

级联式平面抛物面型X射线组合折射透镜的设计与制作*

付明磊¹⁾²⁾ 乐孜纯^{1)2)†} 周寒青¹⁾²⁾ 张明¹⁾²⁾ 全必胜¹⁾²⁾ 王华³⁾
毛成文³⁾ 王昌辉¹⁾²⁾ 沈小燕¹⁾²⁾

1) (浙江工业大学理学院, 杭州 310023)

2) (浙江工业大学光学工程研究所, 杭州 310023)

3) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

(2014年4月2日收到; 2014年4月24日收到修改稿)

X射线组合折射透镜(CRL)已逐步成为同步辐射光源下X射线聚焦光学器件的标准配件之一,它具有结构紧凑、易调节校准、适用光子能量范围大等优点. 本文设计了一种级联式平面抛物面型CRL, 它将 N_1 个具有较大抛物面几何孔径(R_0)的折射单元I与 N_2 个具有较小抛物面顶点曲率半径(R)的折射单元II级联, 以解决常规CRL设计过程中焦斑尺寸与透过率的矛盾. 采用PMMA材料, 利用LIGA技术制作了一组级联式平面抛物面型CRL, 其中折射单元I的主要结构参数为 $N_1 = 15$, $R_1 = 200 \mu\text{m}$, $2R_{01} = 564 \mu\text{m}$; 折射单元II的主要结构参数为 $N_2 = 20$, $R_2 = 50 \mu\text{m}$, $2R_{02} = 140 \mu\text{m}$. 在上海光源同步辐射射线束上, 所制作的级联式平面抛物面型CRL实现了对初始光斑尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的入射X射线的一维聚焦, 测试得到的焦距为1.052 m, 横向焦斑尺寸为 $24.9 \mu\text{m}@8 \text{keV}$, 透过率为2.19%.

关键词: 组合折射透镜, X射线光学器件, 抛物面型透镜

PACS: 41.50.+h, 07.85.-m, 07.85.Tt

DOI: 10.7498/aps.63.194103

1 引言

随着X射线无损检测与成像技术的普及与发展, 面向各类X射线光学器件的理论研究与制作水平取得了长足的进步^[1-3]. X射线组合折射透镜(compound refractive lenses, CRL)是基于光线折射原理实现对入射X射线聚焦与成像的光学器件. 与K-B镜、菲涅尔波带片、毛细管透镜等同类X射线聚焦光学器件相比, CRL具有结构紧凑、易调节校准、适用光子能量范围大等优点, 特别适合于硬X射线波段的聚焦与成像^[4-6]. 近年来, 欧洲同步辐射研究中心(ESRF)、德国电子同步加速器研究所(DESY)等世界知名的同步辐射研究中心都非

常重视对CRL的研究与应用. 他们利用同步辐射光源和CRL实现纳米层析成像(Nano CT)^[7]、微束X射线荧光谱仪(micro XRF)^[8]、微束X射线吸收谱仪(micro XAF)^[9]等高分辨率的无损检测与成像系统, 并且成功应用于材料科学、生命科学等领域.

在CRL的设计与制作方面, 近年的代表性成果有: 2011年, ESRF的研究人员以CRL为基础提出了一种新型的X射线聚焦系统——X-ray Transfocator^[10]. X-ray Transfocator可以通过改变CRL的透镜个数适配入射X射线能量和调整焦距, 它可以实现焦斑尺寸为6—42 μm 的一维聚焦. 2012年, DESY的研究人员以Be材料抛物面型一维和二维CRL为基础, 设计一种新型的X-ray Trans-

* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20133317110006)、国家国际科技合作项目(批准号: 2012DFR10510)和上海光源用户课题(批准号: 09sr0134)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lzc@zjut.edu.cn

focator [11]. 它可以工作在 4—20 keV 光子能量范围, 实现 $3 \times 3 \mu\text{m}^2 @ 13.2 \text{ keV}$ 的聚焦光斑. 2013 年, 波兰和日本的研究人员利用由 600 个 Ni 材料抛物面型透镜组成的 CRL 实现对入射光子能量为 174 keV 的 X 射线进行聚焦, 测试焦斑为 $5.5 \mu\text{m} @ 174 \text{ keV}$ [12].

目前, 国内外关于 CRL 研究工作中, 研究者们的关注点集中在如何缩小焦斑尺寸以提高系统分辨率 [11–15]. 然而, 为了缩小焦斑尺寸, 一种常规方案是在抛物面顶点曲率半径不变的条件下增加折射单元的个数; 另一种常规方案是在折射单元个数不变的条件下降低抛物面顶点曲率半径. 这两种方案共同的弊端是导致 CRL 透过率的降低. 因此, 缩小焦斑尺寸与提高透过率成为 CRL 设计过程中的一种矛盾. 为了尝试解决这种矛盾, 本文提出了一种级联式平面抛物面型 CRL 的设计方案, 即将具有较大抛物面几何孔径的折射单元与具有较小抛物面顶点曲率半径的折射单元级联组成单片 CRL. 本文介绍了这种级联式平面抛物面型 CRL 的结构、理论模型, 采用 LIGA (德文 lithographie, galvanoformung 和 abformung, 即光刻、电铸和注塑) 技术制作了 PMMA (polymethyl methacrylate, 聚甲基丙烯酸甲酯) 材料的级联式平面抛物面型 CRL. 在上海光源的同步辐射线束上对所制作的 CRL 进行了聚焦性能测试. 实验结果表明: 虽然制作工艺误差限制了 CRL 的性能, 但是这种级联式平面抛物面型 CRL 实现了对初始光斑尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的入射 X 射线的一维聚焦, 测试得到的焦距为 1.052 m, 焦斑尺寸为 $24.9 \mu\text{m} @ 8 \text{ keV}$, 透过率为 2.19%.

2 级联式平面抛物面型 CRL 的器件结构与理论模型

2.1 级联式平面抛物面型 CRL 的器件结构

级联式抛物面形 CRL 由 N_1 个完全相同的折射单元 I 和 N_2 个完全相同的折射单元 II 组成. 如图 1 所示, 每个折射单元都是双凹透镜, 其面型为抛物面. 折射单元 I 在抛物面开口处具有较大的几何孔径, 而折射单元 II 在抛物面顶点处具有较小的曲率半径. 通过将具有不同单元数目的折射单元 I 和折射单元 II 级联, 级联式抛物面形 CRL 可以实现对入射 X 射线的一维聚焦.

如图 2 所示, 本文设定折射单元 I 的抛物面顶点处的曲率半径为 R_1 , 折射单元上抛物面开口尺寸为 $2R_{01}$, 抛物面的深度为 $L_1/2$, 折射单元中心的中壁厚度为 d_1 . 折射单元 II 的抛物面顶点处的曲率半径为 R_2 , 折射单元上抛物面开口尺寸为 $2R_{02}$, 抛物面的深度为 $L_2/2$, 折射单元中心的中壁厚度为 d_2 .

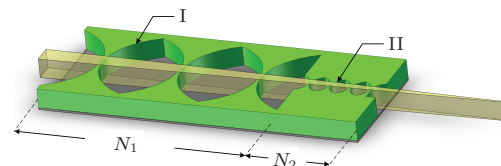


图 1 (网刊彩色) 级联式平面抛物面型 CRL 的器件结构示意图

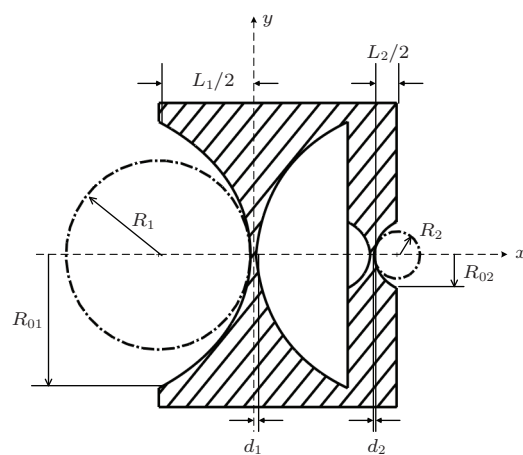


图 2 级联式平面抛物面型 CRL 的折射单元结构参数

2.2 级联式平面抛物面型 CRL 的理论焦距

在 X 射线波段, 物质的复折射率表示为 $n = 1 - \delta + i\beta$, 复折射率的实部 $1 - \delta$ 代表折射, 虚部 β 代表吸收. 一般来说, CRL 的厚度远小于其焦距, 可以将其近似为薄透镜. 由矩阵光学理论可得到薄透镜近似下, N_1 个折射单元 I 组成的组合折射透镜 I (CRL I) 的焦距 f_1 为 [14]

$$f_1 = \frac{R_1}{2N_1\delta}. \quad (1)$$

N_2 个折射单元 II 组成的组合折射透镜 II (CRL II) 的焦距 f_2 为

$$f_2 = \frac{R_2}{2N_2\delta}. \quad (2)$$

图 1 中所示的级联式抛物面型 CRL 由 CRL I 和 CRL II 在同一块基片上密接组成. 根据组合光

具组的成像规律^[16], 可知级联式抛物面型 CRL 的焦距 f 满足

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}. \quad (3)$$

将 (1), (2) 式代入 (3) 式可得

$$f = \frac{R_1 R_2}{2\delta(N_1 R_2 + N_2 R_1)}. \quad (4)$$

2.3 级联式平面抛物面型 CRL 的透过率和有效孔径

图 2 所示级联式抛物面型 CRL 中, 以折射单元 I 为例, 双凹折射单元的面型函数为 $y^2 = \pm 2R_1 x$. 在高度 y 处, 折射单元的厚度函数为 $D(y) = d_1 + y^2/R_1$. 级联式抛物面型 CRL 的透过率 T_P 由 CRL I 的透过率 T_{P1} 和 CRL II 的透过率 T_{P2} 计算得到. 根据比尔-朗伯定律, T_{P1} 和 T_{P2} 可以通过对透过率函数在透镜开口平面上积分求得, 即

$$\begin{aligned} T_P &= T_{P1} \cdot T_{P2} \\ &= \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_{01}} \exp\left[-\mu N_1 \left(\frac{y_1^2}{R_1} + d_1\right)\right] y_1 dy_1}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_{01}} y_1 dy_1} \\ &\quad \times \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_{02}} \exp\left[-\mu N_2 \left(\frac{y_2^2}{R_2} + d_2\right)\right] y_2 dy_2}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_{02}} y_2 dy_2} \\ &= \frac{R_1 R_2}{\mu^2 N_1 N_2 R_{01}^2 R_{02}^2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu N_1 R_{01}^2}{R_1}\right)\right] \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu N_2 R_{02}^2}{R_2}\right)\right] \\ &\quad \times \exp(-\mu N_1 d_1 - \mu N_2 d_2), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\mu = 4\pi\beta/\lambda$, 表示材料对 X 射线的吸收系数.

对普通透镜来说, 其有效口径就是其本身的几何口径. 但在 X 射线波段, CRL 材料对 X 射线有较强的吸收, 特别是 CRL 边缘的吸收作用更强. 这就使得 CRL 的有效口径一般小于其几何口径. 我们将级联式平面抛物面型 CRL 的有效口径 D_{eff} 定义为: 整个开口平面上的透过率函数归一化到透镜中心透过率所得到的等效平面的口径大小^[14]. 在级联式平面抛物面型 CRL 中, 透镜中心的透过率为 $\exp(-\mu N_1 d_1) \cdot \exp(-\mu N_2 d_2)$. 那么, 级联式平面抛

物面型 CRL 的有效口径 D_{eff} 为

$$\begin{aligned} D_{\text{eff}} &= \frac{2}{R_{02}} \cdot \sqrt{\frac{R_1 R_2}{\mu^2 N_1 N_2}} \cdot \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\mu N_1 R_{01}^2}{R_1}\right)} \\ &\quad \times \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\mu N_2 R_{02}^2}{R_2}\right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

设 $a_1 = \frac{\mu N_1 R_{01}^2}{R_1}$, $a_2 = \frac{\mu N_2 R_{02}^2}{R_2}$, 则 (6) 式变为

$$\begin{aligned} D_{\text{eff}} &= 2R_{01} \cdot \sqrt{\frac{1 - \exp(-a_1)}{a_1}} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{1 - \exp(-a_2)}{a_2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 级联式平面抛物面型 CRL 的理论极限焦斑尺寸

由于 CRL 的厚度远小于其焦距, 因此可以将折射单元 (及组合透镜) 看作衍射屏. 当只考虑折射效应, 即不考虑反射和吸收影响时, 一束单色 X 射线通过 y 处产生的相位变化为

$$\begin{aligned} \varphi(y) &= \frac{2\pi}{\lambda} [t - \delta \cdot D(y)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[t - \delta \cdot \left(d + \frac{y^2}{R} \right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

折射单元的作用相当于一个位相变换系数为 $\tau(y)$ 的相位物体, 即

$$\begin{aligned} \tau(y) &= \exp[i\varphi(y)] \\ &= \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(t - \delta d)\right] \\ &\quad \times \exp\left(-i\frac{2\pi\delta y^2}{\lambda R}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

当考虑 X 射线吸收效应对通过折射单元的 X 射线的影响时, X 射线衰减系数 $A(y)$ 可表示为

$$\begin{aligned} A(y) &= \exp[-\mu D(y)] \\ &= \exp\left[-\frac{4\pi\beta}{\lambda} \cdot \left(d + \frac{y^2}{R}\right)\right]. \end{aligned} \quad (10)$$

综合考虑 X 射线通过 CRL 折射单元的折射效应和吸收效应的作用, 可得到 CRL 折射单元的衍射屏函数 $H(y)$ 为^[17]

$$H(y) = \tau(y) \cdot A(y). \quad (11)$$

因此, 级联式平面抛物面型 CRL 的衍射屏函数 $H_N(y)$ 为

$$H_N(y) = H_{N_1}(y) \cdot H_{N_2}(y)$$

$$\begin{aligned}
 &= [\tau_1(y) \cdot A_1(y)]^{N_1} \cdot [\tau_2(y) \cdot A_2(y)]^{N_2} \\
 &= \exp \left[i N_1 \frac{2\pi}{\lambda} (t_1 - \delta d_1) \right] \\
 &\quad \times \exp \left(- N_1 \frac{4\pi\beta d_1}{\lambda} \right) \\
 &\quad \times \exp \left(- N_1 \frac{4\pi\beta y^2}{\lambda R_1} \right) \\
 &\quad \times \exp \left(- i N_1 \frac{2\pi\delta y^2}{\lambda R_1} \right) \\
 &\quad \times \exp \left[i N_2 \frac{2\pi}{\lambda} (t_2 - \delta d_2) \right] \\
 &\quad \times \exp \left(- N_2 \frac{4\pi\beta d_2}{\lambda} \right) \\
 &\quad \times \exp \left(- N_2 \frac{4\pi\beta y^2}{\lambda R_2} \right) \\
 &\quad \times \exp \left(- i N_2 \frac{2\pi\delta y^2}{\lambda R_2} \right). \quad (12)
 \end{aligned}$$

根据基尔霍夫衍射积分, 像面的复振幅为

$$\begin{aligned}
 U(r, z) &= \int H_N(y) \cdot \exp \left(i \frac{\pi y^2}{\lambda z} \right) \\
 &\quad \times J_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda z} y r \right) \cdot y dy, \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中 J_0 表示零阶贝塞尔函数, z 为像距, r 为像面处横向坐标. 则像面光强

$$I(r, z) = U(r, z) \cdot U^*(r, z). \quad (14)$$

在焦平面处 $z = f = \frac{R_1 R_2}{2\delta(N_1 R_2 + N_2 R_1)}$, 将 (12), (13) 式代入 (14) 式可得焦平面处光强为

$$\begin{aligned}
 I(r) &= \frac{\lambda^2}{64\pi^2\beta^2 \left(\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} \right)^2} \\
 &\quad \times \exp \left[- \frac{8\pi\beta}{\lambda} (N_1 d_1 + N_2 d_2) \right] \\
 &\quad \times \exp \left[- \frac{2\pi\delta^2 r^2}{\lambda\beta} \left(\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} \right) \right]. \quad (15)
 \end{aligned}$$

焦斑圆心处 $r = 0$, 所以

$$I(r) = I(0) \cdot \exp \left[- \frac{2\pi\delta^2 r^2}{\lambda\beta} \left(\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} \right) \right]. \quad (16)$$

可见, 在焦面处焦斑光强的横向分布为高斯分布, 可以用半高全宽 (FWHM) 来表征焦斑大小. 当 $I\left(\frac{\Delta r}{2}\right) = \frac{1}{2}I(0)$ 时, 得到焦斑大小 Δr 为

$$\Delta r = \sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\delta^2}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2}}}. \quad (17)$$

3 级联式抛物面型CRL的实验测试结果及讨论

3.1 级联式平面抛物面型CRL的制作

我们采用PMMA材料, 利用LIGA技术制作了一组级联式抛物面型CRL. 所制作的CRL器件结构参数见表1.

表1 级联式抛物面型X射线组合折射透镜的结构参数

折射单元	抛物面顶点 曲率半径/ μm	抛物面开口 尺寸/ μm	单元数目 /个	中壁厚度 / μm
CRL I	$R_1 = 200$	$2R_{01} = 564$	$N_1 = 15$	$d_1 = 12$
CRL II	$R_2 = 50$	$2R_{02} = 140$	$N_2 = 20$	$d_2 = 8$

图3是所制作的级联式抛物面型CRL的器件外型扫描电子显微镜照片.

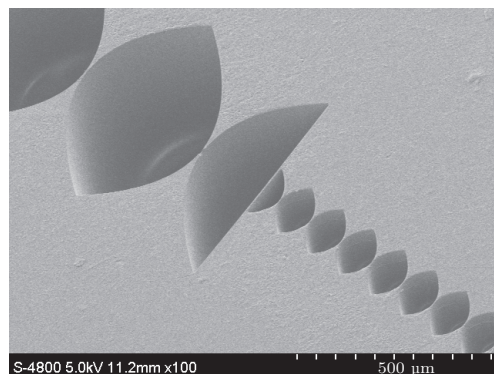


图3 级联式抛物面型CRL的器件外型扫描电子显微镜照片

在入射X射线光子能量为8 keV条件下, X射线在PMMA材料中的复折射率 $n = 1 - \delta + i\beta$ 中, $\delta = 3.852262 \times 10^{-6}$, $\beta = 8.202680 \times 10^{-9}$. 结合表1中的CRL结构参数, 在不考虑器件表面粗糙度等制作工艺误差的影响, 根据(4), (5)和(17)式可得, 级联式抛物面型CRL的理论焦距为0.2732 m, 理论焦斑尺寸为0.2775 μm , 理论透过率为10.45%.

3.2 实验过程与测试结果

为了测试CRL的焦距、透过率和焦斑尺寸等重要性能指标, 我们利用上海光源的同步辐射线束搭建了实验系统. 如图4所示, 我们撤除实验站上原有的K-B镜箱, 由同步辐射光源发出的X射线直接由级联式抛物面型CRL聚焦. 在焦斑处, 我们使用刀口仪对光斑扫描切割. I_0 探测器可以测量

CRL入射端X射线光强, 而 I_1 电离室探测器可以测量CRL透射输出的X射线光强.

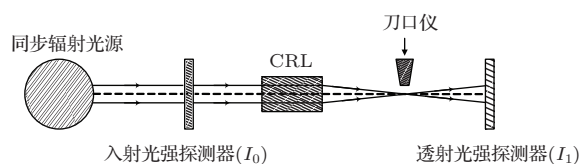


图4 测试CRL性能的实验系统示意图

同步辐射光源发出的X射线光子能量为8 keV, 其初始光斑尺寸约为 $200\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$. 在实验过程中, 通过X射线CCD(1个像素 $9\text{ }\mu\text{m}$)找到聚焦光斑, 测试其焦距为1.052 m. 然后, 以 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 步长调整刀口仪的步进电机, 对聚焦光斑扫描切割. 软件记录每次步进扫描得到的 I_1 电离室探测器输出的电压采样值. 本次实验的焦斑尺寸测试结果如图5中黑色曲线所示. 通过对截取的电压采样值进行高斯拟合, 如图5中红色曲线所示, 得到所制作的CRL的半高全宽(FWHM)为 $24.9\text{ }\mu\text{m}$. 同时, 根据 I_0 探测器和 I_1 电离室探测器得到的采样电压值, 计算得到光子能量为8 keV的X射线在CRL的透过率为2.19%.

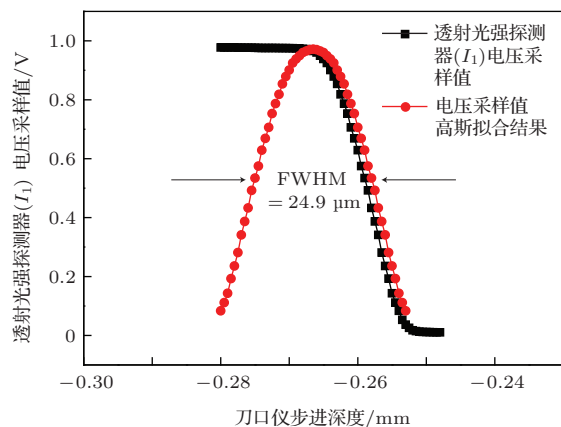


图5 (网刊彩色) 利用刀口仪扫描法测量得到的聚焦光斑尺寸

3.3 实验结果误差原因分析

实验结果表明, 所制作的级联式抛物面型CRL能够在保证一定透过率的条件下完成对入射X射线的聚焦. 但是, CRL主要性能指标的实验数据与理论设计结果存在一定的差距. 除实验系统误差外, 实验结果误差主要由制作工艺误差导致的器件表面粗糙度和器件结构缺陷引起. 比如, 图6所示的CRL器件表面扫描电子显微镜照片中, 抛物面

和中壁都存在小孔. 器件表面粗糙度会增加CRL材料对X射线的吸收与散射. 根据(5), (7)和(17)式, 吸收系数 μ 的增加将导致CRL的透过率、有效孔径和焦斑尺寸等性能指标下降.

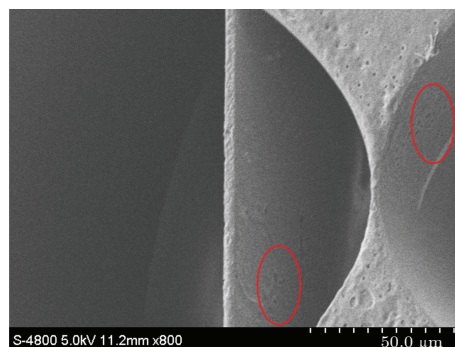


图6 所制作的组合折射透镜材料表面扫描电子显微镜照片

图7所示的组合折射透镜中壁外型扫描电子显微镜照片中, CRL中部分折射单元的中壁存在蚀刻不足的现象. 一方面, 蚀刻不足会增加中壁厚度 d_1 和 d_2 , 加重中壁材料对X射线的吸收. 另一方面, 蚀刻不足会破坏透镜的抛物面型, 改变X射线在CRL中的传播路线, 影响焦距、焦斑尺寸和透过率.

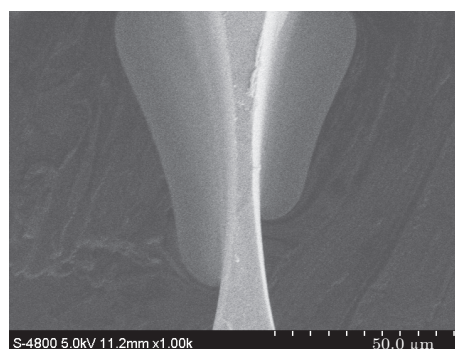


图7 所制作的组合折射透镜中部分折射单元的中壁扫描电子显微镜照片

此外, 由于制作CRL所采用的PMMA材料对于同步辐射光束的辐射抗性较低, 实验过程中发现: 在长时间暴露在高能同步辐射光束后, CRL器件材料有气泡现象产生, 这也会导致CRL主要性能指标的实验数据与理论设计结果之间出现误差.

4 结 论

目前, X射线组合折射透镜凭借其突出的优点, 逐步成为同步辐射光源下X射线聚焦光学器件的标准配件之一. 本文在新型结构的X射线组合折射透镜的设计与制作方面展开了一定的探索性研究,

提出并实现了级联式平面抛物面型X射线组合折射透镜. 在设计思想上, 该组合透镜兼顾了大抛物面开口尺寸与小抛物面顶点曲率半径的性能需求, 较好地解决了组合透镜焦斑尺寸与透过率的矛盾. 在详细介绍了级联式平面抛物面型X射线组合折射透镜的理论模型后, 本文还介绍了组合透镜的制作与实验测试结果. 在上海光源同步辐射线束下, 所制作的PMMA材料的级联式平面抛物面型X射线组合折射透镜的测试焦距为1.052 m, 测试焦斑尺寸为24.9 μm @8 keV, 透过率为2.19%. 需要注意的是, 由于透镜制作工艺误差的限制, 本次制作的组合折射透镜在器件表面粗糙度和实际器件结构上存在缺陷, 导致了实验结果与理论设计结果存在差距. 在接下来的工作中, 我们将努力提高组合折射透镜的制作水平以及优化透镜结构, 提高组合折射透镜的性能.

参考文献

- [1] Cao Z R, Dong J J, Yang Z H, Zhan X Y, Yuan Z, Zhang H Y, Jiang S E, Ding Y K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 045205 (in Chinese) [曹柱荣, 董建军, 杨正华, 詹夏宇, 袁铮, 张海鹰, 江少恩, 丁永坤 2013 物理学报 **62** 045205]
- [2] Fox O J L, Alianelli L, Malik A M, Pape I, May P W, Sawhney K J S 2014 *Opt. Express* **22** 7657
- [3] Huang Q S, Li H C, Song Z Q, Zhu J T, Wang Z S, Li A G, Yan S, Mao C W, Wang H, Yan F, Zhang L, Yu X H, Liu P, Li M 2013 *Chin. Phys. C* **37** 028002
- [4] Li Y D, Lin X Y, Liu S G, He J L, Guo F, Sun T X, Liu P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044103
- [5] Guilherme A, Buzanich G, Carvalho M L 2012 *Spectrochim. Acta. Part B* **77** 1
- [6] Snigireva I, Snigirev A 2013 *Journal of Physics: Conference Series* **463** 012044
- [7] Ogurreck M, Wilde F, Herzen J, Beckmann F, Nazmov V, Mohr J, Haibel A, Müller M, Schreyer A 2013 *Journal of Physics: Conference Series* **425** 182002
- [8] Guilherme A, Buzanich G, Radtke M, Reinholz U, Corrado J, Dos Santos J M F, Carvalho M L 2012 *J. Anal. At. Spectrom* **27** 966
- [9] Buzanich G, Radtke M, Reinholz U, Riesemeier H, Strelci C 2012 *J. Anal. At. Spectrom* **27** 1803
- [10] Vaughan G B M, Wright J P, Bytchkov A, Rossat M, Gleyzolle H, Snigireva I, Snigirev A 2011 *J. Synchrotron. Radiat* **18** 125
- [11] Zozulya A V, Bondarenko S, Schavkan A, Westermeier F, Grübel G, Sprung M 2012 *Opt. Express* **20** 18967
- [12] Andrejczuk A, Nagamine M, Sakurai Y, Itou M 2014 *J. Synchrotron. Radiat* **21** 57
- [13] Le Z C, Liang J Q, Dong W, Zhu P P, Peng L Q, Wang W B, Huang W X, Yuan Q X, Wang J Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 984
- [14] Le Z C, Dong W, Liu W, Zhang M, Liang J Q, Quan B S, Liu K, Liang Z Z, Zhu P P, Yin F T, Huang W X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1977 (in Chinese) [乐孜纯, 董文, 刘魏, 张明, 梁静秋, 全必胜, 刘恺, 梁中翥, 朱佩平, 伊福廷, 黄万霞 2010 物理学报 **59** 1977]
- [15] Le Z C, Zhang M, Dong W, Quan B S, Liu W, Liu K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6284 (in Chinese) [乐孜纯, 张明, 董文, 全必胜, 刘魏, 刘恺 2010 物理学报 **59** 6284]
- [16] Yao Q J 1989 *Optical tutorial* (Second Edition) (Beijing: Higher Education Press) p210 (in Chinese) [姚启钧 1989 光学教程 (第二版) (北京: 高等教育出版社) 第210页]
- [17] Le Z C, Liang J Q 2003 *J. Opt. A: Pure & Appl. Opt.* **5** 374

Design and fabrication of cascaded X-ray planar parabolic compound refractive lens*

Fu Ming-Lei¹⁾²⁾ Le Zi-Chun^{1)2)†} Zhou Han-Qing¹⁾²⁾ Zhang Ming¹⁾²⁾ Quan Bi-Sheng¹⁾²⁾
Wang Hua³⁾ Mao Cheng-Wen³⁾ Wang Chang-Hui¹⁾²⁾ Shen Xiao-Yan¹⁾²⁾

1) (College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

2) (Institute of Optical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

3) (Shanghai Institute of Applied Physics, Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

(Received 2 April 2014; revised manuscript received 24 April 2014)

Abstract

Due to its attractive features such as compact size, simple to align and wide working range of photon energy, the X-ray compound refractive lens (CRL) has gradually become one of the standard accessories to focus the X-ray beams from the synchrotron radiation light source. In this paper, a cascaded planar parabolic CRL is designed and fabricated. The novel CRL is composed of type I and type II refractive elements in order to achieve a small spot size while maintaining the transmission. In type I refractive element, the parabolic geometry aperture (R_0) is large, while, in type II refractive element, the radius of curvature (R) at the parabolic vertex is small. So N_1 numbers of type I and N_2 numbers of type II refractive elements are cascaded to form a single-chip CRL. A cascaded X-ray planar parabolic CRL is constructed using PMMA material by means of LIGA techniques. The main structural parameters of type I refractive elements are: $N_1 = 15$, $R_1 = 200 \mu\text{m}$, $2R_{01} = 564 \mu\text{m}$. The main structural parameters of type II refractive elements are: $N_2 = 20$, $R_2 = 50 \mu\text{m}$, $2R_{02} = 140 \mu\text{m}$. The cascaded planar parabolic CRL is tested on the beam line whose original incident X-ray spot is $200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ at Shanghai synchrotron radiation facility. The measured lateral focusing spot size is $24.9 \mu\text{m}@8 \text{ keV}$, the transmission rate is 2.19% and the focal length is 1.052 m.

Keywords: compound refractive lenses, X-ray optics, parabolic lenses

PACS: 41.50.+h, 07.85.-m, 07.85.Tt

DOI: 10.7498/aps.63.194103

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20133317110006), the International Joint Research Program of China (Grant No. 2012DFR10510), and the User Project of Shanghai Synchrotron Radiation Facility, China (Grant No. 09sr0134).

† Corresponding author. E-mail: lzc@zjut.edu.cn