中国科学技术大学获博士学位,主要从事衍射光学元件的制作及光学检测等方面的研究。E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn



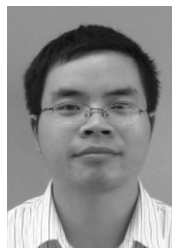
徐向东(1963-)男,安徽合肥人,博士,高级工程师,2001年于中国科学技术大学获博士学位,主要从事微细加工、衍射光学元件设计与制作的研究。E-mail: xxd@ustc.edu.cn



刘颖(1972-)女,天津人,博士,副教授,2001年于中科院院长光所获博士学位,主要从事微细加工、衍射光学元件设计与制作的研究。E-mail: liuy-chh@ustc.edu.cn



付绍军(1952-)男,吉林长春人,教授,博士生导师,1977年毕业于中国科学技术大学,主要从事短波光学、二元衍射光学、微细加工技术研究。E-mail: sjfu@ustc.edu.cn



邱克强(1980-)男,四川南充人,博士,副研究员,2008年于中国科学技术大学获博士学位,要从事衍射光学元件的设计及制作研究。E-mail: blueleaf@ustc.edu.cn