

文章编号 1004-924X(2017)11-2803-07

大高宽比硬 X 射线波带片制作及聚焦测试

李海亮^{1,2}, 史丽娜¹, 牛洁斌¹, 王冠亚¹, 谢常青^{1*}

(1. 中国科学院微电子研究所 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为得到同步辐射光源硬 X 射线波段(>2 keV)需要的高宽比高分辨率波带片, 本文利用高加速电压(100 kV)电子束光刻配合 Si_3N_4 镂空薄膜直写来减少背散射的方法, 对硬 X 射线波带片制作技术进行了蒙特卡洛模拟和电子束光刻实验。模拟结果显示: Si_3N_4 镂空薄膜衬底可以有效降低电子在抗蚀剂中传播时的背散射, 进而改善高密度大高宽比容易引起的结构倒塌和粘连问题。通过调整电子束的曝光剂量, 在 500 nm 厚的镂空 Si_3N_4 薄膜衬底上制备出最外环宽度为 150 nm、金吸收体的厚度为 1.6 μm 、高宽比大于 10 的硬 X 射线波带片。同时, 引入随机支撑点结构, 实现了波带片结构自支撑, 提高了大高宽比波带片的稳定性。将利用该工艺制作的波带片在北京同步辐射装置 X 射线成像 4W1A 束线 8 keV 能量下进行了聚焦测试, 得到清晰的聚焦结果。

关键词:硬 X 射线波带片; 电子束光刻; 大高宽比波带片; 电子束光刻; 镂空薄膜

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172511.2803

Fabrication and focusing test of hard X-ray zone plates with high aspect ratio

LI Hai-liang^{1,2}, SHI Li-na¹, NIU Jie-bin¹, WANG Guan-ya¹, XIE Chang-qing^{1*}

(1. Key Laboratory of Microelectronic Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xiechangqing@ime.ac.cn

Abstract: The high-resolution hard X-ray (>2 keV) Fresnel zone plates with high density and high aspect ratio was fabricated for Synchrotron Radiation Light Source. The electron beam lithography and the fabrication of hard X-ray zone plates were simulated with Monte Carlo method by combining high accelerating voltage (100 kV) with Si_3N_4 self-standing film to reduce the backscattering. The simulation result shows that Si_3N_4 self-standing film substrate effectively reduces backscattering when electrons propagate in the resist, so that the structure collapse and adhesion caused by high density and high aspect ratio are overcome. By adjusting the electron beam exposure dose, hard X-ray Fresnel zone plates with the outermost ring width of 150 nm, gold absorber thickness of 1.6 μm and the aspect ratio more than 10 were fabricated on a 500 nm Si_3N_4 self-standing film. Meanwhile, a random support structure was introduced to realize the self support of the zone plates and to improve their

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-04-15.

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金资助项目 (No. Y6YS053001); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61275170)

stability. The focusing properties of the zone plates fabricated were tested with energy of 8 keV at 4W1A beamline of Beijing Synchrotron Radiation Facility, and a clear focusing result was obtained.

Key words: hard X-ray zone plates; electron beam lithography; high aspect-ratio zone plate; electron beam lithography; self-standing film

1 引言

根据折射原理,在可见光波段通常利用透镜进行聚焦;但在 X 射线和极紫外(EUV)波段,由于材料在这两个波段的折射率实部接近 1,并且虚部不为零,有一定吸收,导致聚焦效率特别低甚至难以实现聚焦。目前,不论是软 X 射线波段还是硬 X 射线波段,波带片是最出色的微聚焦光学元件之一,并已广泛应用在生命科学^[1]、X 射线显微^[2]和空间成像^[3]等领域。

波带片的分辨率与其最外环的最小宽度成正比,根据经典 Rayleigh 公式^[4],分辨率为最外环宽度的 1.22 倍。但是,在硬 X 射线波段,由于入射光穿透能力强,除了要满足分辨率要求外,波带片的吸收层材料要足够厚才能进行有效吸收实现聚焦,因此波带片的高宽比成为硬 X 射线波带片制造技术的核心问题。即使采用高 Z 材料 Au 作为吸收材料时,波带片需要 1.6 μm 的厚度才能将 8 keV 入射光能量 π 相移的效率达到 30%。为了追求极限分辨率和高衍射效率,相关研究机构采用各种先进的加工工艺制作硬 X 射线波带片^[5-25],这些工艺技术主要包括电子束直写、电子束和 X 射线复合曝光、ALD 技术和聚焦离子束(FIB)等。美国 XRadia 公司利用电子束光刻和三层抗蚀剂技术,制作了最外环宽度为 24 nm,厚度为 300 nm 的硬 X 射线波带片^[5]。台湾中央研究院的人员采用电子束直写技术,获得了最外环宽度为 30 nm,厚度为 450 nm 的波带片^[8]。中国科学技术大学在辐射实验室^[2,26-28]和中科院微电子所^[29-31]也进行了波带片研制,不过仅应用在软 X 射线波段。

本文利用高加速电压(100 kV)电子束光刻配合 Si_3N_4 镂空薄膜直写的方法,对硬 X 射线波带片制作技术进行了蒙特卡洛模拟优化。从模拟结果上看, Si_3N_4 镂空薄膜衬底可以有效降低电子在抗蚀剂中传播时的背散射,进而解决在电子

束直写大高宽比结构时因剂量过大而引起的分辨率降低及结构倒塌问题。该工艺制作的波带片在北京同步辐射装置 X 射线成像 4W1A 束线 8 keV 能量下进行了初步的聚焦测试,得到了清晰的聚焦结果。

2 波带片的模拟计算

利用 Fresnel-Kirchhoff 衍射公式和计算波带片生成的 Airy 图形面积,得到 Rayleigh 分辨率为^[4]:

$$Res=1.22\Delta r=0.61\lambda/NA, \quad (1)$$

其中: Δr 为波带片的最外环宽度, λ 为入射光波长,NA 为数值孔径。因此,在入射光波长或者能量一定时,波带片的极限衍射分辨率受最外环尺寸的限制。波带片的各级次衍射效率为^[4]:

$$\eta_m = \begin{cases} 0.25, & m=0 \\ \frac{1}{(m^2\pi^2)}, & m \text{ odd} \\ 0, & m \text{ even} \end{cases} \quad (2)$$

其中 η_m 表示第 m 级衍射效率。式(2)表示的是理想的黑白波带片,透光环带和吸收环带宽度(占空比)完全 1:1 的情况下各级次的衍射效率。可以看出,25%的衍射能量进入到 0 级,10%左右的能量进入到 1 级,50%的能量被吸收环带吸收,只有 15%的能量进入到其余更高的衍射级次。所以,在保证占空比为 1:1 的情况下,1 级衍射效率也不会超过 10%。为了提高 1 级衍射效率,吸收环带材料采用吸收较少的相移材料,此时相移材料的厚度 t 表示为:

$$t = \frac{\lambda}{2\delta}, \quad (3)$$

其中 δ 是相移材料在 X 射线下的复数折射率的实部。该复数折射率定义为:

$$\tilde{n} = 1 - \delta + i\beta \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,X 射线在任何材料下都有吸收^[32],衰减因子为 $e^{-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z}$,考虑吸收和相移后的 1 级衍射效率为^[32]:

$$\eta = \frac{1}{\pi^2} (1 + e^{-\frac{4\pi\delta}{\lambda}} - 2e^{-\frac{2\pi\delta}{\lambda}} \cos(2\pi\delta t/\lambda)). \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,相移因子 δ 大,吸收因子 β 小的材料最适合做吸收层。图 1 为金、钨和镍作为吸收层时,在 8 keV 入射能量下,厚度对波带片 1 级衍射效率的影响。可以看出,高 Z 材料如金、钨和镍,在 1~2 μm 的厚度就可以将 8 keV 的波长实现 π 相移。例如,8 keV 的入射光能量,Au 在 1.6 μm 厚度的时候就可以实现 π 相移,1 级衍射效率达到 30% 左右;而低 Z 材料,如硅等,虽然 β 小,但是 δ 也很小,所以需要很厚的吸收层才能实现 π 相移。

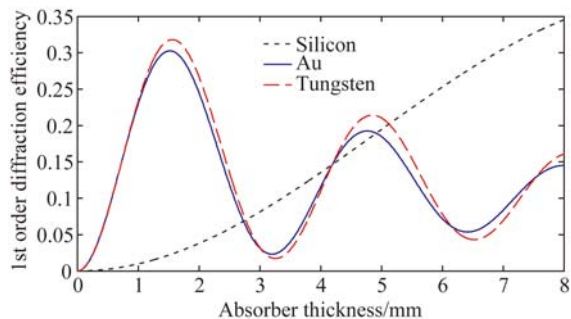


图 1 8 keV 能量下金、钨和硅厚度对 1 级衍射效率的影响
Fig.1 Dependence of the 1st order diffraction efficiency on thickness of absorber layers

为了证实 在自支撑薄膜上制备大高宽比结构时可以有效消除背散射的优势,模拟真实环境,对 200 nm 氮化硅自支撑薄膜衬底上和传统非薄膜衬底上的 2 μm PMMA 电子束抗蚀剂分别进行电子束光刻蒙特卡洛模拟,电子束的曝光剂量分别为 800,1 000,1 200 和 1 400 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。图 2 为蒙特卡洛模拟结果(彩图见期刊电子版),其中蓝色为入射电子的运动轨迹,红色线条为背散射电子的运动轨迹。对比图 2 可以看出,在传统非薄膜衬底上进行电子束曝光,随着曝光剂量的增加,背散射越来越严重;当剂量达到一定程度时,正性电子束抗蚀剂曝光图形开始出现倒梯形结构,并且分辨率降低,在显影过程中容易引起抗蚀剂图形倒塌。而在氮化硅自支撑薄膜衬底上进行同样的曝光,即使曝光剂量从 800 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 增至 1 400 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$,电子束几乎没有背散射,并且入射电子的运动轨迹始终保持在几十个纳米的范围内,由此证明在电子

束曝光时自支撑薄膜衬底能够抑制背散射,具有很大的优势。

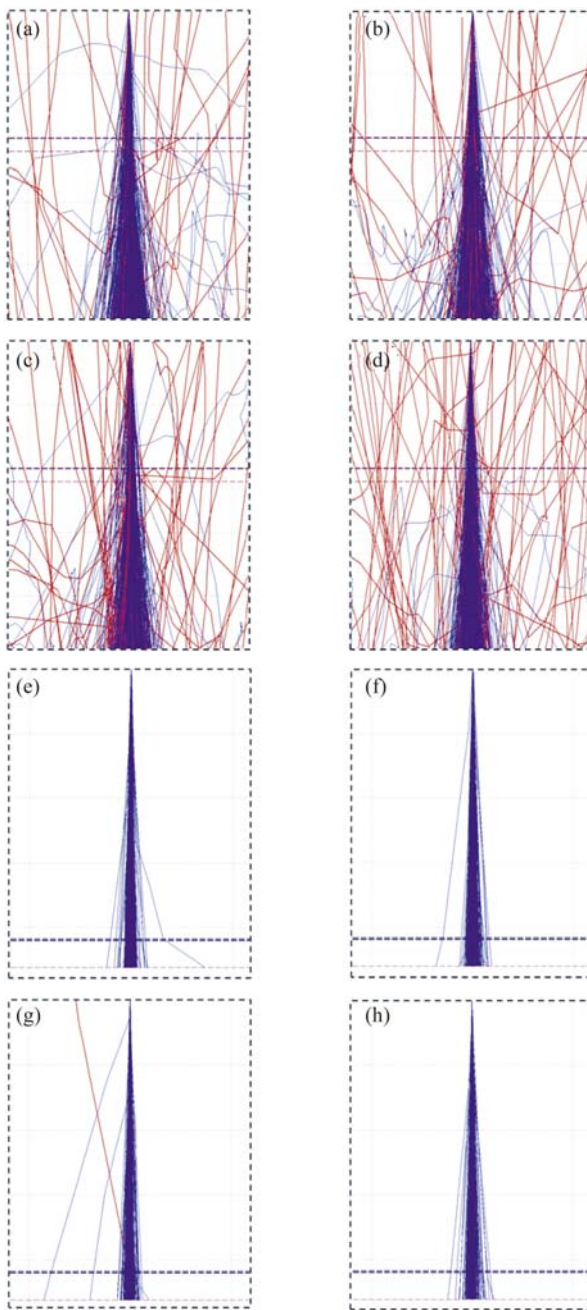


图 2 氮化硅自支撑薄膜衬底和传统非薄膜衬底的电子束光刻蒙特卡洛模拟结果对比,其中(a)、(b)、(c)、(d)为在传统非薄膜衬底上的模拟结果,(e)、(f)、(g)、(h)为氮化硅自支撑薄膜上的模拟结果,曝光剂量分别为 800,1 000,1 200 和 1 400 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
Fig. 2 Monte Carlo simulation results of electron beam lithography on Si_3N_4 self-standing film (e)—(h) and traditional non-film substrate (a)—(d) with different exposure doses from 800 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ to 1 400 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

3 工艺流程

电子束光刻工艺是在中科院微电子所微电子重点实验室实施的。电子束曝光系统的机型为 JEOL JBX6300-FS, 加速电压为 100 kV, 最小束斑为 2 nm。工艺流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

(1) 首先在经过清洗处理的超低应力 (<200 MPa) Si_3N_4 衬底上利用 KOH (体积浓度为 30%) 各向异性湿法腐蚀硅制作自支撑薄膜窗口, 薄膜厚度为 200 nm, 窗口大小为 $145 \mu\text{m} \times 145 \mu\text{m}$, 腐蚀液温度为 85°C , 腐蚀速度为 $1 \mu\text{m}/\text{min}$, 历时 8 h; (2) 在薄膜上溅射 5 nm 铬和 10 nm 金作为微电镀的导电层, 铬作为金和氮化硅薄膜的黏附层; (3) 旋涂 $2 \mu\text{m}$ 的电子束抗蚀剂 PMMA950K, 温度为 180° ; (4) 利用 JEOL6300-FS 曝光系统, 在 4# 透镜模式下, 加速电压为 100 kV, 束流为 100 pA, 曝光剂量为 $1\ 400 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 对 PMMA950K 电子束抗蚀剂直写, 经过显影(显影液为 MIBK:IPA=1:3, 历时 60 s)和定影(定影液为 IPA, 历时 30 s), 得到波带片抗蚀剂图形。由于波带片的总面积小, 所以在电镀过程即使电流很小, 分到单个波带片的电流密度也很大, 所以电镀速度非常快, 为了精确控制金的生长速度, 在直写波带片图形后, 在波带片边上写出一块圆形辅助电镀区, 这样既可以有效降低电流密度, 还可以实时检测辅助区金的生长厚度, 并以此判断波带片的生长厚度, 保证相移精度; (5) 利用微电镀技术, 在亚硫酸盐金电镀液中生长 $1.6 \mu\text{m}$ 厚度的金; (6) 去除抗蚀剂得到金波带片结构, 并利用反应离子刻蚀技术去除波带片透光环带之间的氮化硅支撑薄膜, 减少对入射光的吸收, 增加衍射效率, 最终得到自支撑硬 X 射线波带片, 如图 4 所示。

波带片的版图设计如图 4(a) 所示, 将波带片中心部分环带去掉, 全部换为吸收材料。这样的设计有两个优点: 第一, 可以降低直通光对 1 级聚焦光斑的干扰; 第二, 可以消除中心环带在电子束直写的过程中, 由于临近效应引起的靠外环较细环带的分辨率降低。为了防止整个图形在制作工艺最后去除透光环带中的氮化硅自支撑膜时坍塌, 这里将部分图形边缘搭在镂空窗口的边缘。图 4(b) 是制备出来的硬 X 射线波带片的扫描电

镜照片, 波带片直径为 $150 \mu\text{m}$, 外环宽度为 150 nm, 金吸收层厚度为 $1.6 \mu\text{m}$ 。从波带片的整体摩尔干涉条纹可以看出, 线条均匀, 没有倒塌和粘连的现象。由图 4(c) 可以看出, 引入的随机支撑点在整个镂空结构中起着非常重要的作用, 即使全部自支撑薄膜全部镂空, 波带片也没有倒塌。

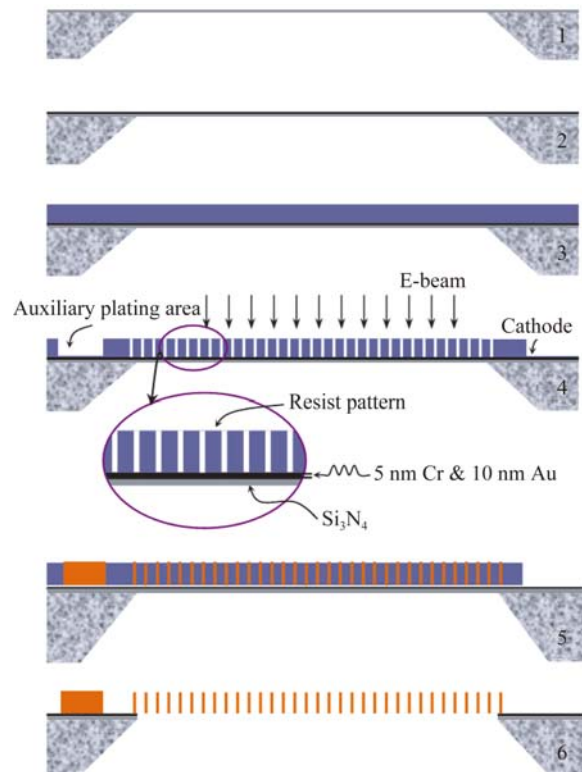
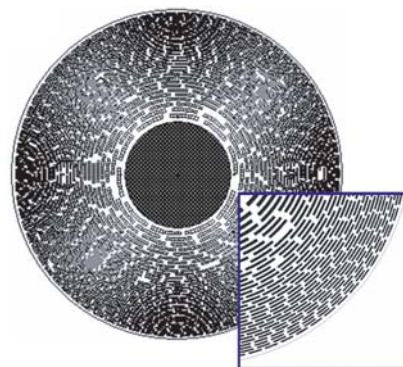


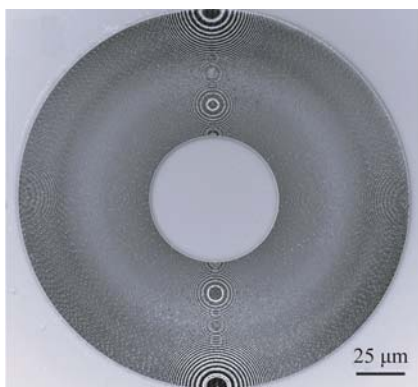
图 3 Si_3N_4 镂空薄膜衬底上电子束光刻制备硬 X 射线波带片工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of fabrication of hard X-ray zone plates on Si_3N_4 self-standing film using electron beam lithography



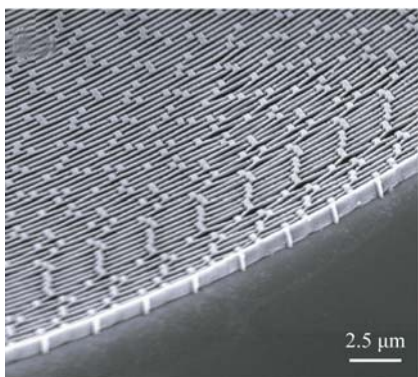
(a) 版图结构示意图

(a) Layout of zone plates



(b) 硬 X 射线波带片扫描电镜图,其中金吸收层厚 $1.6 \mu\text{m}$,最外环宽度为 150 nm

(b) SEM image of hard X-ray zone plates with $1.6 \mu\text{m}$ thickness and outmost zone width of 150 nm



(c) 硬 X 射线波带片靠近外环局部扫描电镜照片,倾斜角为 30°

(c) SEM image of zone plates near outmost zone, tilted at 30°

图 4 制备的硬 X 射线波带片

Fig. 4 Fabricated hard X-ray zone plates

为了验证所制作波带片的性能,在北京同步辐射装置 X 射线成像站 4W1A 束线 8 keV 能量下进行了初步的聚焦测试。测试光路为 X 射线经过滤波片得到 8 keV 能量的单色光,垂直入射到待测波带片样品,在 65 mm 焦点处放置 CCD 接收信号。4W1A 光束线到达测试站的光子通量约为 $2 \times 10^{12} \text{ Phs/s/0.1\% BW}$ ($E = 8 \text{ keV}$, $40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ pinhole)。所用成像设备为英国 Photonic Science 公司的 X 射线 CCD (X-ray FDI-18 mm camera system, Photonic Science Limited),其像素尺寸为 $10.9 \mu\text{m} \times 10.9 \mu\text{m}$,像素阵列为 1300×1030 。为了方便测试,在同一块氮化硅衬底上开出 12 个窗口,利用上述工艺制作出 3×4 的波带片阵列,第一行的曝光剂量为 $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$,第二行的曝光

剂量为 $1200 \mu\text{C}/\text{cm}^2$,第三行的曝光剂量为 $1400 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。由于自支撑薄膜可以有效抑制背散射,使得曝光剂量有很大的宽容度,所以在剂量很大时,得到的波带片结构也基本一致,从图 5 的测试结果上看,每一块波带片都可以实现聚焦。但由于 X 射线 CCD 的分辨率有限,目前对硬 X 射线波带片的分辨率测试在一定程度上会受到限制。



图 5 8 keV 能量下硬 X 射线波带片阵列在 X 射线 CCD 上的聚焦图像

Fig. 5 Focusing image of hard X-ray zone plates captured by X-ray CCD at 8 keV

4 结 论

本文利用高加速电压 (100 kV) 电子束光刻配合 Si_3N_4 镂空薄膜上直写来减少背散射的方法,在 500 nm 厚的镂空 Si_3N_4 薄膜衬底上成功制备出最外环宽度为 150 nm 、金吸收体厚度为 $1.6 \mu\text{m}$ 的硬 X 射线波带片,高宽比大于 10。此外,引入随机支撑点结构,实现大高宽比波带片结构的自支撑,去除了 Si_3N_4 自支撑薄膜引起的吸收,提高了衍射效率,同时也增强了大高宽比波带片的稳定性。该工艺制作的波带片在北京同步辐射装置 X 射线成像 4W1A 束线 8 keV 能量下进行了初步的聚焦测试,尽管受目前 X 射线成像 CCD 分辨率的限制,不过还是得到了清晰的聚焦结果。该工艺方法不仅可以用于制作硬 X 射线波带片,还可用于制作在其它大高宽比的结构。

参考文献:

- [1] WU H R, CHEN S T, CHU Y S, *et al.*. Nanoresolution radiology of neurons [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(24): 242001.
- [2] 徐向东, 周洪军, 洪义麟, 等. 软 X 射线直线单色仪光场分布实验研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(6): 1043-1046.
- XU X D, ZHOU H J, Hong Y L, *et al.*. Experimental study on optical field distribution of the soft X-ray linear monochromator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(6): 1043-1046. (in Chinese)
- [3] MESLER B L, FISCHER P, CHAO W L, *et al.*. Soft X-ray imaging of spin dynamics at high spatial and temporal resolution [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2007, 25(6): 2598-2602.
- [4] ATTWOOD D. *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [5] FENG Y, FESER M, LYON A, *et al.*. Nanofabrication of high aspect ratio 24 nm x-ray zone plates for x-ray imaging applications [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2007, 25(6): 2004-2007.
- [6] CHEN Y T, LO T N, CHIU C W, *et al.*. Fabrication of high-aspect-ratio Fresnel zone plates by e-beam lithography and electroplating [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2008, 15(2): 170-175.
- [7] CHU Y S, YI J M, DE CARLO F, *et al.*. Hard-X-ray microscopy with Fresnel zone plates reaches 40 nm Rayleigh resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 103119.
- [8] CHEN Y T, LO T N, CHU Y S, *et al.*. Full-field hard X-ray microscopy below 30 nm: A challenging nanofabrication achievement [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(39): 395302.
- [9] HOLMBERG A, REINSPACH J, LINDBLOM M, *et al.*. Towards 10-nm soft X-ray zone plate fabrication [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1365(1): 18-23.
- [10] REINSPACH J, LINDBLOM M, HOFSTEN O V, *et al.*. Process development for improved soft X-ray zone plates [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(5-8): 1583-1586.
- [11] CHUBAROVA E, NILSSON D, LINDBLOM M, *et al.*. Platinum zone plates for hard X-ray applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(10): 3123-3126.
- [12] KOYAMA T, TAKANO H, KONISHI S, *et al.*. Circular multilayer zone plate for high-energy X-ray nano-imaging [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(1): 013705.
- [13] YIN G CH, SONG Y F, TANG M T, *et al.*. 30 nm resolution x-ray imaging at 8 keV using third order diffraction of a zone plate lens objective in a transmission microscope[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(22): 221122.
- [14] GORELICK S, VILA-COMAMALA J, GUZENKO V A, *et al.*. High-efficiency Fresnel zone plates for hard X-rays by 100 keV e-beam lithography and electroplating [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(3): 442-446.
- [15] WERNER S, REHBEIN S, GUTTMANN P, *et al.*. Towards high diffraction efficiency zone plates for X-ray microscopy [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(5-8): 1557-1560.
- [16] KAGOSHIMA Y, TAKANO H, KOYAMA T, *et al.*. Tandem-phase zone-plate optics for high-energy X-ray focusing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(2R): 022503.
- [17] BERUJON S, WANG H, PAPE I, *et al.*. X-ray submicrometer phase contrast imaging with a Fresnel zone plate and a two dimensional grating interferometer [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1622-1624.
- [18] NILSSON D, UHLÉN F, REINSPACH J, *et al.*. Thermal stability of tungsten zone plates for focusing hard X-ray free-electron laser radiation [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(4): 043010.
- [19] KUWABARA H, YASHIRO W, HARASSE S, *et al.*. Hard-X-ray phase-difference microscopy with a low-brilliance laboratory X-ray source [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(6): 062502.
- [20] UHLÉN F, LINDQVIST S, NILSSON D, *et al.*. New diamond nanofabrication process for hard X-ray zone plates [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2011, 29(6): 06FG03.
- [21] DAVID C, GORELICK S, RUTISHAUSER S, *et al.*. Nanofocusing of hard x-ray free electron laser

- pulses using diamond based Fresnel zone plates [J]. *Scientific Reports*, 2011, 1: 57.
- [22] WOJCIK M J, JOSHI V, SUMANT A V, *et al.*. Nanofabrication of X-ray zone plates using ultranocrystalline diamond molds and electroforming [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, 28(6): C6P30.
- [23] SARKAR S S, SOLAK H H, RAABE J, *et al.*. Fabrication of Fresnel zone plates with 25 nm zone width using extreme ultraviolet holography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87 (5-8): 854-858.
- [24] CHAO W, FISCHER P, TYLISZCZAK T, *et al.*. Real space soft X-ray imaging at 10 nm spatial resolution [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9777-9783.
- [25] REHBEIN S, GUTTMANN P, WERNER S, *et al.*. Characterization of the resolving power and contrast transfer function of a transmission X-ray microscope with partially coherent illumination [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 5830-5839.
- [26] 柳龙华, 刘刚, 熊瑛, 等. 大高宽比、高线密度 X 射线透射光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 72-77.
- LIU L H, LIU G, XIONG Y, *et al.*. Fabrication of high-aspect-ratio and high-density X-ray transmission grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 72-77. (in Chinese)
- [27] 肖凯, 刘颖, 付绍军. 振幅矢量叠加法分析 X 射线波带片加工误差对效率的影响 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 643-649.
- XIAO K, LIU Y, FU SH J. Analysis of the influence of fabrication errors on the efficiency of X-ray zone plates by summing up the wavelets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 643-649. (in Chinese)
- [28] 陈洁, 柳龙华, 刘刚, 等. X 射线成像波带片及制作 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12): 1894-1899.
- CHEN J, LIU L H, LIU G, *et al.*. X-ray imaging Fresnel zone plates and fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1894-1899. (in Chinese)
- [29] XIE CH Q, ZHU X L, SHI L N, *et al.*. Spiral photon sieves apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-X-ray vortex [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1765-1767.
- [30] XIE CH Q, ZHU X L, LI H L, *et al.*. Feasibility study of hard-X-ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4048-4050.
- [31] 谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900128.
- XIE CH Q, ZHU X L, NIU J B, *et al.*. Micro-and-nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900128. (in Chinese)
- [32] KIRZ J. Phase zone plates for X rays and the extreme UV [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(3): 301-309.

作者简介:



李海亮(1984—),男,河南焦作人,博士研究生,主要从事高线密度衍射光学元件研制、电子束光刻和 X 射线光刻等方面的研究。E-mail: lihailiang@ime.ac.cn

通讯作者:



谢常青(1971—),男,广西钦州人,研究员,1993 年于中国科技大学获得学士学位,主要从事 X 射线衍射光学器件的研究。E-mail: xiechangqing@ime.ac.cn