

软X射线衍射元件

付绍军 洪义麟 陶晓明

(中国科技大学)

摘要: 本文介绍了用于软X射线波段的衍射元件—高精度波带片和金透射光栅的研制技术, 国内外研究现状和发展趋势。

一、前 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, 实现聚焦、成像、色散等等。但由于在软X射线波段各种材料的折射率都近似等于1, 甚至小于1, 因此常规的折射光学元件都无法使用。国外在这方面的研究已进行多年, 科学家们公认, 高精度波带片和金透射光栅等衍射元件, 用于软X射线波段的聚焦、成像、色散等是目前比较理想的元件。

二、高精度软X射线波带片

波带片是由明暗相间的同心圆环带构成, 类同于圆光栅的衍射元件(如图1所示)。各同心圆环带的面积相等。

波带片具有与薄透镜一样的聚焦成像功能, 遵从薄透镜成像规律, 又有光栅的色散功能。当一束单色光照明波带片后, 通过相邻波带的光程差为 $\lambda/2$ (如图2)。

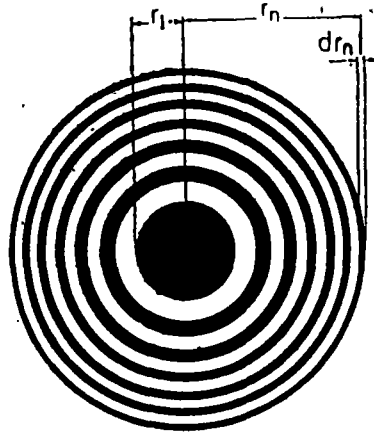


图1 波带片示意图

r_1 —第一环半径 r_n —第 n 环半径
 n —环带数 dr_n —最外环宽度

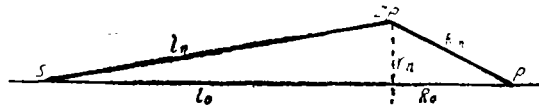


图2 波带片成像示意图

$$(l_n + R_n - (l_0 + R_0)) = n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

由几何关系及级数展开可得到:

$$\frac{1}{l_0} + \frac{1}{R_0} = \frac{n\lambda}{r_n^2} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

(2)式就是波带片的成像公式。在一级衍射情况下，其主焦距 $f_1 = R_0 = r_n^2/n\lambda$ 。第 m 级衍射的主焦距：

$$f_m = -\frac{r_n^2}{m n \lambda} \quad m = \pm 1, \pm 2, \quad (3)$$

波带片的焦距与 λ 成反比，不同波长的光将会聚在波带片光轴上的不同点。由此可见波带片具有轴向色散功能。

软X射线波带片是一种平面型薄膜元件，通常多采用聚酰亚胺或氮化硅作衬底，其厚度 $0.3\mu\text{m}$ 左右。

目前，波带片主要用于同步辐射的软X射线显微镜装置中作为聚焦、色散，或者成像元件。

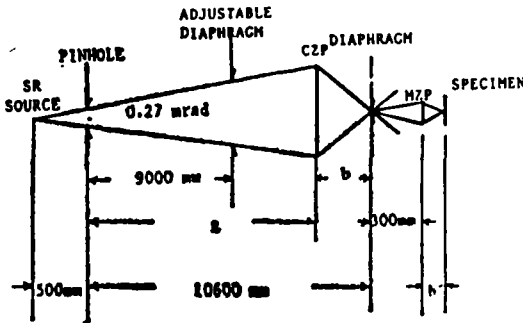


图3 软X射线显微术光束线示意图

现在美国、日本、西德等国的大部分同步辐射软X射线显微镜装置都使用了波带片^[1,2]。合肥国家同步辐射实验室建的软X射线扫描显微镜装置采用两个波带片的光学系统，如图3所示。一个是会聚波带片(CZP)，作用是把软X射线会聚并色散，与针孔一起构成直线型单色仪，提供一个单色的X射线光源。另一个是微波带片(MZP)，作用是成像。

表征波带片性能的主要参数是成像分辨率和射效率。波带片的成像分辨率 δ 近似等于波带片的最外环宽度^[2]。

$$\delta = 1.22dr_n \approx dr_n \quad (4)$$

因此， dr_n 是波带片的一个重要几何参数，反映了波带片的制作水平。西德Gottingen大学等已经研制出了各种波带片，最外环宽度已经达到 200 \AA 左右^[3]。目前用的波带片多数都是振幅型的，其理论上的衍射效率才10.1%。国际上研制波带片的总趋势主要向两个方面发展，一是尽量减少最外环宽度，以增加成像分辨率；二是发展位相型波带片，以利衍射效率的提高。西德Gottingen大学研制的位相型波带片的衍射效率已经超过10%^[4]。

我们国内这方面的研制工作还很薄弱，就我们所知，1985年上海冶金所制作了最外环宽度为 $5\mu\text{m}$ 的金波带片，用于编码相机。前不久骊山微电子公司做出了最外环宽度为 $0.5\mu\text{m}$ 的微波带片，准备作为软X射线显微镜的成像元件。1984年以来，我们建立了专门的实验室，装备了比较先进的仪器设备，开始了软X射线会聚波带片的研制工作。

制作波带片多数采用下面两种工艺技术：一种是全息离子束刻蚀技术，一种是电子束曝光技术。我们采用的是前者，制作波带片的工艺与制作大规模集成电路的光刻工艺大致相同。

三、软X射线透射光栅

软X射线透射光栅是近年来新发展起来的真空紫外软X射线色散元件^[5-9]。无衬底自支撑透射光栅的研制成功，大大提高了衍射效率，使其更加广泛地应用于各个领域的光谱测量，尤其在激光等离子体诊断、X射线激光的实验研究中，世界各大实验室都用它做出了很好的结果^[10-16]。

国外七十年代就开始了这项研究工作。前几年美国加利福尼亚大学 N.M.Geglio 等人就已经研制出了线密度 5000线/mm 的透射光栅^[11]， 2000线/mm 以下的透射光栅已成为商

品^[17]。

在国内, 1989年初, 我们应核工业部九院二所的要求, 利用制作波带片的现有条件, 开始了这项研究工作。

我们主要研制的是带有聚酰亚胺衬底的金透射光栅, 同时也对无衬底的透射光栅工艺进行了研究。带有聚酰亚胺衬底透射光栅的研制工艺与制作波带片工艺基本相同。

图 4 简要地说明了我们的制作无衬底透射光栅工艺步骤。

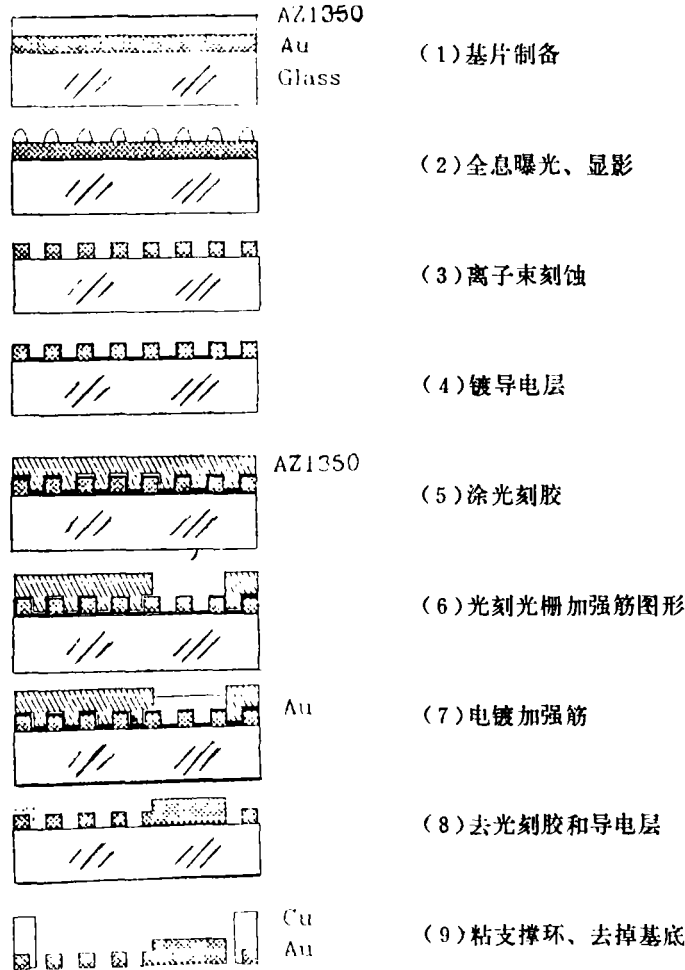


图 4 无衬底透射光栅工艺流程

四、实验结果

经过几年的努力, 我们已经做出了三种不同参数的振幅型波带片 CZP_{23} 、 CZP_{32} 和 CZP_{45} , 分别用于同步辐射软 X 射线显微镜装置的 23 \AA 、 32 \AA 和 45 \AA 三个特征波长, 具体参数如表 1 所示。

图 5 是波带片的扫描电子显微镜照片。

两年来, 我们已经研制出了带有聚酰亚胺衬底的每毫米 800 至 1000 线的金透射光栅三批,

表1 波带片参数

CZP number	CZP ₂₃	CZP ₃₂	CZP ₄₅
Main wavelength λ (nm)	2.3	3.2	4.5
Working wavelength range (nm)	1.97—2.78	2.74—3.87	3.85—5.44
Distance between source and CZP g (nm)	9890—10110	9890—10110	9890—10110
Distance between CZP and diaphragm b (nm)	710—490	710—490	710—490
Outermost diameter D (mm)	2.8	2.8	2.8
Zone number n	1056	1082	770
Width of the outermost zone ΔR_n (μm)	0.465	0.647	0.909
Focal length at first order F (mm)	566	566	566

提供给核工业部九院二所使用，在成都11号和上海光机所12号高功率激光装置上进行了多次实验。在惯性约束激光核聚变的等离子体光谱诊断方面取得了一些较满意的结果。图6是透射光栅的扫描电镜照片。光栅线密度880线/mm，金光栅线条厚度约0.55 μm ，聚酰亚胺衬底厚约0.3 μm 。

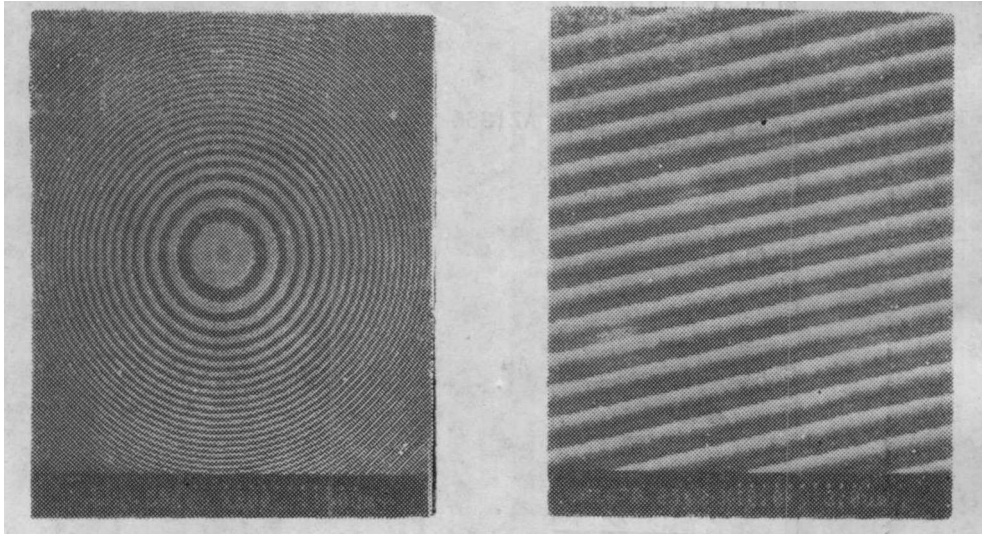
图5 CZP₂₃的SEM照片

图6 金透射光栅SEM照片

五、下步工作考虑

不论是波带片还是透射光栅的性能，主要体现在其成像分辨率 δ ，光谱分辨本领 R 和衍射效率 η 上。

$$\text{对于波带片: } \delta = d r_n = \frac{r_n}{2n}$$

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m n}{2}$$

$$\text{对于透射光栅: } R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m n$$

可见，分辨率的增加主要是增大 n ，减小线宽或增加线密度来实现。

透射光栅的衍射效率取决于X射线能量、光栅材料、光栅线条厚度和线空比等。

通常的全息离子束刻蚀方法和电子束曝光方法制作线条厚度足够大的波带片或透射光栅都有一定的局限性。如果配合X射线光刻技术，将会对工艺有很大改进。国外已经有人采用了这种工艺方法，这也是今后发展趋势。

我们将逐步完善目前的工艺技术，并且利用同步辐射X射线光刻这一有利条件来改善工艺。今后将主要采用全息离子束刻蚀方法制作波带片和光栅的X光掩模，再利用同步辐射X光光刻并配合微电镀工艺做出元件来，逐步接近国外先进水平。

参 考 文 献

- [1] G.Schmahl, D.Rudolph, and B.Niemann, «Scanned Image Microscopy» Ed., E.A. Ash, Academic Press London (1980), 393—412
- [2] Photan Factory Activity Report (1989)
- [3] G.Schmahl, D.Rudolph, P.Guttman and O.Christ, «Zone Plates for X-ray Microscopy» in X-Ray Microscopy, G. Schmahl, D.Rudolph, Ed., Springer Seris in Optical Sciences, 43, 63—74 (Springer, Heidelberg 1984)
- [4] R.Hikenbach, J.Thieme, P.Guttman and B.Niemann, «Phase Zone Plates for the Gottingen X-Ray Microscopes» in X-Ray Microscopy 2 D.Sayre, M.Howells, J. kirz and H.Rarback, Ed., Springer Seris in Optical Sciences, 56, 95—101 (1987)
- [5] J.H.Dijkstra, L.J.Lantwaard, Opt. Commun., 15, No. 2, (1975), 300—305
- [6] E.T.Arakawa, P.J.Caldwell, Nucl. Instrum. & Meth., 172(1980), 293—296
- [7] P.Tatchyn and I.Lindau, Nucl. Instrum. & Meth., 172(1980), 287—291
- [8] J.P.Delvaile, H.W.Schnopper, Nucl. Instrum. & Meth., 172(1980), 281—285
- [9] 李跃林, 白文安, 陈时胜 徐至展, 光学学报, 9, No. 6(1989), p550—555
- [10] 王晓方, A.Pachtmann, 徐至展, 陈时胜等, 物理学报, 39, No. 6(1990) 923—926
- [11] A.M.Hawryluk, N.M.Ceglio et al., Journ. Vac. Sci. Tech., 19, No. 4(1981), 897—900
- [12] N.M.Ceglio et al., Appl. Opt., 22, No. 2(1983), 318—327
- [13] T.Mochizuki et al., Phy. Rev., 33, No. 1, A(1986), 525
- [14] 王晓方, A.Pachtmann, 徐至展, 陈时胜等, 中国激光, 17, No. 7(1990) 407—411
- [15] 李跃林, 徐至展, 陈时胜, 光学学报, 10, No. 7 (1990), 581—585
- [16] 王晓方, 陈时胜, 徐至展等, 物理学报, 39, No. 5(1990), 764—769

Study and Fabrication of Diffraction Elements in the Soft X-ray Region

Fu Shaojun Hong Yilin Tao Xiaoming

Abstract

The progress of making zone plate and gold transmiss-

ion grating as diffraction elements in soft X-ray region are described in detail. Such elements made in this lab. Had already been used in a beam line of synchrotron radiation and some experiments of high temperature plasma diagnostics. Results and progress of researches at present stage are listed and the project of next step are discussed.