

制作工艺误差对 X 射线组合折射透镜 聚焦性能影响研究^{*}

乐孜纯[†] 张 明 董 文 全必胜 刘 魏 刘 恺

(浙江工业大学理学院应用物理系, 杭州 310032)

(2009 年 11 月 24 日收到; 2009 年 12 月 10 日收到修改稿)

本文主要介绍对 X 射线组合折射透镜的制作工艺误差对其聚焦性能影响的研究结果. 首先给出采用深度 X 射线光刻技术制作的 PMMA 材料圆柱面型 X 组合折射透镜的工艺测试结果, 得出制作工艺误差值, 定性分析制作工艺误差对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响. 然后根据实际的制作工艺误差建模, 给出详尽的理论分析和定量的理论模拟结果. 最后在北京同步辐射装置 (BSRF) 上, 构建基于 PMMA 材料的圆柱面型 X 射线组合折射透镜的微束聚焦实验系统, 实际测试了有明显工艺误差和尽量消除工艺误差的两种 X 射线组合折射透镜的聚焦性能, 给出实测结果并对实测结果进行分析和讨论.

关键词: X 射线组合折射透镜, 制作工艺误差, X 射线聚焦性能, 同步辐射

PACC: 4278C, 4285, 4278F, 2920L

1. 引 言

硬 X 射线所具有的高光子能量 (即短波长) 的特性, 使得它具有很高的分辨能力. 因此基于 X 射线的微分析和微探针技术在物理学、化学、材料科学、生命科学等领域得到了广泛应用, 而 X 射线光学器件则是 X 射线分析和探测技术长足发展的关键.

X 射线组合折射透镜是一种基于折射效应的新型 X 射线光学器件, 由 Snigirev^[1] 在 1996 年提出并研制成功. 与其他 X 射线光学器件 (比如掠入射 X 射线全反射镜^[2]、透射式 X 射线波带片^[3]、X 射线多层膜反射镜^[4]、X 射线 Bragg-Fresnel 元件^[5]、X 射线光导管器件^[6,7] 等等) 相比, X 射线组合折射透镜具有不需要折转光路、高温稳定性好且易冷却、结构简单紧凑、特别适用于高光子能量的硬 X 射线波段等优点. 近年来, 国外对基于 X 射线组合折射透镜的各种硬 X 射线分析和探测系统的研究非常活跃. 比如硬 X 射线成像和光刻实验系统^[8], 测量样品中元素分布状态的硬 X 射线荧光微层析实验系统^[9], 中子显微镜^[10], 以及用于单细胞检测、化学微

分析、早期胸部肿瘤检测等的硬 X 射线实验系统^[11,12], 均获得了亚微米至纳米量级的分辨率. 可见, X 射线组合折射透镜已经在超高分辨率 X 射线分析和探测领域显示出了非常好的应用前景. 我们也在国家自然科学基金的资助下, 开展了 X 射线组合折射透镜的设计理论、制作技术和基于 X 射线组合折射透镜的微束聚焦实验系统的研究^[13-15].

X 射线组合折射透镜是一种由排列在同一条直线上的多片折射单元所构成的微结构器件, 在我们的研究中采用以 LIGA (深度 X 射线光刻、微电铸、微塑铸) 技术为主体的三维微制造技术来制作, 与传统的精密机械加工技术相比, 加工精度更高并可制作形状更加复杂的器件. 然而, 即便如此仍会在制作过程中引入多种工艺误差, 比如器件表面的粗糙度、选择性刻蚀不足引起的折射单元形状的微小改变, 以及过度刻蚀引起的折射单元中心刻透等问题. 在对 X 射线组合折射透镜的微束聚焦性能的实验研究中, 发现制作工艺误差对 X 射线组合折射透镜的聚焦性能有非常明显的影响, 本文主要介绍作者对 X 射线组合折射透镜的制作工艺误差对其聚焦性能影响的研究结果. 首先给出我们实际制作的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材料圆柱面型 X 射线

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60672014) 和浙江省自然科学基金杰出青年团队项目 (批准号: R107377) 资助的课题.

[†] E-mail: lzc@zjut.edu.cn

组合折射透镜的参数和工艺测试结果,从工艺测试结果可得出制作工艺误差值,并定性地分析制作工艺误差对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响. 然后根据实际的制作工艺误差建模,给出详尽的理论分析和定量的理论模拟结果. 最后在北京同步辐射装置(BSRF)形貌站(4W1A),实际构建基于 PMMA 材料的圆柱面型 X 射线组合折射透镜的微束聚焦实验系统. 并利用该实验系统实际测试了有明显工艺误差和尽量消除工艺误差的 2 个 X 射线组合折射透镜的聚焦性能,给出了实测结果并对实测结果进行了分析和讨论.

2. X 射线组合折射透镜的制作工艺误差

X 射线组合折射透镜是一种由排列在同一条直线上的多片折射单元所构成的微结构器件. 通常采用低原子序数材料来制作以减小 X 射线辐射吸收,制作 X 射线组合折射透镜较常用的材料主要有铝(Al)、硅(Si)、铍(Be)等,以及一些 X 射线光学常数适合的有机材料,如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料. 为了使 X 射线组合折射透镜的分辨率更高(即焦斑尺寸更小),以及使其焦距缩小到可以接受的尺度,X 射线组合折射透镜的折射单元个数要尽可能多. 与此同时,为了确保 X 射线组合折射透镜在折射单元个数较多的情况下,仍具有可以接受的强度增益,折射单元中心厚度要尽可能小. 表 1 给出了针对能量 8 keV 的 X 射线辐射(即工作波长约 0.15 nm),计算得出的几种常用材料的 X 射线辐射吸收情况. 从表 1 中可以看出,对于 Al 和 Si 材料,当 X 射线在材料中穿行上百微米,辐射吸收就已经超过 80%;而对于铍(Be)材料和 PMMA、聚酰亚胺(Polyimide)两种有机材料,X 射线也仅可以在材料中穿行数千微米. 因此,折射单元中心厚度要尽可能小,综合考虑实际制作的可行性,需控制在 5 μm 以下. 这就使得制作的 X 射线组合折射透镜要有大于 30:1 的深宽比,给实际制作带来了很大的困难.

表 1 几种常用 X 射线组合折射透镜材料的辐射吸收计算结果

透射率/%	Al/ μm	Si/ μm	Be/ μm	PMMA/ μm	Polyimide/ μm
80	17	15.5	1329	336	269
60	40	35	3042	768	615
40	71	64	5456	1378	1104
20	125	112	9584	2421	1938
5	233	209	17838	4506	3608

在实际制作中,我们采用以 LIGA 技术为主体的三维微制造技术,与传统的精密机械加工技术相比,以 LIGA 技术为主体的三维微制造技术加工精度更高并可制作更加复杂的器件形状. 然而,即便如此仍会在制作过程中引入多种工艺误差,比如器件表面的粗糙度、选择性刻蚀不足引起的折射单元形状的微小改变,以及过度刻蚀引起的折射单元中心刻透等问题.

制作过程中引入的器件表面的粗糙度,对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响主要体现在降低了 X 射线组合折射透镜的强度增益,因此会使得组合透镜实际所能包含的折射单元的个数要比理论值少很多、并进而影响其聚焦效率. 而制作过程中由于选择性刻蚀不足所引起的折射单元形状的微小改变(比如圆柱面有很小的锥度或者呈鼓形),则会增加 X 射线组合折射透镜的像差,不过由于 X 射线组合折射透镜的有效口径很小,所以对其聚焦性能的影响不大. 此外,由于我们制作的 X 射线组合折射透镜的深宽比一般都大于 30:1,其折射单元的中心部分会因为过度刻蚀产生局部刻透的现象. 而这种制作工艺误差,经我们实验观察,对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响非常显著. 因此本文将深入分析过度刻蚀造成折射单元中心刻透所引入的结构尺寸和形状的误差,以及它对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响. 下面首先简要介绍 X 射线组合折射透镜的制作和工艺测试结果.

我们实际制作了两种 PMMA 材料的圆柱面型 X 射线组合折射透镜,包括 40 个相同的、顺序排布的平凹折射单元,折射单元的圆柱面半径为 200 μm ,为了减小 X 射线辐射吸收,折射单元的中心厚度分别设计为 10 μm 和趋近于零(指制版所能达到的最小尺寸). 折射单元中心厚度为 10 μm 的 X 射线组合折射透镜的长度约为 8.4 mm、折射单元中心厚度趋近于为零的 X 射线组合折射透镜的长度约为 8 mm,两种组合透镜的理论焦距相同、约为 1.3 m. 由于选择 PMMA 作为 X 射线组合折射透镜材料,制作过程大大简化,可采用 LIGA 技术的第一个步骤(即深度 X 射线光刻)一次加工成型. 在实际制作中,首先用准 LIGA 技术制作满足 X 射线组合折射透镜结构参数的金材料厚吸收体 X 射线光刻掩模,金材料厚度大于 10 μm ,具体制作过程参见文献[16]. 之后利用该厚吸收体 X 射线光刻掩模,在北京同步辐射装置(BSRF)光刻站(3B1A),采用接近

式光刻方法,经过 X 射线光刻、显影后制成 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜,制成的组合透镜的 SEM 照片如图 1 所示.

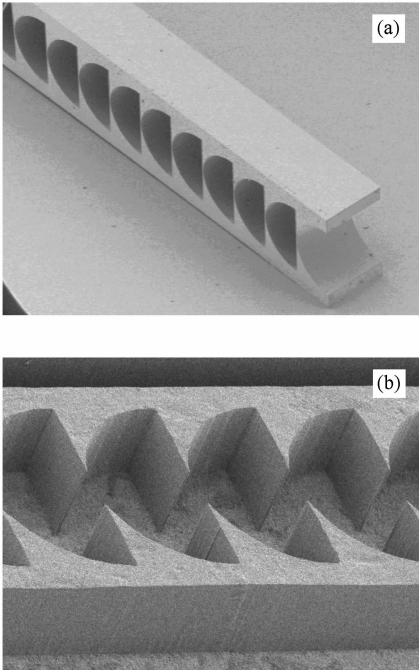


图 1 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜的 SEM 照片
(a) 折射单元中心厚度 10 μm; (b) 折射单元中心厚度趋近于零

从图 1(a) 给出的 X 射线组合折射透镜的 SEM 测试结果可以测得折射单元实际中心厚度小于 5 μm, 因此制作过程中存在过度刻蚀现象, 只是在图 1(a) 所示的 SEM 图中未见折射单元中心全部刻透或明显局部刻透现象. 而图 1(b) 给出的 X 射线组合折射透镜的 SEM 测试结果则显示, 制作过程中存在的过度刻蚀现象已导致 X 射线组合折射透镜的中心全部刻透, 留下了约 70 μm 的通孔. 因此实际制成的 X 射线组合折射透镜的结构已与理论设计结果有所不同, 必然进而影响其光学性能, 下一节将针对这种制作工艺误差以及图 1(b) 给出工艺测试结果进行理论建模和分析.

3. 制作工艺误差的理论建模和分析

由于 X 射线组合折射透镜中折射单元的中心

厚度要求在微米量级, 且器件的深宽比大于 30:1, 在用 LIGA 技术制作 X 射线组合折射透镜的过程中, 很容易因过度刻蚀使得制成的 X 射线组合折射透镜的中心部位局部或全部刻透变为通孔. 下面从衍射理论出发, 推导存在通孔时, X 射线组合折射透镜焦点处的光强分布, 并给出模拟计算结果.

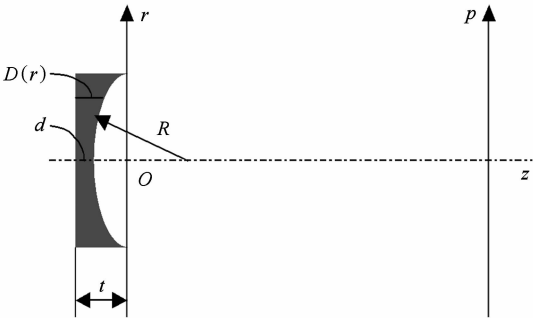


图 2 X 射线组合折射透镜中单个折射单元的聚焦原理图

图 2 所示为圆柱面型 X 射线组合透镜的平凹折射单元, 其中 R 为凹面的半径, t 和 d 分别为折射单元边缘和中心厚度, $D(r)$ 为折射单元有效口径内任意点处材料的厚度函数. 一般来说, 组合透镜的厚度尺寸远小于其焦距, 因此可将折射单元 (及组合透镜) 看作一个衍射屏. 根据 X 射线波段辐射与物质相互作用的特点, 综合考虑 X 射线折射效应和吸收效应的共同作用得出衍射屏函数 $H(r) = A(r) \cdot \tau(r)$, 其中 $\tau(r)$ 和 $A(r)$ 分别为透射系数和吸收系数, 表示为^[14]

$$\begin{aligned} A(r) &= \exp\left[-\frac{4\pi\beta}{\lambda}D(r)\right] \\ &= \exp\left[-\frac{4\pi\beta d}{\lambda}\right]\exp\left[-\frac{2\pi\beta r^2}{\lambda R}\right], \quad (1) \\ \tau(r) &= \exp[i\Phi(r)] \\ &= \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(t - \delta d)\right]\exp\left[-i\frac{\pi\delta r^2}{\lambda R}\right]. \quad (2) \end{aligned}$$

因此 X 射线组合折射透镜的衍射屏函数表示为 $H^N(r) = \{A(r) \cdot \tau(r)\}^N$, 其中 N 为 X 射线组合折射透镜中折射单元的个数. 当因制作误差存在而使得组合透镜中心变为通孔时, X 射线组合折射透镜的衍射屏函数变为

$$H^N(r) = r_0 r_0 \begin{cases} C^N \cdot \exp\left(-\frac{2\pi\beta N}{\lambda R}r^2\right)\exp\left(-j\frac{\pi\delta N}{\lambda R}r^2\right), & r_0 < r < +\infty, \\ \exp\left(jN\frac{2\pi}{\lambda}t\right), & 0 < r < r_0, \end{cases} \quad (3)$$

其中复常数 $C = \exp\left(-\frac{4\pi\beta d}{\lambda}\right)\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(t - \delta d)\right]$ ，利用衍射理论中的基尔霍夫积分公式，在菲涅耳近似

条件下，当一束平面单色辐射射向 X 射线组合折射透镜时，像面 ρ 点的复振幅可被表示为

$$\begin{aligned} U(\rho) &= 2\pi\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\rho^2}{2z}\right)\int_0^\infty H^N(r)\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{r^2}{2z}\right)J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}r\rho\right)rdr \\ &= 2\pi\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\rho^2}{2z}\right)\left\{\int_0^{r_0}\exp\left(jN\frac{2\pi}{\lambda}t\right)\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{r^2}{2z}\right)J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}r\rho\right)rdr\right. \\ &\quad \left.+\int_{r_0}^\infty\exp\left(-\frac{4\pi\beta}{\lambda}dN\right)\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}N(t - \delta d)\right]\exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda R}Nr^2\right)\right. \\ &\quad \left.\times\exp\left[\frac{\pi r^2}{\lambda}\left(\frac{1}{z} - \frac{\delta N}{R}\right)\right]J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}r\rho\right)rdr\right\}. \end{aligned} \tag{4}$$

因为折射单元中心厚度 $d = 0$ ，薄透镜近似下 X 射线组合折射透镜的焦距 $f = R/N\delta$ ，故在焦平面上，其复振幅分布为

$$\begin{aligned} U(\rho) &= 2\pi\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\rho^2}{2z}\right)\exp\left(jN\frac{2\pi}{\lambda}t\right) \\ &\quad \times\left\{\int_0^{r_0}\exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{r^2}{2z}\right)J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}r\rho\right)rdr\right. \\ &\quad \left.+\int_{r_0}^\infty\exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda R}Nr^2\right)J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}r\rho\right)rdr\right\}. \end{aligned} \tag{5}$$

根据(5)式，X 射线组合折射透镜在焦平面的光强分布可由 $I = UU^*$ 求得。采用数值计算方法对有制作工艺误差存在时，X 射线组合折射透镜在焦平面的光强分布进行模拟计算。针对上一节中实际制作的 X 射线组合折射透镜的结构参数和工作条件，得到焦平面处强度分布曲线，如图 3 所示。

图 3 给出 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜在焦平面处的光强分布，其工作条件和主要技术参数为：工作波长 0.15 nm，40 个平凹折射单元，折射单元半径 200 μm。图中三条曲线分别对应无工艺误差、过度刻蚀形成 50 μm 通孔以及过度刻蚀形成 70 μm 通孔分别对应的强度分布曲线。可以看出，当制作工艺误差严重、在 X 射线组合折射透镜中心形成通孔时，在相当的强度增益下，焦斑尺寸变大，即聚焦性能变差。

4. 制作工艺误差对聚焦性能影响的实验研究

为了实际测试圆柱面型 X 射线组合折射透镜

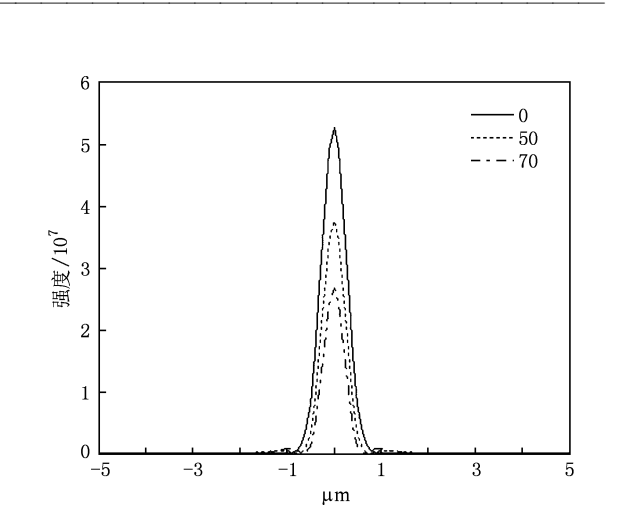


图 3 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜在焦平面处的光强分布（三条曲线分别对应无工艺误差、过度刻蚀形成 50 μm 通孔以及 70 μm 通孔的情况）

的聚焦性能，在北京同步辐射装置（BSRF）形貌站（4W1A），构建了基于 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜的微束聚焦实验系统（如图 4 所示）。该 X 射线微束聚焦系统主要由同步辐射高能 X 射线源、双晶单色器、PMMA 材料抛物面型 X 射线组合透镜、以及记录焦斑的 X 射线 CCD（像素尺寸 11 μm）组成。宽带 X 射线束经过双晶单色器单色化后，输出能量为 8 keV 的单色 X 射线。利用精密三维可调节光学平台，将双晶单色器、X 射线组合折射透镜和 X 射线 CCD 调整为一个共轴光学系统，X 射线 CCD 可用步进电机控制沿光轴移动。8 keV 的单色 X 射线经过 X 射线组合折射透镜聚焦，X 射线 CCD 记录聚焦焦斑。

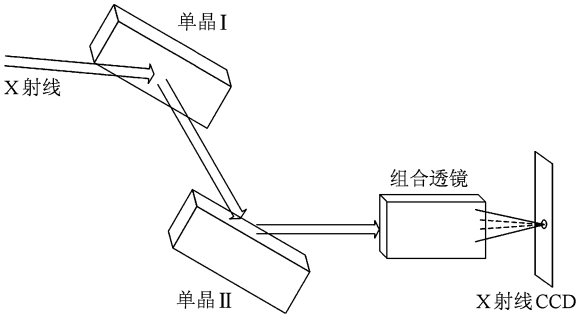


图 4 X 射线微束聚焦实验系统简图

利用上述 X 射线微束聚焦系统,对实际制作的两种 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜的聚焦性能分别进行了实验研究.对于图 1(a)所示的制作工艺误差只改变组合透镜中心厚度尺寸、而未在中心部位形成通孔的 X 射线组合折射透镜,X 射线 CCD 在距组合透镜后端面 1.25 m 处记录到如图 5(a)所示的焦斑.实验时储存环电子能量为 2.4 GeV,束流强度 50—70 mA,单色 X 射线能量 8 keV,曝光时间 5 s.根据图 5(a)所示的实测结果,画出了焦斑强度分布曲线,如图 5(b)所示.根据 X 射线 CCD 的像素尺寸,得到聚焦焦斑尺寸约 7 μm .

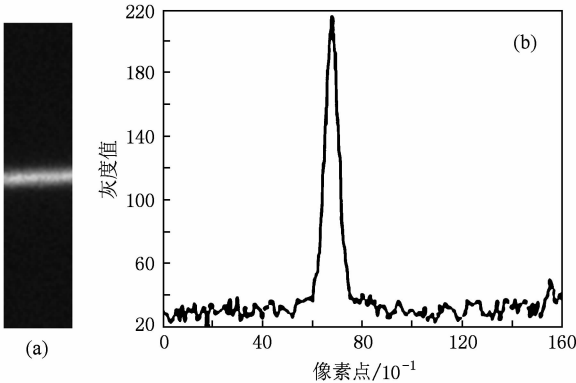


图 5 (a)在像距为 1.25 m 处记录得到的聚焦图像,组合透镜中心无通孔;(b)焦斑强度分布曲线

利用同样的测量方法,对图 1(b)所示的制作工艺误差严重、在中心部位形成通孔的 PMMA 材料圆柱面型 X 射线组合折射透镜的聚焦性能进行测试,实验时储存环电子能量为 2.2 GeV,束流强度 50—70 mA,单色 X 射线能量 8 keV. X 射线 CCD 在距组

合透镜后端面 1.25 m 处记录到如图 6(a)所示的焦斑,曝光时间 4.5 s.根据图 6(a)所示的实测结果,画出了如图 6(b)所示的焦斑强度分布曲线.根据 X 射线 CCD 的像素尺寸,得到聚焦焦斑尺寸约 14 μm .

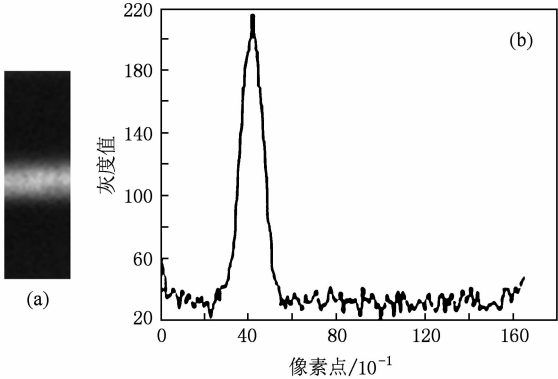


图 6 (a)在像距为 1.25 m 处记录得到的聚焦图像,组合透镜中心存在 70 μm 通孔;(b)焦斑强度分布曲线

从图 5 和图 6 所示的实验结果可以明显看出,图 5 显示的聚焦效果要好得多,也获得了更小的焦斑尺寸.由此可以看出,制作过程中因过度刻蚀使得组合透镜中折射单元中心刻透所引入的工艺误差,对 X 射线组合折射透镜聚焦性能的影响非常显著.因此在制作过程中通过控制刻蚀技术参数来抑制过度刻蚀非常重要,同时在器件设计过程中根据实测工艺参数对设计参数进行修正,对保证 X 射线组合折射透镜具有良好的聚焦性能也非常重要.

5. 结 论

针对制作工艺误差对 X 射线组合折射透镜的理论和实验研究表明:制作过程中的过度刻蚀现象,会使得 X 射线组合折射透镜的结构尺寸、特别是折射单元的中心厚度尺寸改变,当这种制作工艺误差严重时,会因折射单元中心刻透而在组合透镜的中心形成通孔,并因此对 X 射线组合折射透镜聚焦性能产生显著影响.因此改进工艺来抑制制作过程中的严重工艺误差,以及对组合透镜的结构参数进行优化设计,对保证 X 射线组合折射透镜具有良好的聚焦性能,并推进其实际应用非常重要.

[1] Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, Lengeler B 1996 *Nature* **384** 49
[2] Aoki S, Ogata T, Sudo S, Onuki T 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 3477

[3]

Beaz A 1961 *J. Opt. Soc. Am.* **51** 405

[4]

Huang W, Li Y, Gu Y, Zhang J, You Y, ChunYu S, He Y, Lei A, Chen Z, Ma Y, Jin C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 809 (in Chinese)[黄文忠、李英骏、谷渝秋、张 杰、尤永禄、淳于书泰、何颖玲、雷安乐、陈正林、马月英、金春水 2003 物理学报 **52** 809]

[5]

Le Z, Pan S 1999 *Opt. Commun.* **159** 285

[6]

Kumakhov M, Komarov F 1990 *Phys. Rep.* **191** 289

[7]

Chen B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1933 (in Chinese)[陈宝振 2000 物理学报 **49** 1933]

[8]

Schroer C, Benner B, Gunzler T, Kuhlmann M, Zimprich C, Lengeler B, Rau C, Weitkamp T, Snigirev A, Snigireva I, Applenzler J 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 1640

[9]

Schroer C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1912

[10]

Beguiristain H, Anderson I, Dewhurst C, Piestrup M, Cremer J, Pantell R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4290

[11]

Bohic S, Simionovici A, Snigirev A, Ortega R, Devès G, Heymann D, Schroer C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3544

[12]

Drakopoulos N, Zegenhagen J, Snigrev A, Snigireva I, Hauser M, Eberl K, Aristov V, Shabelnikov L, Yunkin V 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2279

[13]

Zhu Y, Liang J, Liang Z, Huang X, Le Z, Yi F, Hou F, Huang W, Dong W, Wang W, Wang Z, Cui N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1526 (in Chinese)[朱燕青、梁静秋、梁中翥、黄鑫华、乐孜纯、伊福廷、侯凤杰、黄万霞、董 文、王维彪、王志立、崔乃迪 2009 物理学报 **58** 1526]

[14]

Le Z and Liang J 2003 *J. Opt. A: Pure & Appl. Opt.* **5** 374

[15]

Le Z, Liang J, Dong W, Zhu P, Peng L, Wang W, Huang W, Yuan Q, Wang J 2007 *Chin. Phys.* **16** 984

[16]

Liang J, Le Z 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 60 (in Chinese)[梁静秋、乐孜纯 2005 光学精密工程 **13** 60]

Study on the focusing performance of the compound X-ray refractive lenses with fabrication errors^{*}

Le Zi-Chun[†] Zhang Ming Dong Wen Quan Bi-Sheng Liu Wei Liu Kai
(Department of Applied Physics, College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)
(Received 24 November 2009; revised manuscript received 10 December 2009)

Abstract

The compound X-ray refractive lens is a kind of optical components for X-rays focusing and imaging. This paper reports the authors’ research on focusing performance of the compound X-ray refractive lens with fabrication errors. Firstly SEM measurements of the semi-cylindrical PMMA compound X-ray refractive lens fabricated by means of deep X-ray lithography are performed, and accordingly the fabrication errors are measured. Then the theoretical analysis and simulations are done for the focusing performance of the compound X-ray refractive lens with the fabrication errors. Finally, X-ray microbeam experimental system is built on the 4W1A beamline of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) for measuring the focusing performance of the semi-cylindrical PMMA X-ray refractive lenses we fabricated. And the focusing performances of the semi-cylindrical PMMA compound X-ray refractive lenses with and without distinct fabrication errors are measured and analyzed under 8 keV monochromatic X-rays.

Keywords: compound X-ray refractive lens, fabrication error, X-ray focusing, synchrotron radiation
PACC: 4278C, 4285, 4278F, 2920L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60672014) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China for Distinguished Young Scholars (Grant No. R107377).
[†] E-mail: lzc@zjut.edu.cn