

软 X 射线聚焦波带片制备工艺的研究

傅绍军 洪义麟 陶晓明 苏永刚

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘 要 利用全息光刻和离子束刻蚀技术制作了用于软 X 射线聚焦和色散的三种参数的高精度菲涅耳(Fresnel)波带片, 给出了实验结果。

关键词 聚焦波带片, 同步辐射, 全息-离子束刻蚀.

1 引 言

随着软 X 射线光源, 特别是同步辐射光源的发展, 迫切需要各种软 X 射线波段的光学元件, 对其实现聚焦、成像、色散等。但由于各种材料的折射率在这个波段都近似等于 1, 因此常规的折射元件都无法使用。近年来科学家们公认, 高精度菲涅耳波带片是目前理想的元件^[1~2]。

菲涅耳波带片是根据菲涅耳衍射原理构成的一种透射型的衍射元件, 它是由线密度径向增加的明暗相间的圆环构成, 类同于圆光栅。环带足够多 ($N \geq 100$) 时, 具有与薄透镜一样的聚焦成像功能, 遵从透镜的成像规律, 同时又具有光栅一样的色散功能。

软 X 射线波带片就其使用情况而言可分为两类。一类是用于软 X 射线的聚焦和色散, 其直径一般为几毫米, 最外环宽度 $0.5 \mu\text{m}$ 左右, 称为聚焦波带片(Condenser zone plate, 缩写为 CZP); 另一类是用于软 X 射线的成像, 直径一般在几十至几百微米, 最外环宽 $0.05 \mu\text{m}$ 左右, 称为微波带片(Micro-zone plate, 缩写为 MZP)。制作高精度波带片通常采用两种方法: 一种是电子束刻划法, 另一种是全息-离子束刻蚀方法。前者需要价格昂贵的电子束曝光机, 虽然其刻划面积较小, 但分辨率高。因此制作微波带片多采用前者。目前国外已经制作出了最外环宽度 $0.03 \mu\text{m}$ 的微波带片^[2]。制作聚焦波带片多采用全息-离子束刻蚀方法, 本文利用这种方法已经成功地制作出了最外环宽度小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的聚焦波带片。

2 制作工艺简述

软 X 射线聚焦波带片通常由金的同心圆环带构成, 并由对软 X 射线足够透明的薄膜材料作衬底, 透射使用。

利用激光全息方法, 即两个球面波同轴迭加, 形成同心圆环的干涉图形, 记录在光刻胶上, 显影后形成光刻胶波带片的浮雕图形, 以此为掩模, 用离子束把图形刻到金膜上, 制成

金的振幅型菲涅耳波带片, 主要工艺过程如图 1 所示:

1) 基片制备: 将薄玻璃片(约 0.5 mm)进行抛光、清洗等处理, 并在玻璃片上依次制备出聚酰亚胺膜(0.3 μm), 金膜(0.3 μm)和 S1400 光刻胶膜(0.2 μm)。

2) 全息曝光和显影: 把基片放在氩离子激光(457.9nm)全息光路中曝光, 记录下波带片图形, 用 NaOH(0.5%)溶液显影, 便成了光刻胶波带片的浮雕图形。全息曝光光路特殊设计而成。

3) 离子束刻蚀: 离子束刻蚀在刻蚀机(LKJ1-B 型)中进行。光刻胶的波带片图形作为刻蚀掩模, 适当控制刻蚀条件, 刚好把金膜刻穿, 去胶后留下金的波带片图形。刻蚀条件为: 离子能量 400 eV, 束流密度 1 mA/cm²。

4) 波带片的支撑: 为方便波带片的装夹, 将波带片粘在金属环上, 并用氢氟酸腐蚀掉玻璃基底。

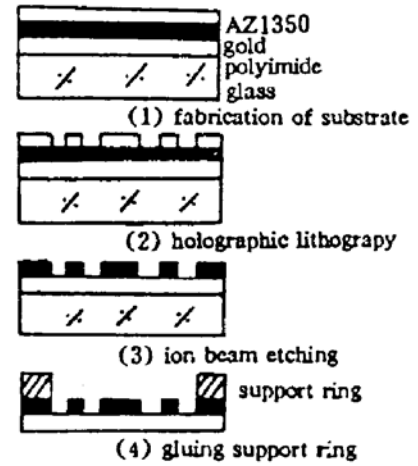


Fig. 1 Schematic of processing steps for fabrication of condenser zone plates

3 实验结果与讨论

本文作者已经研制出了三种不同参数的波带片 CZP₂₃, CZP₃₂ 和 CZP₄₅, 分别使用在中心波长 2.3 nm, 3.2 nm 和 4.5 nm 处。三种波带片的参数如表 1 所示。图 2 是 CZP₂₃ 的扫描电镜照片。

Table 1 The main parameters of CZP.

CZP number	CZP ₂₃	CZP ₃₂	CZP ₄₅
main wavelength λ (nm)	2.3	3.2	4.5
CZP outermost diameter (mm)	2.8	2.8	2.8
zone number n	1506	1082	770
width of CZP outermost zone dr_n (μm)	0.465	0.647	0.909
focal length at first order f (mm)	566	566	566

这三种波带片已经在国家同步辐射实验室的软 X 射线扫描显微术光束线中使用。

在制作波带片的过程中, 有两个问题必须考虑。

1) 波带片的图形是用激光(457.9 nm)全息方法产生的。为了使波带片在 2.0~5.0 nm 的软 X 射线波段使用时像差尽可能小, 需对产生波带片的光学系统进行像差校正。为此, 专门设计制作了一个校正像差的光学系统^[3]来产生波带片图形。图 3 是这个系统的光学原理图。

2) 透过振幅型菲涅耳波带片的零级光很强, 约有 25% 的入射光直接透过波带片, 形成较亮的白光背底, 这将严重影响波带片的光谱分辨能力。为了解决这个问题, 除了把波带片做成切趾型外, 在波带片-针孔直线型单色仪的光学系统中加入了一个直径大于针孔的特殊光栏, 把波带片的中心部分挡住, 消除了透过针孔的零级光。

另外, 由于波带片的聚酰亚胺衬底在软 X 射线波段有不同程度的吸收, 既影响波带片的集光效率, 也限制了波长使用范围, 这是需要改进的一个重要方面。切实可行的办法是采用

径向辐射状的加强筋来固定波带片各环的相对位置,即制作无衬底自支撑的波带片。

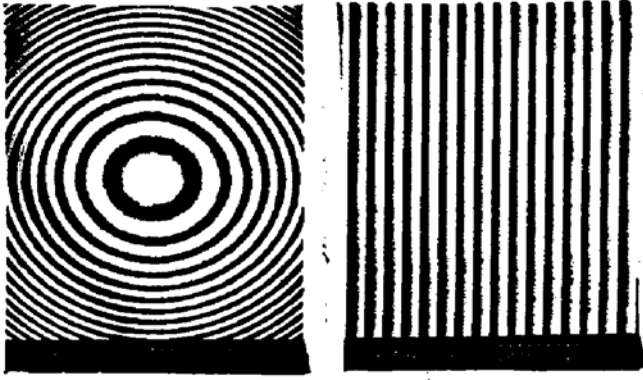


Fig. 2 SEM photographs of CZP₂₃

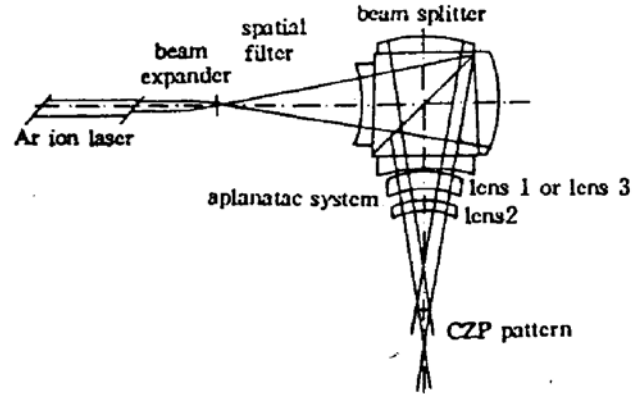


Fig. 3 The optical arrangement for holographic exposure to generate CZP patterns

感谢德国 Gottingen 大学 Thieme 博士在校正像差光学系统的设计方面所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] G. Schmahl, D. Rudolph *et al.*, *Zone plates for X-ray microscopy*. *X-ray Microscopy* (edited by G. Schmahl and D. Rudolph), Springer-Verlag, Berlin, 1984, 63~74
- [2] Malcolm R. Howells, Janos Kirz, David Sayre, *X-ray microscopes*. *Scientific American*. 1991 (February): 42~48
- [3] Su Yonggang, Fu Shaojun, Hong Yilin *et al.*, Optics on a synchrotron radiation soft X-ray microscopy beamline and its dispersing components in HFEI. *Phys. Scripta.*, 1990, 41: 793~796

Fabrication of Soft X-Ray Condenser Zone Plates

Fu Shaojun Hong Yilin Tao Xiaoming Su Yonggang

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 18 June 1994)

Abstract Soft x-ray condenser zone plates with three kinds of parameters are fabricated by holograph-ion beam etching technique. Zone plate condensers are used in our soft x-ray microscopy experiments which act in combination with a pinhole as a linear monochromator.

Key words condenser zone plate, synchrotron radiation, holograph-ion beam etching.