

## 软 X 射线双频光栅剪切干涉法研究\*

刘正坤<sup>1)†</sup> 邱克强<sup>1)</sup> 陈火耀<sup>1)</sup> 刘颖<sup>1)</sup> 徐向东<sup>1)</sup> 付绍军<sup>1)</sup>  
王琛<sup>2)</sup> 安红海<sup>2)</sup> 方智恒<sup>2)</sup>

1) (中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

2) (上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2012 年 10 月 12 日收到; 2012 年 11 月 6 日收到修改稿)

本文中设计了一种利用软 X 射线双频光栅作为剪切干涉元件的剪切系统, 使剪切干涉法在软 X 射线波段得到了应用. 介绍了软 X 射线双频光栅的结构及衍射特性, 在同步辐射光束线对双频光栅的效率分布进行了测试实验, 两个剪切级次的效率比值高于 75%, 干扰级次效率低于 5%. 利用软 X 射线双频光栅为剪切干涉光学元件, 对待测靶进行了静态检测, 得到了对比度高, 稳定的干涉条纹, 验证了该方法在软 X 射线等离子体密度诊断中的可行性.

**关键词:** 双频光栅, 剪切干涉仪, 软 X 射线, 等离子体诊断

**PACS:** 07.60.Ly, 52.70.-m, 52.70.La, 42.40.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.62.070703

## 1 引言

X 射线激光 (XRL) 利用激光进行等离子诊断. 各个实验室用不同的软 XRL 做光源, 采用不同的测量手段, 对各种等离子体密度进行了测量, 并利用该方法对不同等离子体进行了诊断研究 [1-5]. 在国内, 郑无敌、王琛等在神光 II 八路和神光 II 九路上利用 M-Z 干涉系统进行了等离子体诊断 [6,7]. 利用 M-Z 干涉系统进行等离子诊断的优点在于该系统直接给出被测等离子体的绝对折射率, 但缺点是测试光路与参考光路不同, 机械振动、系统稳定性、光学元件的面型等均会带来测试误差.

剪切干涉法是一种常用的波前测试方法, 由于其不需要参考光路, 具有共路光学系统, 因此在可见光波段运用较多, 陈光华等用剪切干涉法测试电缆枪等离子体的电子密度 [8], 并取得了很好的实验结果. 常规的剪切干涉系统由于其结构要求透射光学元件, 而透射元件在 X 射线波段很难实现, 因此也限制了剪切干涉法向软 X 射线波段应用的发展. Wyant 提出采用双频光栅作为剪切干涉元件的结

构对光学元件进行测试 [9]. 本文基于这一思想, 设计了一种能够工作于软 X 射线波段的双频光栅结构, 将可见光波段的剪切干涉方法应用于软 X 射线波段. 分析了软 X 射线双频光栅的衍射特性, 成功制作并实验测试了光栅的衍射特性. 同时, 在神光 II 第九路上实验验证了双频光栅剪切干涉系统的可行性.

## 2 软 X 射线双频光栅

## 2.1 双频光栅结构

国内明海教授等在上世纪 90 年代开展了基于可见光波段双频光栅剪切干涉系统的设计并利用两次全息曝光的方法制作双频光栅研究工作 [10]. 由于可见光波段波长较大, 光栅的制作宽容度大, 且允许基底为光刻胶图形, 因此该方法制作的光栅结构能够保证可见光波段的剪切干涉应用. 但在软 X 射线波段, 由于波长较短, 光栅槽深仅几十纳米, 直接用两次全息曝光法的光栅结构已不能够满足软 X 射线对光栅槽型的高精度要求. 因此我们提出了一种新的双频光栅结构, 示意图见图 1(a). 双频

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10975135, 11075146) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn

光栅通过两组矩形光栅叠加形成. 制作方法是利用全息曝光-离子束刻蚀的方法在光学基底上制作线密度为  $n_1$  的矩形光栅 1, 清洗后, 再次用全息曝光-离子束刻蚀的工艺方法在光栅 1 上制作线密度为  $n_2$  的矩形光栅. 以此方法得到的双频光栅中两组光栅槽型结构在制作工艺中能够单独实现, 每组光栅的槽型结构能够得到精确控制, 使光栅结构与设计值一致, 保证双频光栅的两组  $-1$  级衍射效率的一致性. 图 1(b) 为双频光栅的原子力显微镜测试照片, 双频光栅的线密度分别为  $n_1 = 950$  lines/mm 和  $n_2 = 1000$  lines/mm.

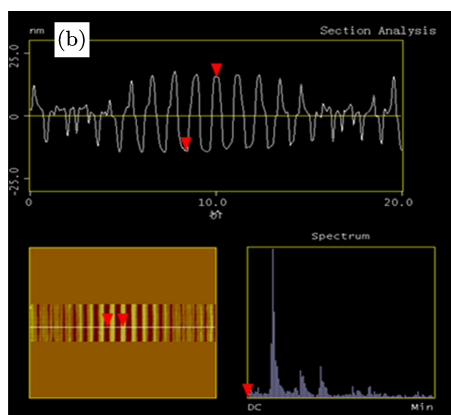
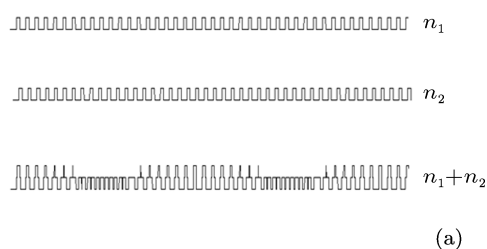


图 1 软 X 射线双频光栅的结构图 (a) 双频光栅理论结构图; (b) 双频光栅原子力显微镜测试图

## 2.2 双频光栅的衍射特性及实验结果

由于双频光栅是两组不同频率的光栅槽型结构叠加而成的, 因此, 其衍射级次中具有两组常规光栅的  $-1$  级, 两组  $-1$  级衍射光夹角由双频光栅中两组光栅的频率、入射波长及入射角共同决定. 设双频光栅的线密度为  $n_1$  和  $n_2$ , 当入射角为  $\alpha$  时, 衍射级次的角分布特性为<sup>[1]</sup>

$$\sin \beta_{(p,q)} = \sin \alpha + \lambda (pn_1 + qn_2), \quad (1)$$

$\alpha$  为入射角,  $\lambda$  为入射光波长.

软 X 射线剪切干涉系统中, 需要运用的是光栅的两组频率的  $-1$  级衍射, 即 (1) 式中  $p = -1, q = 0$ ;  $p = 0, q = -1$  两个衍射级次的剪切干涉, 形成对等

离子体密度的剪切测试. 由理论 (1) 式知在剪切干涉级次边界有干扰级次:  $p = -2, q = 1$ ;  $p = 1, q = -2 \dots$  等对剪切干涉造成影响. 为了满足软 X 射线剪切干涉系统的实验需求, 双频光栅线密度要求为:  $n_1 = 1000$  lines/mm,  $n_2 = 1002.5$  lines/mm. 由于双频光栅的频率相差太小, 且计量站中探测器与光栅的空间距离短, 因此无法在合肥同步辐射计量站中对实验需求的双频光栅的各个衍射级次进行测试.

为了实验验证双频光栅衍射级次的效率分布及  $p = -1, q = 0$ ;  $p = 0, q = -1$  之外的衍射级次的影响, 设计了线密度相差更大的双频光栅. 两组光栅线密度分别为 950 lines/mm 和 1000 lines/mm, 刻蚀深度均为 15 nm, 占空比为 0.3—0.4, 表面镀金 30—40 nm. 实际制作完成后, 线密度为 1000 lines/mm 光栅的占空比为 0.3—0.36, 槽深为 14—15 nm; 线密度为 950 lines/mm 光栅的占空比为 0.32—0.37, 槽深为 14—15 nm, 实际金膜厚度约 40 nm. 利用同步辐射计量站对光栅的  $-1$  级衍射效率进行测试.

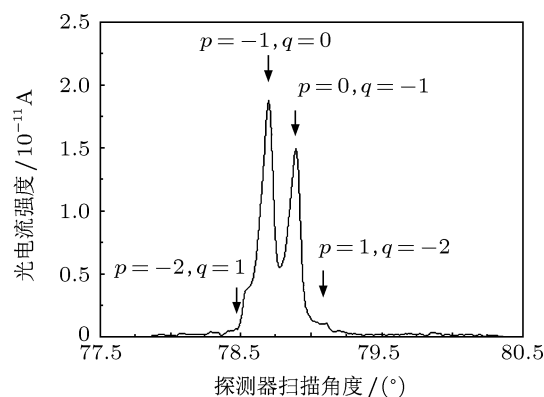


图 2 双频光栅线密度为 1000 lines/mm 和 950 lines/mm, 入射角度为  $84^\circ$  (各衍射级次对应的衍射角  $p = -2, q = 1 : 78.50^\circ$ ,  $p = -1, q = 0 : 78.70^\circ$ ,  $p = 0, q = -1 : 78.91^\circ$ ,  $p = 1, q = -2 : 79.12^\circ$ )

入射光波长为 13.9 nm, 入射角度为  $84^\circ$ , 两组  $-1$  级的衍射光对应的角度理论值分别为  $p = -1, q = 0$  衍射角为  $78.70^\circ$ ,  $p = 0, q = -1$  衍射角为  $79.90^\circ$ , 与测试得到的衍射峰位置对应.  $p = -2, q = 1$ ;  $p = 1, q = -2$  对应的衍射角度分别为  $78.50^\circ$  和  $79.12^\circ$ , 在图 2 中的测试曲线上对应位置找出两个衍射级次的信号, 计算发现两个级次的衍射效率低于  $p = 0, q = -1$  的 5%, 理论模拟表明二者对剪切干涉实验结果不会造成干扰. 该实验中采用了线密度相差较大的两组光栅, 其槽型结构及制作方法

与剪切干涉系统中的正式光栅相同, 虽然不能完全反映正式光栅的衍射特性, 但对正式光栅的制作及应用有一定的参考价值. 为了验证该剪切干涉系统的可行性, 我们制作了线密度相差很小的双频光栅, 搭建了剪切干涉系统进行了静态干涉实验.

### 3 干涉系统的设计及分析

根据等离子诊断实验系统要求, 设计软 X 射线双频光栅的参数为  $n_1 = 1000 \text{ lines/mm}$ ,  $n_2 = 1002.5 \text{ lines/mm}$ , 剪切干涉系统的结构示意图见图 3. 探测激光经过待测靶  $T_3$  (实际等离子体由激光轰击靶产生, 本次实验中未进行激光打靶, 属于静态干涉条纹测试) 后, 被球面镜  $S_1$  反射, 经双频光栅 DFG 剪切干涉, 形成的剪切干涉条纹成像于软

X 射线 CCD 上, 为保护 CCD, 在 CCD 前加滤片.  $T_3$  被球面镜  $S_1$  成像于 CCD 上.

为分析软 X 射线双频光栅剪切干涉系统中的结构, 将图 3 简化为图 4, 由于反射镜  $M_2$  只是改变光路的方向, 对剪切量及干涉条纹周期均没有影响, 因此在图 4 中没有显示. 软 X 射线光源为发散光, 不能近视为平行光系统, 因此该剪切干涉系统的计算与文献 [10] 中的计算有一定的差别. 靶  $T_3$  与光源的距离为  $u_1$ , 靶  $T_3$  与球面镜  $S_1$  的距离为  $u_2$ , 软 X 射线光源经过球面镜  $S_1$  后聚焦于光束的成像面, 像距为  $v$ . 光束在 DFG 的入射角为  $\theta_i$ , 衍射角为  $\theta_{-1}$ . 入射光束经过 DFG 衍射剪切后, 在 CCD 上成像的剪切错位量为  $\Delta y'$ , 对应在被测靶位置的光束剪切量为  $\Delta y$ .

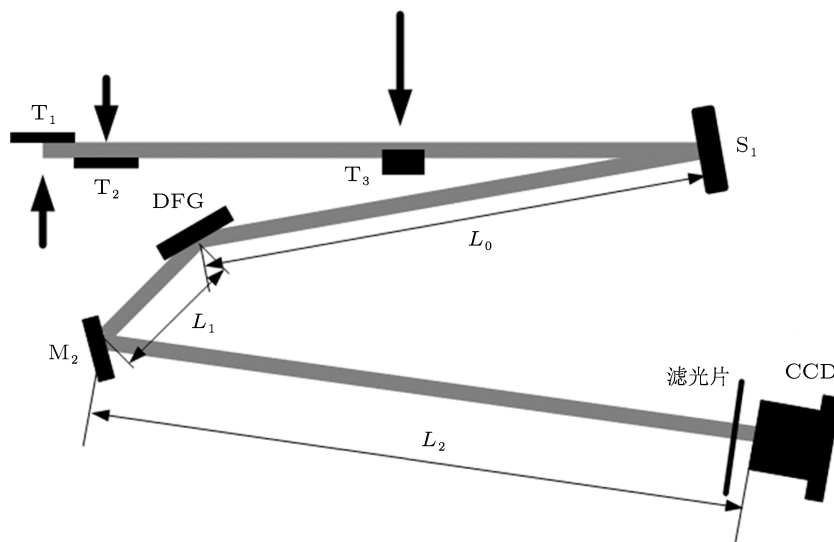


图3 双频光栅剪切干涉系统 ( $T_1, T_2$  是 Ag 靶,  $T_3$  是待测靶,  $S_1$  是球面成像镜,  $M_2$  是平面反射镜, DFG 是双频光栅)

剪切干涉系统的干涉条纹周期为

$$s = d' \left( \frac{L \cos \theta_{-1}}{D \cos \theta_i} + 1 \right) \cos \theta_{-1}, \quad (2)$$

式中  $d' = \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}$ ;  $\theta_i$  为光束在光栅表面的入射角,  $\theta_{-1}$  为衍射角.

对应在被面处的入射光束的剪切量为

$$\Delta y = \frac{v \lambda}{d' \left( \frac{D}{L} \cos \theta_{-1} + \cos \theta_i \right)} * \frac{u_1}{u_1 + u_2}. \quad (3)$$

### 4 实验结果及分析

图 5 为金楔形靶的静态剪切干涉条纹 (未产生等离子体时的测试), 由图可以看出干涉条纹对比

度好, 没有杂散光造成的干扰条纹. 证明了软 X 射线双频光栅作为剪切干涉系统中剪切分光元件的可行性, 也从实验上验证了双频光栅中的  $p = -1$ ,  $q = 0$  和  $p = 0, q = -1$  两组衍射光之外的衍射级次不会对干涉系统造成干扰. 软 X 射线 CCD 的像素大小为  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ , 干涉系统中成像镜的放大倍率为 10 倍, 对应空间分辨为  $2 \mu\text{m}$ , 根据文献 [7] 的分析, 实际空间分辨精度为 3 个像素, 即  $6 \mu\text{m}$ . 干涉条纹每个周期占 7 个像素  $140 \mu\text{m}$ , 与文献 [7] 中的干涉系统中  $164 \mu\text{m}$  相近, 理论上对等离子体密度测试精度能达到  $7.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . 由于双频光栅能够多次使用, 能够利用静态图和动态图进行比对处理数据, 消除剪切干涉系统中元件面型误差带来的影响.

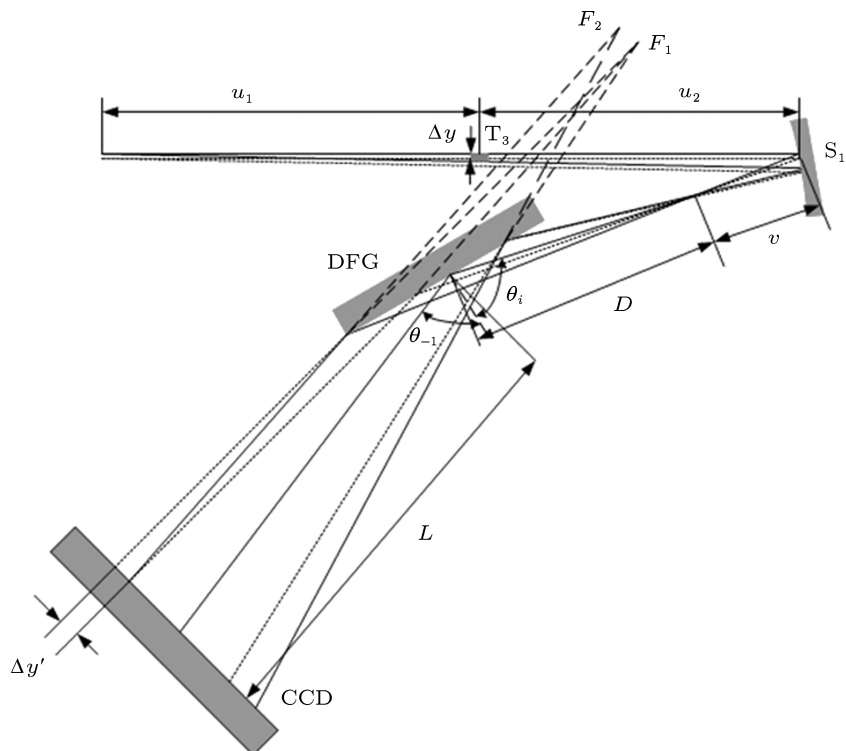


图4 软X射线双频光栅剪切干涉仪的结构分析图(沿光束的方向, 光束经球面反射镜  $S_1$  成像的像距为  $v$ , DFG 与光束经球面镜  $S_1$  的成像面的距离为  $D$ , DFG 与 CCD 的距离为  $L$ , 干涉系统的剪切量为  $\Delta y$ )

但静态图中也暴露了实验系统中的一些问题: 由于用光栅作为剪切干涉元件, 针对反射及透射类的成像系统已经不能对衍射类元件清晰成像. 目前分析原因是, 经过光栅衍射后, 其衍射光与入射光之间的关系满足 (1) 式, 而反射及透射类光学元件的出射光与入射光的角度关系为

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'. \quad (4)$$

由于 (1) 式与 (4) 式的不同, 造成在成像系统中按照 (4) 式设计的光学结构在衍射光学系统中存在像差的问题. 即如图 5 中, 沿干涉线条方向上不存在靶像模糊问题, 而垂直于干涉条纹方向上, 存在剪切的靶像边缘中有干涉条纹的现象, 目前分析该现象是由于衍射特性造成剪切系统未对靶清晰成像的结果.

该问题在于目前的软 X 射线剪切干涉系统参考可见光波段的剪切干涉系统进行设计、搭建的, 而该系统中本身存在一定的像差. 文献中的被测系统温度场及透镜尺寸较大, 系统存在的像差在系统允许的精度范围以内, 不会对测试造成影响. 但针对激光等离子体诊断中应用, 由于被测靶的尺寸均很小, 而且靶产生的等离子体主要集中于离靶面  $0-200 \mu\text{m}$  以内, 因此对靶的边缘定位精度要求很

高. 文献 [12] 中也提出了为消除衍射元件的像差的影响, 在系统中插入另一块光栅, 该光栅的频率为双频光栅中两组光栅的平均值, 经双频光栅的  $-1$  级衍射光束经过该光栅的  $+1$  级衍射后, 角度关系再次满足反射类元件的关系. 拟以此方法作为下一步的改进方案, 对软 X 射线剪切干涉仪系统做进一步改进.

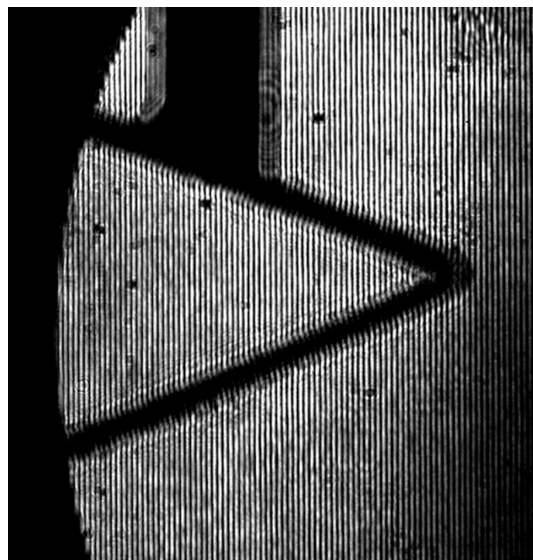


图5 如图3所示的干涉系统得到的静态剪切干涉条纹

## 5 结 论

基于可见光波段双频光栅原理, 针对软 X 射线波段提出一种精确可控的软 X 射线双频光栅槽型结构, 实验验证了该方法制作的双频光栅的两组 -1 级衍射效率接近, 同时工作级次附近的其他可

能对干涉系统造成干扰的衍射级次强度低于工作衍射级次强度的 5%. 并在神光 II 系统中进行了剪切干涉实验研究, 结果证明了利用双频光栅的剪切干涉系统在等离子体诊断系统中运用的可行性. 目前系统中存在一定的像差影响等离子的边界定位精度, 需要对系统进一步的优化解决.

- 
- [1] Da Silva L B, Barbee T W, Cauble Jr R, Celliers P, Ciarlo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Ress D, Trebes J E, Wan A S, Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
  - [2] Wan A S, Barbee T W, Cauble Jr R, Celliers P, Da Silva L B, Moreno J C, Rambo P W, Stone G F, Trebes J E 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6293
  - [3] Filevich J, Kanizay K, Marconi M C, Chilla J L A, Rocca J J 2000 *Opt. Lett.* **25** 356
  - [4] Smith R F, Dunn J, Nilsen J, Shlyaptsev V N, Moon S, Filevich J, Rocca J J, Marconi M C, Hunter J R, Barbee Jr T W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 065004-1
  - [5] Wang C, Zheng W D, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Qiao X M, Zhang G P 2010 *ActaPhys. Sin.* **59** 4767 (in Chinese) [王琛, 郑无敌, 方智恒, 孙今人, 王伟, 熊俊, 傅思祖, 顾援, 王世绩, 乔秀梅, 张国平 2010 物理学报 **59** 4767]
  - [6] Wang C, Wang W, Sun J R, Fang Z H, Wu J, Fu S Z, Ma W X, Gu Y, Wang S J, Zhang G P, Zheng W D, Zhang T X, Peng H M, Shao P, Yi K, Lin Z Q, Wang Z S, Wang H C, Zhou B, Chen L Y, Jin C S 2005 *ActaPhys. Sin.* **54** 202 (in Chinese) [王琛, 王伟, 孙今人, 方智恒, 吴江, 傅思祖, 马伟新, 顾援, 王世绩, 张国平, 郑无敌, 张覃鑫, 彭惠民, 邵平, 易葵, 林尊琪, 王占山, 王洪昌, 周斌, 陈玲燕, 金春水 2005 物理学报 **54** 202]
  - [7] Zheng W D, Zhang G P, Wang C, Sun J R, Fang Z H, Gu Y, Fu S Z 2007 *ActaPhys. Sin.* **56** 3984 (in Chinese) [郑无敌, 张国平, 王琛, 孙今人, 方智恒, 顾援, 傅思祖 2007 物理学报 **56** 3984]
  - [8] Chen GH, Chen L, Liu S X 2007 *ActaPhotonica. Sin.* **36** 2192 (in Chinese) [陈光华, 陈林, 刘寿先 2007 光子学报 **36** 2192]
  - [9] Wyant J C 1973 *Appl. Opt.* **12** 2057
  - [10] Ming H, Zhou C G, Liu Y, Xie J P, Huo R, Li C F 1994 *ActaOpt. Sin.* **14** 214 (in Chinese) [明海, 周晨冈, 刘宇, 谢建平, 霍然, 李昌烽 1994 光学学报 **14** 214]
  - [11] Liu Y, Tan X, Liu Z K, Xu X D, Hong Y L, Fu S J 2008 *Opt. Exp.* 14761
  - [12] Wyant J C 1974 *Appl. Opt.* **13** 200

# Studies on soft X-ray shearing interferometry with double-frequency gratings\*

Liu Zheng-Kun<sup>1)†</sup> Qiu Ke-Qiang<sup>1)</sup> Chen Huo-Yao<sup>1)</sup> Liu Ying<sup>1)</sup>

Xu Xiang-Dong<sup>1)</sup> Fu Shao-Jun<sup>1)</sup> Wang Chen<sup>2)</sup>

An Hong-Hai<sup>2)</sup> Fang Zhi-Heng<sup>2)</sup>

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

2) (Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

( Received 12 October 2012; revised manuscript received 6 November 2012 )

## Abstract

The M-Z interferometer with gratings or multilayer mirrors is widely used in the X-ray laser plasma diagnoses; however, this system is difficult to adjust, and results in the low success rate in experiment. Since wavefront shearing interferometers do not need a separate reference wavefront, they have inherent advantages compared with conventional interferometers. But the absence of shearing element for soft X-ray has restrained the application of the shearing interferometry in soft X-ray measurement. In this paper, a new-structured double-frequency grating was proposed and fabricated that served as the shearing element for soft X-rays, which can promote the application of shearing interferometers in the X-ray laser plasma diagnoses. The diffraction characteristics of the double-frequency grating are analyzed and tested in the synchrotron radiation beams. It is found that the intensity ratio of the two working diffracted beams is over 75%, and the intensity ratio of the rest diffracted beam to the working beam is less than 5%. An X-ray shearing interferometer using a double-frequency grating with 1000 lines/mm and 1002.5 lines/mm gratings was set up, and a clear shear interferogram was obtained. The experimental results demonstrated that the soft X-ray shearing interferometer using double-frequency grating can be applied in the X-ray laser plasma diagnoses.

**Keywords:** double-frequency gratings, shearing interferometry, soft X-ray, plasma diagnostics

**PACS:** 07.60.Ly, 52.70.-m, 52.70.La, 42.40.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.62.070703

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975135, 11075146).

† Corresponding author. E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn