

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

级联式 X 射线组合折射透镜优化

周寒青, 付明磊, 乐孜纯*

(浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为了得到短焦距、高增益的 X 射线组合折射透镜(CRL),对 CRL 的结构参数进行了优化,提出一种用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料制作的由两个折射单元级联的新型抛物面型 X 射线组合折射透镜。推导了 CRL 的光学特性参数,数值分析了单一折射单元的组合折射透镜和级联式组合折射透镜的光学性能。结果显示:级联式 CRL 比相同几何孔径和曲率半径的单一折射单元 CRL 具有更小的焦距和更大的增益。所设计的 3 组透镜的焦距分别缩短了 33.3%、66.7% 和 40.5%,增益分别提高了 23.9%、60.9% 和 27.6%。新型的级联式组合折射透镜有望对一维 X 射线聚焦性能进行较好的调控,在微束 X 射线分析中具有较好的应用前景。

关键词:抛物面型透镜;级联式 X 射线透镜;组合折射透镜;光学性能

中图分类号:TH703 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Optimization of cascaded parabolic compound X-ray refractive lenses

ZHOU Han-qing, FU Ming-lei, LE Zi-chun*

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

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

Abstract: To get Compound X-ray Refractive Lenses(CRL) with a short focal length and high gain, the structure parameters of CRL were optimized. And a novel cascaded parabolic CRL made of poly methylmethacrylate (PMMA) was developed by two refractive structures. The main optical performance of cascaded parabolic CRL was derived. And optical properties of the CRL with single structure and the cascaded CRL with two structures were numerically analyzed. The results show that the cascaded CRL imposes a smaller focal length and a higher gain as compared with the CRL with single structure for the same geometric aperture and the radius of curvature. The focal lengths of the designed three cascaded CRLs are shortened by 33.3%, 66.7% and 40.5%, and the gains are increased by 23.9%, 60.9% and 27.6%, respectively. The cascaded CRL is expected to have the ability to adjust the focal performance of 1D X-ray beam and has a better application prospect in the micro beam X-ray analysis.

Key words: parabolic lens; cascade X-ray lens; compound refractive lens; optical properties

收稿日期:2015-06-16;修订日期:2015-07-08.

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(No. 2012DFR10510);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20133317110006)

1 引言

X 射线组合折射透镜是基于光线折射原理实现对入射 X 射线光束聚焦与成像的同步辐射光学元器件。它具有结构紧凑、易调节校准、对振动不敏感等优点,特别适合对光子能量范围为 10 ~ 100 keV 的硬 X 射线光束进行聚焦与光束整形。近年来,以欧洲同步辐射光源(ESRF)、德国电子同步加速器研究所(DESY)为代表的世界各大同步辐射技术研究中心都非常重视对 X 射线组合折射透镜的研究与应用。在 ESRF 和 DESY,作为核心光学元器件,X 射线组合折射透镜已经成功应用于 X 射线布拉格衍射显微镜^[1]、X 射线多镜头干涉仪^[2]、X 射线全视场显微镜等硬 X 射线无损检测与成像系统中^[3]。

1996 年,欧洲同步辐射光源的 A. Snigirev 等人开创性地设计了铝材料 X 射线组合折射透镜,并实现了对光子能量为 8 keV 的 X 射线光束聚焦^[4]。此后国内外科科研人员针对 X 射线组合折射透镜进行了接近 20 年的研究。在透镜材料方面,从最初的铝、硅和 PMMA,扩展到目前较流行的铍^[5-6]、单晶金刚石^[7-8]和 SU-8 负性胶^[9-10]等。在透镜的制作工艺方面,从最初的精密钻孔工艺、模压工艺,扩展到更精密的硅微细加工工艺^[7]、LIGA(或 UV-LIGA)工艺^[9-10]和激光切割工艺^[8]等。在透镜元器件结构方面,从最初的旋转对称型透镜、平面透镜,扩展到多种类型的 Kinoform 型透镜^[11-12]、折射薄片型透镜^[13]等。在国内,浙江工业大学乐孜纯教授团队、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所梁静秋研究员团队、同济大学王占山教授团队和中国科学院高能物理研究所盛伟繁研究员团队在 X 射线组合折射透镜的基础理论、新型元器件结构、元器件制作工艺和测试方法等方面均进行了深入的研究。

乐孜纯教授团队继与梁静秋研究员团队合作研发 PMMA 材料制作 X 射线组合透镜技术^[14]后,又对一维聚焦 X 射线组合折射透镜的调控性进行了较系统的研究,设计并制作了 PMMA 材料的级联式 X 射线组合折射透镜(Compound X-ray Refractive Lenses, CRL)^[15]。本文对透镜组数量、折射单元面型结构参数等可调参量对焦距、焦斑增益等聚焦性能的影响规律进行了更为深入地研

究。实验结果表明:与单一结构的透镜相比,级联式透镜能够在焦距、焦斑增益等主要聚焦性能指标上获得折中的结果。这说明了级联式透镜调控一维聚焦性能的可行性。

2 级联式平面抛物面型 CRL 理论分析

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 可以完成对入射 X 射线的一维聚焦。

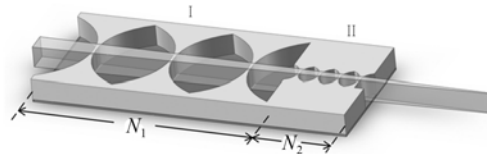


图 1 级联式平面抛物面型 CRL 的器件结构示意图
Fig. 1 Structure of cascaded parabolic CRL

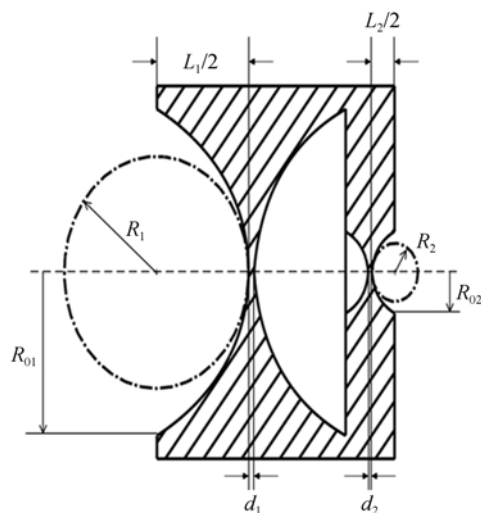


图 2 级联式平面抛物面型 CRL 的折射单元结构参数
Fig. 2 Profile parameters of refractive elements of cascaded parabolic Compound X-ray Refractive Lenses (CRL)

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 ,折射单元上抛物面的开口尺寸为 $2R_{01}$,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 ,折射单元上抛物面的开口尺寸为 $2R_{02}$,抛物面的深度为 $L_2/2$,折射单元中心的中壁厚度为 d_2 。

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) 的焦距为:

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

N_2 个折射单元 II 组成的组合折射透镜 II

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

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

2.4 级联式平面抛物面型 CRL 的增益

根据几何光学的成像特点,距离透镜 L 处尺寸为 b 的物体经焦距为 f 的透镜后的成像尺寸为:

$$h = b \frac{f}{L - f} \quad (6)$$

例如,某同步辐射源的 $b = 190 \mu\text{m}$, $L = 5 \text{ m}$, $f = 0.1 \text{ m}$,则 $h = 3.9 \mu\text{m}$ 。而根据衍射理论,孔径为 0.5 mm 的透镜对波长为 10 nm 的光波的衍射斑为 $0.2 \mu\text{m}$ 。因此,组合折射透镜的光斑大小主要由入射光斑尺寸及透镜的几何性质决定。组合折射透镜的增益定义为透镜焦斑处的光强跟不加透镜时在焦斑位置相同面积内光强的比值^[4],即:

$$G = T_p \frac{2R_{01}}{h} = 2T_p \frac{R_{01}(L - f)}{bf} \quad (7)$$

(CRL II) 的焦距为:

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

图 1 所示的级联式抛物面型 CRL 是 CRL I 和 CRL II 的组合。根据组合光具组的成像规律,可知级联式抛物面型 CRL 的焦距 f 满足:

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

将式(1)、(2)代入式(3)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

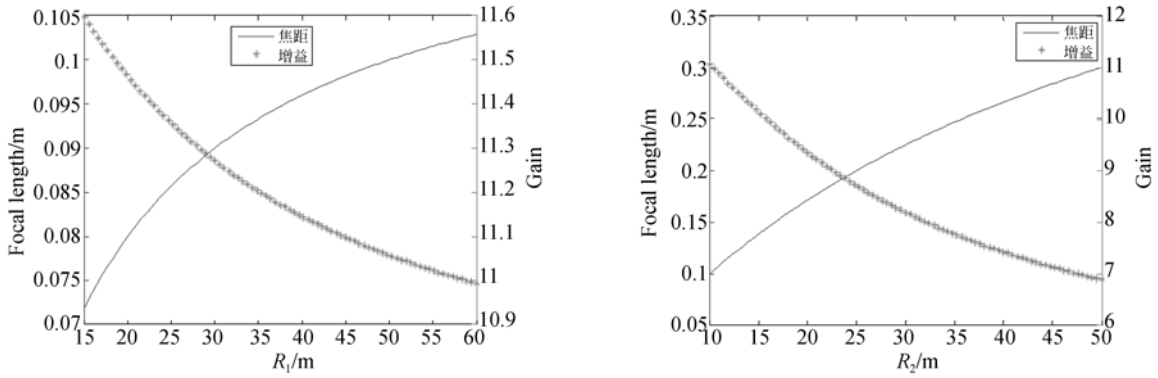
在图 2 所示的级联式抛物面型 CRL 中,以折射单元 I 为例,双凹折射单元的面型函数为 $y^2 = 2R_1 x$ 。在高度 y 处,折射单元的厚度函数为 $D(y) = d + y^2/R_1$ 。根据比尔-朗伯定律,CRL 的透过率为:

3 级联式平面抛物面型 CRL 的性能分析

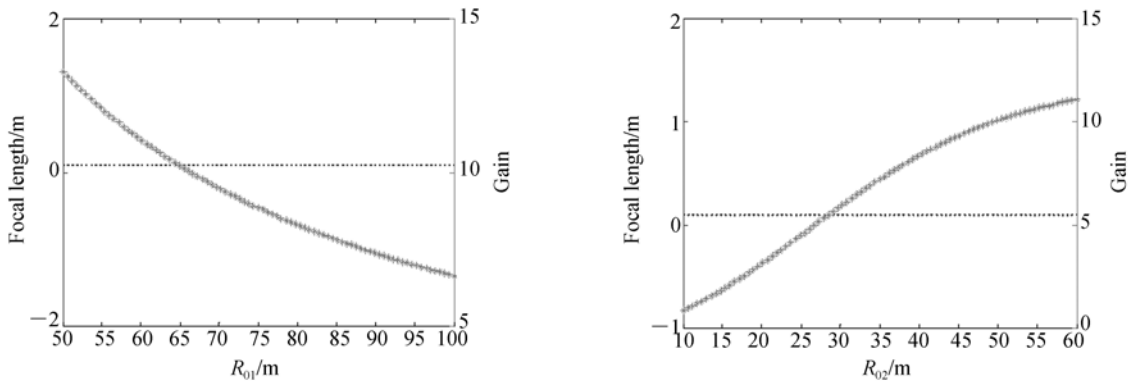
因为材料对 X 射线的折射较弱、透射较强,如果要保证透镜一定的聚焦效果和透过率,X 射线聚焦组合透镜的设计制作必须在现有的工艺条件下选择合适的材料和适当的结构。SU-8 胶、PMMA 等聚合物材料都是较好的高性能 X 射线组合折射透镜材料,它们对 X 射线的吸收较小,密度较大,还具有良好的力学性能、抗化学腐蚀性和热稳定性。能量为 8 keV 的 X 射线入射到 SU-8 材料的组合折射透镜,根据理论模型式(4)、(5)、(7),可以得到组合透镜的焦距、增益等光学性能跟组合透镜的参数关系,如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,随着折射单元曲率的增大,组合透镜的焦距增大,增益减小。因此,设计 CRL 时要根据实际需求在焦距和增益之间折中取值。从

图 3(b)中可以看出,组合透镜的焦距跟折射单元的开口无关,但组合透镜的增益随着折射单元 I 开口的增大而减小,随着折射单元 II 开口的增大而增大。因此,设计 CRL 时折射单元 I 的开口应该尽可能取小,而折射单元 II 的开口应该相对取

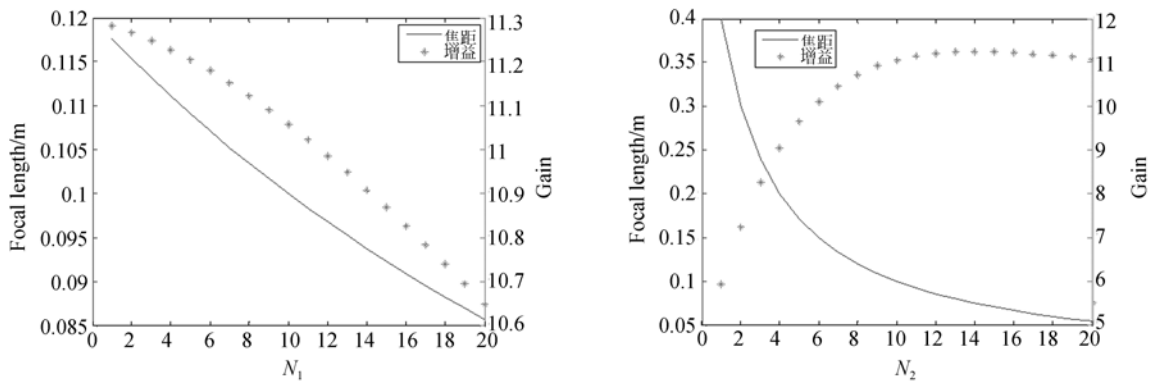
大一些。从图 3(c)可以看出,组合透镜的焦距随着组合透镜的单元数的增加而减小;增益随折射单元 I 数目的变大而减小,随折射单元 II 数目的变大先变大而后趋于平稳。因此,设计 CRL 时应优化两个折射单元的数目。



(a)级联式组合透镜焦距、增益随曲率半径的变化关系
(a)Variation of focal length and gain of cascaded parabolic CRL with curvature radius



(b)级联式组合透镜焦距、增益随开口大小的变化关系
(b)Variation of focal length and gain of cascaded parabolic CRL with opening size



(c)级联式组合透镜焦距、增益随折射单元数的变化关系
(c)Variation of focal length and gain of cascaded parabolic CRL with number of refractive units

图 3 级联式组合透镜的性能分析结果

Fig. 3 Performance analysis of cascaded parabolic CRL

表 1 单一结构 CRL 和级联式 CRL 的光学参数比较

Tab. 1 Comparison of optical performance of cascaded parabolic CRL with identical structure

组别 参数	组一		组二		组三	
	单一式	级联式	单一式	级联式	单一式	级联式
$R/\mu\text{m}$	20	$R_1 = 20$	50	$R_1 = 50$	70	$R_1 = 70$
$R_0/\mu\text{m}$	40	$R_2 = 10$	60	$R_2 = 10$	80	$R_2 = 30$
		$R_{01} = 40$		$R_{01} = 60$		$R_{01} = 80$
		$R_{02} = 40$		$R_{02} = 60$		$R_{02} = 80$
N	20	$N_1 = 10$	20	$N_1 = 10$	20	$N_1 = 10$
		$N_2 = 10$		$N_2 = 10$		$N_2 = 10$
$f(\text{m})$	0.12	0.08	0.30	0.10	0.42	0.25
$T_p/\%$	54.9	44.8	57.3	29.7	51.7	38.5
G	11.3	14.0	6.9	11.1	5.8	7.4

根据以上分析,这里设计了几组级联式 CRL,并把单一结构的 CRL 和级联式 CRL 的光学参数进行了比较,结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,级联式 CRL 比相同几何孔径和曲率半径的单一折射单元 CRL 具有更小的焦距和更大的增益,三组透镜中焦距分别缩短了 33.3%,66.7%,40.5%,增益分别提高了 23.9%,60.9%,27.6%。

4 结 论

本文系统分析了级联式 CRL 的光学性能,并设计了一种两个折射单元级联的 CRL。分析结果表明:级联式 CRL 比相同几何孔径和曲率半径的单一折射单元 CRL 具有更小的焦距和更大的增益,三组透镜中焦距分别缩短了 33.3%,66.7%,40.5%,增益分别提高了 23.9%,60.9%,27.6%。因此,级联式 CRL 比单一折射单元的 CRL 具有更好的增益,可以提高微束 X 射线分析系统的分辨率。

参考文献:

- [1] ROTH T, DETLEFS C, SNIGIREVA I, *et al.*. X-ray diffraction microscopy based on refractive optics[J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 33-38.
- [2] SNIGIREV A, SNIGIREVA I, LYUBOMIRSKIY M, *et al.*. X-ray multilens interferometer based on Si refractive lenses[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25842-25852.
- [3] MARSCHALL F, LAST A, SIMON M, *et al.*. X-ray full field microscopy at 30 keV [C]. *Proceedings of 22nd International Congress on X-Ray Optics and Microanalysis, Hambur: Journal of Physics*, 2014, 499(1): 012007.
- [4] SNIGIREV A, KOHN V, SNIGIREVA I, *et al.*. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays[J]. *Nature*, 1996, 384(6604): 49-51.
- [5] VAUGHAN G, WRIGHT J, BYTCHKOV A, *et al.*. X-ray transfocators: focusing devices based on compound refractive lenses [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(2): 125-133.
- [6] ZOZULYA A, BONDARENKO S, SCHAVKAN A, *et al.*. Microfocusing transfocator for 1D and 2D compound refractive lenses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18967-18976.
- [7] FOX O, ALIANELLI L, MALIK A, *et al.*. Nanofocusing optics for synchrotron radiation made from polycrystalline diamond [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7657-7668.
- [8] POLIKARPOV M, SNIGIREVA I, MORSE J, *et al.*. Large-acceptance diamond planar refractive lenses manufactured by laser cutting[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(1): 23-28.
- [9] NAZMOV V, SIMON R, REZNIKOVA E, *et al.*. Polymer refractive crossed long lens: a new optical component for nanoimaging and nanofocussing in the

- hard X-ray region [J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, 7: P07019.
- [10] NAZMOV V, MOHR J, VOGT H, *et al.*. Multi-field x-ray microscope based on array of refractive lenses[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(7): 075005.
- [11] NAZMOV V, MOHR J, SIMON R. Mosaic-like micropillar array for hard x-ray focusing-one-dimensional version[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(9): UNSP 095015.
- [12] LIAO K, HONG Y, SHENG W. Optimized short kinoform lenses for hard X-ray nano-focusing [J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 53-60.
- [13] SEIBOTH F, SCHOLZ M, PATOMMEL J, *et al.*. Hard x-ray nanofocusing by refractive lenses of constant thickness [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(13): 131110.
- [14] 梁静秋,乐孜纯. PMMA 材料制作 X 射线组合透镜技术研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 60-64.
- LIANG J Q, LE Z CH. Fabrication of PMMA compound X-ray lenses[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Suppl.): 60-64. (in Chinese)
- [15] 付明磊,乐孜纯,周寒青,等. 级联式平面抛物面型 X 射线组合折射透镜的设计与制作[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 194103.
- FU M L, LE Z CH, ZHOU H Q, *et al.*. Design and fabrication of cascaded X-ray planar parabolic compound refractive lens [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(19): 194103. (in Chinese)

作者简介:



周寒青(1979-),女,浙江金华人,硕士,讲师,2001年、2004年于西南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail:zhhq@zjut.edu.cn

通讯作者:



乐孜纯(1965-),女,浙江杭州人,博士,教授,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,1997年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail:lzc@zjut.edu.cn



付明磊(1981-),男,天津蓟县人,博士,副教授,硕士生导师,2004年、2007年、2010年于浙江工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail:fuml@zjut.edu.cn