

文章编号: 0253-2239(2006)10-1598-3

软 X 射线聚焦波带片相对衍射特性的实验研究

肖 凯 刘 颖 陈 亮 蒋诗平 付绍军

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘要: 通过测量软 X 射线相位型和振幅型聚焦波带片的一级衍射强度, 实验得到了自行研制的两种相位型软 X 射线聚焦波带片的相对衍射特性。测量实验装置简单, 调节相对容易。选择合适的针孔大小可使得接收信号有足够的信噪比。对波带片聚酰亚胺衬底的厚度进行了归一化。分别将 3 个镍和锗波带片的一级衍射强度与金波带片进行了比较。在 3.2 nm 工作波长, 研制的镍、锗软 X 射线相位型波带片的平均一级衍射效率分别是软 X 射线振幅型金波带片一级衍射效率的 1.60 和 1.26 倍, 与理论值 1.77 和 1.34 很接近。测试结果表明, 我们制作的相位型波带片具有较高精度。

关键词: X 射线光学; X 射线波带片; 衍射; 相对效率

中图分类号: O434.1 文献标识码: A

Characterization of Relative Diffraction Performance of Soft X-Ray Zone Plates by Experiment

Xiao Kai Liu Ying Chen Liang Jiang Shiping Fu Shaojun

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

Abstract: The relative diffraction performance of soft X-ray phase condenser zone plate and amplitude zone plate is obtained by measuring the first order diffraction intensity. The experimental setup is simple and relatively easy to adjust. The size of the pinhole is selected to obtain sufficient signal-to-noise ratio. The thickness of the polyimide substrate is normalized. The first order diffraction intensity of three Ni and three Ge zone plates is compared with that of an Au zone plate. The experimental average first order efficiencies of the Ni and Ge zone plate are 1.60 and 1.26 times that of the Au amplitude zone plate at 3.2 nm, which are close to the theoretical results: 1.77 and 1.34. The measurement result indicates that the phase zone plates fabricated has high accuracy.

Key words: X-ray optics; X-ray zone plates; diffraction; relative efficiency

1 引 言

软 X 射线波带片是软 X 射线光学中聚焦、成像、色散的重要元件^[1,2]。聚焦和色散功能由软 X 射线聚焦波带片完成, 成像功能由软 X 射线成像波带片即微波带片完成。对软 X 射线聚焦波带片的主要评价参量是检测波带片的衍射效率, 对软 X 射线成像波带片的检测涉及效率和成像分辨力检测两方面。相位型波带片用相位材料制成, 在相邻环带引入适当的相位差, 可以获得比振幅型波带片更高的衍射效率。在 3.2 nm 工作波长, 用振幅叠加法^[3]可以计算出金、镍

和锗波带片的最高一级衍射效率分别为 10.1%、19.7% 和 15.2%, 相对振幅型金波带片, 镍和锗波带片能大大提高主焦点衍射效率。

本文利用合肥同步辐射装置, 实验比较了自行研制的软 X 射线镍、锗相位型聚焦波带片^[4]与金振幅型波带片^[5,6]的相对衍射特性。

2 相对衍射特性的测量

2.1 相对衍射特性的测量方法

要得到 X 射线聚焦波带片的绝对衍射效率, 一

作者简介: 肖 凯(1979~), 男, 重庆人, 中国科学技术大学国家同步辐射实验室博士研究生, 研究方向为衍射光学和微细加工技术。E-mail: scarscar@ustc.edu

导师简介: 付绍军(1952~), 男, 吉林人, 中国科学技术大学教授, 博士生导师, 主要从事短波光学、衍射光学元件和微细加工技术的研究。E-mail: sjfu@ustc.edu.cn

收稿日期: 2005-12-20; 收到修改稿日期: 2006-02-12

般用波带片一级衍射光通量除以入射光在工作波长附近的绝对光通量^[7]。但使用现有的光束线实验装置无法取得入射光在工作波长附近的绝对光通量,如果为了得到工作波长附近的绝对光通量而增加单色装置,必须重新设计和改造光束线,成本和工作量将很大。通过理论计算虽然也可以得到的入射光在工作波长附近的光通量,但实际实验中的光通量受到实验条件和实验装置的影响,和理论值相差甚远,所以上面的两种方法都难以取得工作波长附近的绝对光通量。所幸实际关心的是相位型波带片与振幅型波带片相比能否提高衍射效率,而并非绝对衍射效率的数值,可以通过直接比较相位型波带片和振幅型波带片的一级衍射光通量来得到相位型波带片效率与振幅型波带片效率的比值,来判断相位型波带片是否相对振幅波带片提高了衍射效率。

2.2 测量装置

研制的软 X 射线聚焦波带片的工作波长为 3.2 nm,直径 2.8 mm,最外环宽度 637 nm,主焦距 566 mm^[4,5]。效率检测在国家同步辐射实验室软 X 射线显微术光束线上进行,实验中通过光电二极管检测出波带片一级衍射响应。

图 1 为测量波带片一级衍射光通量的光路图。为防止零级光进入接收面,波带片后的挡光板直径必须大于主焦距处小孔直径。实验中主焦距 f 为 566 mm,挡光板半径为 500 μm ,主焦距处小孔直径为 195 μm ,从简单的几何关系可以算出这个系统的通光带宽为 1.24 nm。探测器为边长 10 mm 的正方形光电二极管,从真空室里引出的信号用电流计测量。该检测方案的优点是光路简单,X 射线接收面的面积比波带片的一级衍射光斑大许多,光电二极管的位置不需要刻意对准就能接收到所有信号。

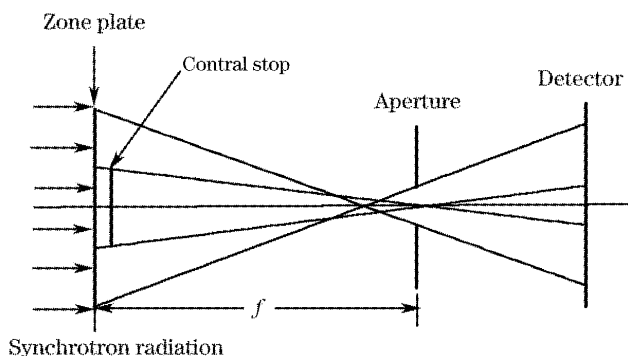


图 1 测量波带片一级衍射光通量的光路图

Fig. 1 Schematic of the measurement of the first diffraction light flux by zone plates

挡光板固定在波带片后,波带片和小孔均可分

别在横向和纵向平动。调节光路时,固定波带片和小孔距离为主焦距 f ,通过反复调节波带片以及小孔在垂直于光轴方向上的位置,直到找到使光电二极管产生最大响应的位置,就可以认为波带片-小孔这个光学系统已经对准。金、镍和锗波带片最大响应电流分别用 I_{Au} 、 I_{Ni} 和 I_{Ge} 来表示。

2.3 聚酰亚胺衬底的归一化

波带片是环状镂空的光学元件,所以必须为波带片增加支撑结构。支撑结构可以是衬底,也可以是金属加强筋。由于在 X 射线波段物质的高吸收率,衬底必须为一层厚度较小,能保证足够透射率的薄膜。研制的波带片以聚酰亚胺为衬底,聚酰亚胺成膜性能良好,有良好的弹性,容易满足制作工艺中膜层应力匹配的要求,且在软 X 射线波段有较高透射率。金振幅型波带片、Ge 和 Ni 相位型波带片的聚酰亚胺衬底厚度分别为 300 nm 和 400 nm,为得到相位型波带片与振幅型波带片的相对衍射效率,必须将聚酰亚胺衬底进行归一化。3.2 nm 工作波段厚 300 nm 聚酰亚胺和厚 400 nm 聚酰亚胺的透射率分别为 45.3% 和 34.7%,其比值为 1.31,聚酰亚胺归一化为 300 nm 时 I_{Au} 不变,将 I_{Ni} 和 I_{Ge} 都乘以 1.31 即可。此外必须考虑入射光通量大小对探测器电流响应的影响,测量 Ge、Ni 和金波带片时的同步辐射储存环束流强度分别为 I_{Ge}^0 、 I_{Ni}^0 和 I_{Au}^0 ,对研制的波带片,Ge、Ni 相位型波带片效率相对振幅型波带片效率的倍数分别为

$$\eta_{\text{Ge}} = \frac{1.31 I_{\text{Ge}} / I_{\text{Ge}}^0}{I_{\text{Au}} / I_{\text{Au}}^0}, \quad \eta_{\text{Ni}} = \frac{1.31 I_{\text{Ni}} / I_{\text{Ni}}^0}{I_{\text{Au}} / I_{\text{Au}}^0}.$$

根据振幅叠加法^[3]和图 1,理想的金振幅型波带片、厚度为 260 nm 的 Ge 相位型波带片和厚度为 160 nm 的 Ni 相位型波带片在 3.2 nm 工作波段的理论衍射效率分别为 10.1%、13.5% 和 17.9%,所以厚度为 260 nm 的 Ge 波带片和厚度为 160 nm 的 Ni 波带片的衍射效率分别是金波带片的 1.34 倍和 1.77 倍。

2.4 针孔大小的选择

测量中探测器本底约为 15 pA,一组典型的镍、锗和金波带片的探测器电流最大响应 I_{Ni} 、 I_{Ge} 和 I_{Au} 分别为 238.4 pA,184 pA 和 117 pA(已对聚酰亚胺衬底厚度进行了归一化)。上面的数据得到的振幅型波带片的信噪比为 7.8。减小主焦距处针孔直径虽然可以得到单色性更好的波长为 3.2 nm 的软 X 射线,但也减小了有用信号值,同时增加了系统调节时的困难,减小了信噪比。综合考虑测量时要满足

信噪比足够大和单色性尽量好的要求, 针孔直径 $195\ \mu\text{m}$ 是合适的。针孔用激光打孔机加工。

3 实验结果与讨论

对金振幅型波带片 ZP_{Au} , 镍和锗相位型聚焦波带片 ZP_{Ni} 和 ZP_{Ge} 进行了测量, 其中标准 ZP_{Au} 一枚, ZP_{Ni} 和 ZP_{Ge} 各 3 枚, 划分为三组波带片, 每组都有一枚镍波带片、一枚锗波带片和一枚标准的金波带片。对聚酰亚胺厚度进行了归一化以及扣除实验本底后的相位型波带片相对振幅型波带片衍射效率的倍数如表 1 所示。

表 1 相位型波带片与振幅型波带片一级衍射效率的比较
Table 1 Comparison of the first order diffraction efficiency of phase zone plates and amplitude zone plate

Zone plates samples	Thickness /nm	Efficiency ratio between sample and amplitude zone plate	Theoretic efficiency ratio between sample and amplitude zone plate
Ge 1	260	1.22	1.34
Ge 2	260	1.19	1.34
Ge 3	260	1.37	1.34
Ni 1	160	1.55	1.77
Ni 2	160	1.72	1.77
Ni 3	160	1.53	1.77

两组 Ge、Ni 波带片的实验平均相对效率分别为 1.26 和 1.6, 与理论值相对效率比 1.34 和 1.77 比较接近, 表明相位型波带片的制作精度较高, 相同材料的波带片的效率的差别主要是由于曝光显影后可能带来的波带片线条宽度误差、聚酰亚胺厚度误差、溅射镀膜产生的厚度误差、离子束刻蚀带来的误差和测量光源的稳定性等多种因素综合造成的。大部分样品的效率与与振幅型波带片效率的倍数小于理论值, 第 3 个 Ge 波带片样品的效率与振幅型波带片效率的倍数达 1.37, 高于理论值 1.34, 这也是可能的, 例如聚酰亚胺厚度偏小或离子束刻蚀中刻蚀厚度偏大等

因素都会导致计算出的相对效率的倍数增加。

4 结 论

通过测量软 X 射线相位型和振幅型聚焦波带片的一级衍射强度, 实验比较了自行研制的两种软 X 射线聚焦波带片的相对衍射特性。测量装置直接利用了国家同步辐射实验室软 X 射线光束线, 结构简单。为得到相对衍射特性, 将波带片的聚酰亚胺衬底厚度进行了归一化, 为保证测量数据具有足够的信噪比, 焦点处的针孔直径定为 $195\ \mu\text{m}$ 。测量结果表明相对衍射特性和理论结果很接近, 使用相位型材料提高了软 X 射线波带片的衍射效率, 也提高了同步辐射光源的能量利用率。

致谢 作者感谢周洪军老师, 洪义麟老师, 万里飏和马晓冬同学在实验中的热情支持和帮助。

参 考 文 献

- Gerd Schneider. X-ray microscopes: methods and perspectives [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, **376**(5): 558~561
- B Kaulich, M Kiskinova. Synchrotron radiation X-ray microscopy based on zone plate optics [J]. *Lecture Notes in Physics*, 2002, **588**(6): 93~110
- J Kirz. Phase zone plate for X-rays and the extreme UV [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1974, **64**(3): 301~309
- Xiao Kai, Liu Ying, Xu Xiangdong *et al.*. Fabrication of soft X-ray phase condenser zone plates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1722~1723 (in Chinese)
肖凯, 刘颖, 徐向东等. 软 X 射线相位型聚焦波带片的研制 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1722~1723 (in Chinese)
- Fu Shaojun, Hong Yilin, Tao Xiaoming *et al.*. Fabrication of soft X-ray condenser zone plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8): 1148~1150 (in Chinese)
付绍军, 洪义麟, 陶晓明等. 软 X 射线聚焦波带片制备工艺的研究 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(8): 1148~1150
- Ying Liu, Jun Lou, Kai Xiao *et al.*. Studies on phase Ronchi gratings and the fabrication of soft X-ray condenser zone plates [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5636**: 150~158
- Steven J. Spector. *Diffraction optics for soft X-rays* [D]. Stony Brook: State University of New York, 1997