

# 抛物面型 X 射线组合折射透镜聚焦性能的理论实验研究\*

乐孜纯<sup>1)†</sup> 董 文<sup>1)</sup> 刘 魏<sup>1)</sup> 张 明<sup>1)</sup> 梁静秋<sup>2)</sup> 全必胜<sup>1)</sup> 刘 恺<sup>1)</sup>  
梁中翥<sup>2)</sup> 朱佩平<sup>3)</sup> 伊福廷<sup>3)</sup> 黄万霞<sup>3)</sup>

1) (浙江工业大学理学院, 杭州 310032)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2009 年 6 月 9 日收到; 2009 年 7 月 14 日收到修改稿)

结合衍射理论和矩阵光学方法得出抛物面型 X 射线组合折射透镜的光学性能指标(包括其焦距的严格表达式、薄透镜近似的判定准则、透过率和有效孔径,以及极限聚焦光斑尺寸等). 采用 X 射线深度光刻技术实际制作了 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜并给出了工艺测试结果. 最后在北京同步辐射装置(BSRF)上,实际构建了基于 3 种不同结构参数的 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜的微束聚焦实验系统. 并实际测试了其聚焦性能,均获得了良好的聚焦效果,给出实测结果并对实测结果进行了分析和讨论.

**关键词:** X 射线光学, X 射线组合折射透镜, X 射线聚焦性能, 同步辐射

**PACC:** 6180C, 4278C, 4278F, 2920L

## 1. 引 言

与可见光相比 X 射线的波长很短,因此理论上具有很高的分辨能力. 自 X 射线发现以来,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. 随着 X 射线科学与技术的长足发展,进一步提高 X 射线微探针技术的分辨能力和微区分析能力已成为应用领域的迫切需求. 高分辨率 X 射线微探针技术不仅需要性能优异的光源,而且需要能对光束传输进行控制的高性能 X 射线光学器件. 近年来,大辐射通量、高亮度、高准直性的第三代同步辐射光源在国内外都取得了长足进展<sup>[1,2]</sup>,我国上海同步辐射光源也已基本建成并投入使用,光源的问题基本得到解决. 相应地,科学界与工业界对应用于高能 X 射线波段(光子能量大于 5 keV)的 X 射线光学器件的需求越来越迫切.

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 等<sup>[3]</sup>在 1996 年提出并研制成功,之后国际上关于 X 射线组合折射透镜的设计理论、制作技术和实验系统的报道相继出现<sup>[4-11]</sup>. 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与制作技术的研究<sup>[12-14]</sup>. X 射线组合折射透镜由排列在同一直线上的多片折射单元所构成,使焦距减小至可接受的范围;并采用低原子序数材料来制作以减小 X 射线吸收. 折射单元的面型一般采用球面或者抛物面,因为抛物面型 X 射线组合折射透镜可以消球差,所以具有更好的成像性能,能产生更小的聚焦焦斑.

本文主要介绍作者对抛物面型 X 射线组合折射透镜聚焦性能的理论实验研究结果. 首先结合衍射理论和矩阵光学方法得出抛物面型 X 射线组合折射透镜的光学性能指标(包括组合透镜焦距的严格表达式、组合透镜薄透镜近似的判定准则、组

\* 国家自然科学基金(批准号:60672014),浙江省自然科学基金杰出青年团队项目(批准号:R107377)和北京正负电子对撞机国家实验室(批准号:SR-06056)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lzc@zjut.edu.cn

合透镜的透过率和有效孔径,以及组合透镜的极限聚焦光斑尺寸等),并给出性能模拟计算结果. 其次给出我们实际制作的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料抛物面型 X 射线组合折射透镜的参数和工艺测试结果. 最后介绍我们在北京同步辐射装置(BSRF)的形貌站(4W1A),实际构建的基于 PMMA 材料的抛物面型 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 3 种不同结构参数的 PMMA 材料抛物面型 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. 理论分析

### 2.1. 组合透镜的焦距

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  $\beta$  代表吸收. 抛物面型 X 射线组合折射透镜由  $N$  个完全相同的折射单元组成(如图 1 所示),每个折射单元均是双凹透镜,其面型为抛物面,抛物面顶点处的曲

率半径为  $R$ , 折射单元上抛物面开口尺寸为  $R_0$ , 抛物面的深度为  $L/2$ , 折射单元中心和边缘厚度分别为  $d$  和  $t$ .

考察光线从起始面  $P_1$  传播至参考面  $P_3$  的变换矩阵  $T$ . 单个折射单元的变换矩阵为  $L = L_1 R_2 D R_1 L_1$ ,  $L_1$  代表光线从单个折射单元开口处传播至抛物面型折射面的传输矩阵,  $R_1$  和  $R_2$  分别代表第一和第二个折射面的折射矩阵,  $D$  代表两个折射面间的传输矩阵. 由矩阵光学<sup>[15]</sup>可知

$$\begin{aligned} L_1 &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\delta}{(1-\delta)R} & \frac{1}{1-\delta} \end{pmatrix}, \\ D &= \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\delta}{R} & 1-\delta \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

经计算,单个折射单元的变换矩阵  $L$  可以表示为

$$L = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{R} \cdot \delta - \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} + \frac{L}{2R} \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{\delta^2}{1-\delta} & L + \frac{d}{1-\delta} \left( 1 - \frac{L}{R} \cdot \delta \right) - \frac{\delta L^2}{4R} \left( 2 - \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} \right) \\ -\frac{\delta}{R} \left( 2 - \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} \right) & 1 - \frac{L}{R} \cdot \delta - \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} + \frac{L}{2R} \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{\delta^2}{1-\delta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据西尔维斯特(Sylveste)定理<sup>[16]</sup>,有

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N \\ &= \begin{pmatrix} AU_{N-1}(q) - U_{N-2}(q) & BU_{N-1}(q) \\ CU_{N-1}(q) & DU_{N-1}(q) - U_{N-2}(q) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$q = 1/2(A + D),$$

$$U_m(x) = \frac{\sin[(m+1)\arccos x]}{\sqrt{1-x^2}}$$

为第二类切比雪夫多项式. 因此,光线从  $P_1$  面传播至参考面  $P_3$  的总的变换矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

令  $T_{11} = 0$ , 解得以  $P_3$  面为起点计算的抛物面型 X 射线组合折射透镜的焦距的精确表达式

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{C} \left[ \frac{U_{N-2}(q)}{U_{N-1}(q)} - A \right] \\ &= \frac{R}{\delta \left( 2 - \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} \right)} \times \left[ \frac{U_N(q)}{U_{N-1}(q)} - 1 \right. \\ &\quad \left. + \frac{L}{R} \cdot \delta + \frac{\delta}{1-\delta} \cdot \frac{d}{R} - \frac{L}{2R} \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{\delta^2}{1-\delta} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

由于  $\delta \ll 1, d \ll R$ , 因此有  $q \approx 1 - \frac{L}{R} \cdot \delta$ , 进而得到

$$U_N(q) \approx \sin \left[ (N+1) \sqrt{\frac{2L}{R} \cdot \delta} \right] / \sqrt{\frac{2L}{R} \cdot \delta}. \quad (6)$$

当  $(N+1) \sqrt{\frac{2L}{R} \cdot \delta} \ll 1$  时,得到薄透镜近似下

的抛物面型 X 射线组合折射透镜的焦距公式  $f = \frac{R}{2N\delta}$ 。因此  $N \ll N_{\max} = \sqrt{\frac{R}{2L\delta}}$  可作为 X 射线组合折射透镜能否应用薄透镜近似的判定条件。

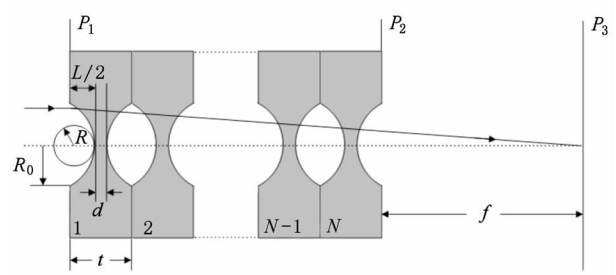


图 1 抛物面型 X 射线组合折射透镜的结构简图

2.2. 组合透镜极限聚焦焦斑

如图 1 所示抛物面型 X 射线组合折射透镜中双凹折射单元的面型函数为  $y^2 = 2Rx$ 。在高度  $y$  处，折射单元的厚度函数为  $D(y) = d + y^2/R$ 。将该折射单元看做一衍射屏，综合考虑折射和吸收作用，可以得到整个抛物面型 X 射线组合折射透镜的衍射屏函数<sup>[11]</sup>，即

$$H_N(y) = [\tau(y)A(y)]^N \\ = C \exp\left(-\frac{4\pi\beta Ny^2}{\lambda R}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi\delta Ny^2}{\lambda R}\right), \quad (7)$$

其中  $\tau(y)$  是代表折射的位相变换系数， $A(y)$  为代表吸收的衰减系数，

$$C = \exp\left(-\frac{4\pi\beta dN}{\lambda}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}(t - \delta d)N\right).$$

X 射线组合折射透镜关于光轴具有旋转对称性，当一束单位振幅的单色平面波照射在该组合透镜上时，根据基尔霍夫标量衍射理论，像空间的复振幅分布为

$$U(r,z) = C \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta Ny^2}{\lambda R}\right) \\ \times \exp\left[i\frac{\pi y^2}{\lambda}\left(\frac{1}{z} - \frac{2\delta N}{R}\right)\right] J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z}yr\right) y dy, \quad (8)$$

其中  $J_0(x)$  为零阶贝塞尔函数， $z$  为像距， $r$  为像面处横向极坐标。则焦点处的光强分布为

$$I(r) = I(0) \exp\left(-\frac{2\pi N \delta^2}{\lambda R \beta} r^2\right). \quad (9)$$

可见，在焦点处光强的横向分布为高斯分布，用半高全宽来表征焦斑的大小，经计算，焦斑大小

$\Delta r$  为

$$\Delta r = \sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}} \sqrt{\frac{\lambda R}{N}} \sqrt{\frac{\beta}{\delta}} \approx 0.66 \sqrt{\frac{\lambda R}{N}} \sqrt{\frac{\beta}{\delta}}. \quad (10)$$

同时，抛物面型 X 射线组合折射透镜聚焦束的放大倍数  $M$  可由开口半径  $R_0$  与焦斑尺寸  $\Delta r$  求得，即  $M = 2R_0/\Delta r$ 。

由 (10) 式可知，对于给定材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜，当入射光波长一定时 ( $\delta, \beta$  一定)，其焦斑大小  $\Delta r \sim \sqrt{R}$ ， $\Delta r \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$ ，即选择较小的

曲率半径  $R$ 、较大的折射单元个数  $N$  可减小其聚焦焦斑，但曲率半径  $R$  减小会增加工艺制作难度，折射单元个数  $N$  增大则会增加组合透镜的吸收损耗，因此，应综合考虑选择各个结构参数，使组合透镜具有良好的整体聚焦性能。

2.3. 组合透镜的透过率和有效口径

抛物面型 X 射线组合折射透镜透过率  $T_p$  的具体表达式，可以通过对透过率函数在透镜开口平面上积分来求得。根据图 1 所标注的结构参数，有

$$T_p = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_0} \exp\left[-\mu N\left(\frac{y^2}{R} + d\right)\right] y dy}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{R_0} y dy} \\ = \frac{1 - \exp(-a)}{a} \exp(-\mu Nd), \quad (11)$$

式中  $\mu = \frac{4\pi\beta}{\lambda}$ ，为材料的线吸收系数， $a = \frac{\mu N R_0^2}{R} =$

$$\frac{\mu R_0^2}{2\delta f} = \frac{2\pi\beta R_0^2}{\lambda \delta f}.$$

从 (11) 式可以看出，透过率随  $a$  的减小而增大。减小折射单元中心厚度  $d$  可增大透过率，在实际制作时，折射单元中心厚度  $d$  往往取满足制作工艺限制条件下的尽量小的值。对于给定的焦距  $f$  和给定的波长  $\lambda$ ，透过率随比值  $\beta/\delta$  和开口半径  $R_0$  的减小而增大。因此，采用低原子序数的单质材料和一些光学常数适合的有机材料来制作 X 射线组合折射透镜更合适，且开口也适当小一些。又由于  $\mu \propto \lambda^3$ ，因此随着光子能量增高，工作波长减小，线吸收系数  $\mu$  将减小，透过率  $T_p$  将增大。

在可见光波段，一般不考虑透镜材料的吸收作用。因此对普通透镜来说，其有效口径就是其本身的几何口径。但在 X 射线波段，透镜材料对 X 射线有较强的吸收，特别是透镜边缘，吸收作用更强，这就使得透镜的有效口径一般小于透镜的几何口径。

将整个开口平面上的透过率函数归一化到中心透过率,所得到的等效平面的口径大小  $D_{\text{eff}}$  即为有效口径:

$$D_{\text{eff}} = 2R_0 \sqrt{\frac{1 - \exp(-a)}{a}}$$
$$= 2 \sqrt{\frac{R}{\mu N}} \sqrt{1 - \exp(-a)}. \quad (12)$$

当抛物面型 X 射线组合折射透镜作为成像元件应用时,由于衍射极限的原因,有效孔径的大小限制了其极限分辨率的大小. 而当 X 射线组合折射透镜作为聚焦器件使用时,有效孔径的大小限制了其极限聚焦焦斑尺寸.

3. 数值计算

根据上面的理论分析,比较不同材料光学常数的折射系数和吸收系数,显示低原子序数材料比较适合于制作 X 射线组合折射透镜,特别是当 X 射线辐射能量高于 5 keV 时. 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. 这里我们选取 Al, Si, Be, PMMA 四种材料,针对不同的光子能量  $E$ , 计算了焦距、极限焦斑大小、透过率和有效口径等光学性能指标,具体计算结果见表 1,其中 X 射线组合折射透镜的结构参数统一取为  $R = 200\ \mu\text{m}$ ,  $R_0 = 282\ \mu\text{m}$ ,  $d = 0$ .

从表 1 可以看出相对于 Al 和 Si 材料,Be 材料 X 射线组合折射透镜有更好的聚焦性能,是单质中比较理想的 X 射线组合折射透镜材料. 同时从表 1 中还可以看出,有机材料 PMMA 制作 X 射线组合折射透镜也能获得良好的聚焦性能. 综合考虑 X 射线组合折射透镜的制作技术,我们实际制作了 PMMA 材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜,因为 PMMA 材料 X 射线组合折射透镜不仅在理论上比较好的聚焦性能,同时其制作工艺也相对简单,采用深度 X 射线光刻即可直接制作 PMMA 材料 X 射线组合折射透镜,并且可以获得较大的器件深宽比,进而增加 X 射线组合折射透镜在纵深方向的聚光口径.

表 1 抛物面型 X 射线组合透镜的光学性能计算结果

材料	$E/\text{keV}$	$N_{\text{max}}$	$N$	$f/\text{m}$	$\Delta r/\mu\text{m}$	$T_{\text{p}}/\%$	$D_{\text{eff}}/\mu\text{m}$
Al	9.53	204	16	1.04	1.20	2.2	84
	15.49	333	44	1.01	0.62	3.0	98
Be	9.53	258	26	1.03	0.17	65.8	457
	15.49	419	70	1.01	0.08	75.9	493
Si	9.53	216	18	1.03	1.35	1.7	74
	15.49	351	49	1.01	0.71	2.3	85
PMMA	9.53	294	34	1.02	0.40	19.3	248
	15.49	478	91	1.01	0.19	29.4	307

对我们实际制作的 3 种 PMMA 材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜,计算了其在实测 X 射线能量条件(8 keV)下的聚焦性能(包括焦距、焦斑尺寸、透过率和有效口径),如表 2 所示. 为了更清晰地了解 X 射线组合折射透镜焦点处光强的横向

分布,以 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜为例,给出了其归一化横向光强分布随曲率半径  $R$  的变化曲线(如图 2 所示),以及归一化横向光强分布随折射单元个数  $N$  的变化曲线(如图 3 所示).

表 2 几种不同结构的 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜的光学性能

$R/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$N$	$R_0/\mu\text{m}$	$N_{\text{max}}$	$f/\text{m}$	$\Delta r/\mu\text{m}$	$M$	$T_{\text{p}}/\%$	$D_{\text{eff}}/\mu\text{m}$
200	15	84	282	254	0.30	0.30	1880	1.9	117
50	15	101	70	254	0.07	0.14	1000	5.8	53
50	8	162	70	254	0.04	0.11	1273	3.7	42

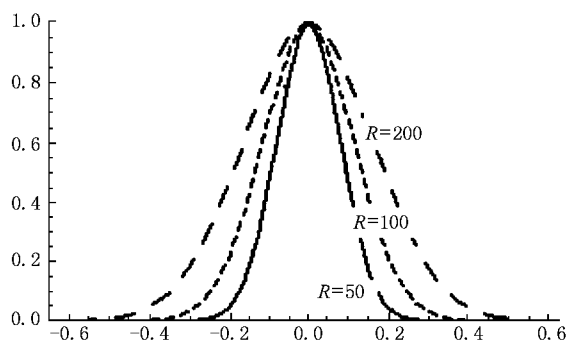


图2 横向强度分布随曲率半径  $R$  的变化曲线

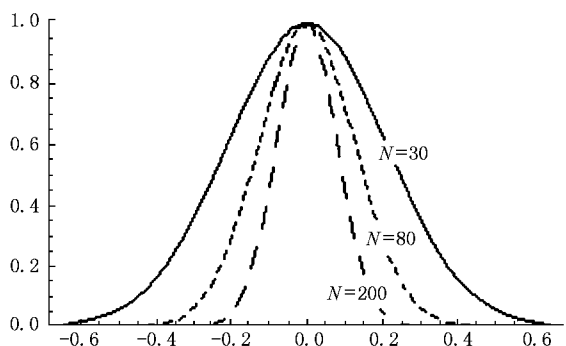


图3 横向强度分布随折射单元个数  $N$  的变化曲线

4. 实 验

为了实际测试抛物面型 X 射线组合折射透镜的聚焦性能,我们在北京同步辐射装置(BSRF)形貌站(4W1A),构建了基于 PMMA 材料抛物面型 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  $11\text{ }\mu\text{m}$ )组成.宽带 X 射线束经过双晶单色器单色化后,输出能量为  $8\text{ keV}$  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.  $8\text{ keV}$  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.

利用上述 X 射线微束聚焦系统,我们对下列 3 种具有不同结构参数的抛物面型 X 射线组合折射透镜的聚焦性能进行了实验研究,3 种抛物面型 X

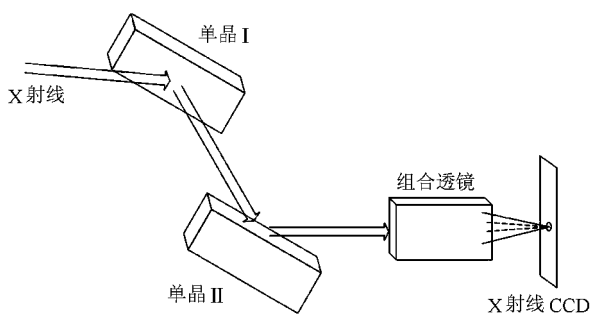


图4 X 射线微束聚焦实验系统简图

射线组合折射透镜的材料均为 PMMA.第 1 个抛物面型 X 射线组合折射透镜(以下称组合透镜 A)的结构参数为 84 个折射单元,抛物面顶点处的曲率半径  $R$  为  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,折射单元中心厚度为  $15\text{ }\mu\text{m}$ ,组合透镜长度约  $35\text{ mm}$ 、宽度  $1\text{ mm}$ 、厚度  $0.3\text{ mm}$ .第 2 个抛物面型 X 射线组合折射透镜(以下称组合透镜 B)的结构参数为 101 个折射单元,抛物面顶点处的曲率半径  $R$  为  $50\text{ }\mu\text{m}$ ,折射单元中心厚度为  $15\text{ }\mu\text{m}$ ,组合透镜长度约  $11.7\text{ mm}$ 、宽度  $0.5\text{ mm}$ 、厚度  $0.2\text{ mm}$ .第 3 个抛物面型 X 射线组合折射透镜(以下称组合透镜 C)的结构参数为 162 个折射单元,抛物面顶点处的曲率半径  $R$  为  $50\text{ }\mu\text{m}$ ,折射单元中心厚度为  $8\text{ }\mu\text{m}$ ,组合透镜长度约  $17.5\text{ mm}$ 、宽度  $0.5\text{ mm}$ 、厚度  $0.2\text{ mm}$ .

PMMA 材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜采用深度 X 射线光刻技术制作完成.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  $10\text{ }\mu\text{m}$ .之后利用该厚吸收体 X 射线光刻掩模,采用接近式光刻方法,经过 X 射线光刻、显影后制成 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜.图 5 给出了上述第 1 个抛物面型 X 射线组合折射透镜,即组合透镜 A 的扫描电镜照片.

通过构建 X 射线微束聚焦系统,对上述 3 个 PMMA 材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜的聚焦性能进行实验研究.实验时储存环电子能量为  $2.4\text{ GeV}$ ,束流强度  $50\text{--}70\text{ mA}$ ,单色 X 射线能量  $8\text{ keV}$ .3 个 PMMA 材料的抛物面型 X 射线组合折射透镜聚焦性能的实测结果均显示了非常明显的聚焦效果,下面给出实测的焦斑图像以及对其进行图像处理后的焦斑光强分布曲线.

对第 1 个 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜(即组合透镜 A)构成的 X 射线微束聚焦实

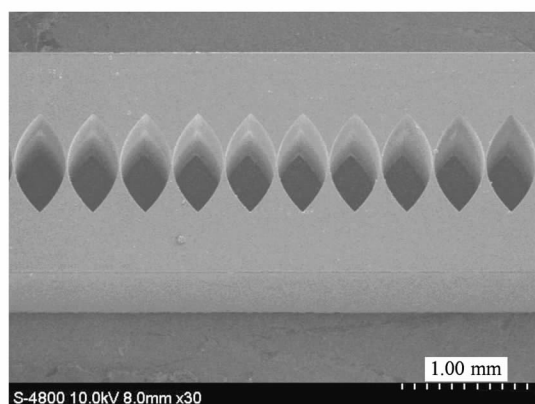


图5 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜的扫描电镜照片

验系统, X 射线 CCD 在距组合透镜后端面 32 cm 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, 我们画出了焦斑强度分布曲线, 如图 6(b) 所示. 根据 X 射线 CCD 的像素尺寸, 得到聚焦焦斑尺寸约 11  $\mu\text{m}$ .

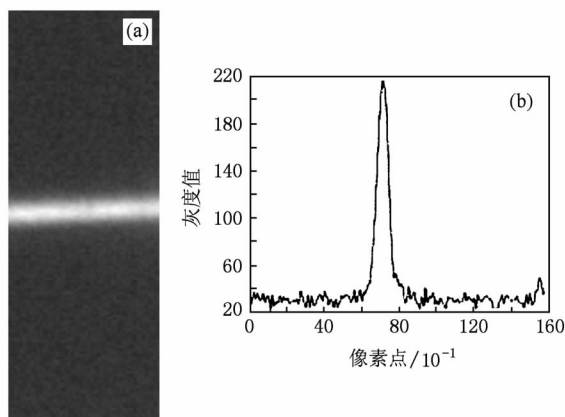


图6 (a) 针对组合透镜 A, 在像距为 32 cm 处记录得到的聚焦图像; (b) 焦斑强度分布曲线

利用同样的测量方法, 得到了组合透镜 B 和组合透镜 C 的聚焦性能测试结果, 分别示于图 7 和图 8. 图 7 所示为组合透镜 B 的焦斑实测图和焦斑强度分布曲线, X 射线 CCD 的记录距离 (实测焦距) 7.5 cm, 曝光时间 6.5 s. 图 8 所示为组合透镜 C 的焦斑实测图和焦斑强度分布曲线, X 射线 CCD 的记录距离 (实测焦距) 5 cm, 曝光时间 5 s. 根据 X 射线 CCD 的像素尺寸, 得到组合透镜 B 的聚焦焦斑尺寸约 5.5  $\mu\text{m}$ , 组合透镜 C 的聚焦焦斑尺寸约 3.3  $\mu\text{m}$ .

从图 6、图 7 和图 8 所示的实验结果可以明显看出, 我们实际制作的 3 种 PMMA 材料抛物面型 X

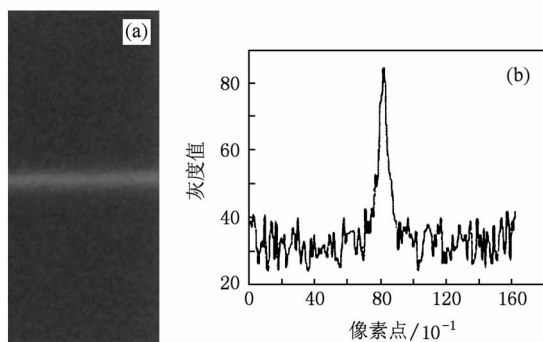


图7 (a) 针对组合透镜 B, 在像距为 7.5 cm 处记录得到的聚焦图像; (b) 焦斑强度分布曲线

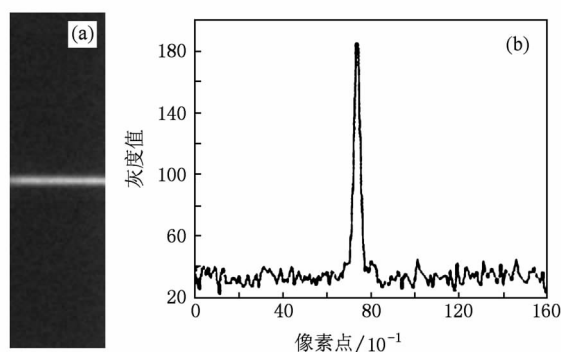


图8 (a) 针对组合透镜 C, 在像距为 5 cm 处记录得到的聚焦图像; (b) 焦斑强度分布曲线

射线组合折射透镜显示了良好的聚焦效果. 由于在实验中用来记录 X 射线组合折射透镜聚焦焦斑的 X 射线 CCD 的像素尺寸为 11  $\mu\text{m}$ , 无法精确分辨尺寸小于其像素尺寸的像. 我们设计的 3 种 X 射线组合折射透镜焦斑的理论值在微米—亚微米量级, 而目前尚无亚微米分辨率的 X 射线 CCD, 因此虽然我们得到了 3 种 X 射线组合折射透镜的聚焦焦斑尺寸的实测结果, 但也只是目前实验条件下的初步结果. 尽管如此, 上述 3 种抛物面型 X 射线组合折射透镜的实测结果无疑显示了非常明显的聚焦效果, 并且以组合透镜 C 的聚焦性能最佳, 这与理论设计结果是吻合的.

## 5. 结 论

对抛物面型 X 射线组合折射透镜的理论研究表明, 它比球面 X 射线组合折射透镜具有更好的聚焦性能和成像特性, 能够产生微米—亚微米尺度光斑, 特别适用于构建基于第三代同步辐射光源的高

分辨率 X 射线微分析和微诊断系统. 对论文作者设计和制作的 3 种不同结构参数的 PMMA 材料抛物面型 X 射线组合折射透镜聚焦性能的实验研究,均

获得了非常明显的聚焦效果. 为抛物面型 X 射线组合折射透镜在 X 射线微分析和微诊断技术领域的应用提供了有力的技术基础.

[1] Hu C, Li H, Zhang L, Wang X, Luo S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2424 (in Chinese) [胡春红、李辉、张璐、王雪艳、罗述谦 2009 物理学报 **58** 2424]

[2] Xie H, Hu F, Luo H, Du G, Deng B, Chen R, Xue Y, Shi S, Xiao T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7044 (in Chinese) [谢红兰、胡雯、罗红心、杜国浩、邓彪、陈荣昌、薛艳玲、师绍猛、肖体乔 2008 物理学报 **57** 7044]

[3] Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, Lengeler B 1996 *Nature* **384** 49

[4] Protopopov V, Valiev K 1998 *Opt. Commun.* **151** 297

[5] Kohn V 2002 *JETP Letters* **76** 600

[6] Nohammer B, David C, Rothuizen H, Hoszowska J, Simionovici A 2003 *Microelectronic Engineering* **67** 453

[7] Lengeler B, Schroer C, Richwin M, Tümmler J, Drakopoulos M, Snigirev A, Snigireva I 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3924

[8] Wang C, Pan X, Urisu T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6163 (in Chinese) [王长顺、潘煦、Urisu T 2006 物理学报 **55** 6163]

[9] Arms D, Dufresne E, Clarke R, Dierker S, Pereira N, Foster D 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 1492

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

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

[12] Le Z, Zhao X, Liang J, Sun Y, Liu K, Zhang M, Guo S, Quan B 2005 *Chinese Optics Letters* **3** 618

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

[14] 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]

[15] Gerrard A, Burch J 1975 *Introduction to Matrix Methods in Optics* (London: Wiley) p28

[16] Abramowitz M, Stegun I 1964 *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables* (New York: Dover Publications) p289

# Theoretical and experimental results of focusing performance for the parabolic compound X-ray refractive lenses<sup>\*</sup>

Le Zi-Chun<sup>1)†</sup> Dong Wen<sup>1)</sup> Liu Wei<sup>1)</sup> Zhang Ming<sup>1)</sup> Liang Jing-Qiu<sup>2)</sup> Quan Bi-Sheng<sup>1)</sup>

Liu Kai<sup>1)</sup> Liang Zhong-Zhu<sup>2)</sup> Zhu Pei-Ping<sup>3)</sup> Yi Fu-Ting<sup>3)</sup> Huang Wan-Xia<sup>3)</sup>

1) (College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

2) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

3) (Institute of High-Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 9 June 2009; revised manuscript received 14 July 2009)

## Abstract

The parabolic compound X-ray refractive lenses are a kind of novel optical components, especially suitable for hard X-rays. Due to their parabolic profiles they are free of spherical aberration and are proper devices for sub-micrometer focusing and imaging. The focusing performance of the parabolic compound X-ray refractive lenses is studied theoretically and experimentally in this paper. Firstly, the derivation of the exact focal length formula using matrix optics method and a criterion of the thin lens approximation are described. And the intensity distribution near focus, limiting focal spot size, effective aperture and transmittance are deduced based on the diffraction theory. Several parabolic compound X-ray refractive lenses with PMMA material were fabricated by means of deep X-ray lithography. Then the X-ray microbeam experimental system was built on the 4W1A beamline of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) based on the parabolic compound X-ray refractive lenses we fabricated. The focusing performances of three PMMA parabolic compound X-ray refractive lenses were measured and analyzed under 8 keV monochromatic X-rays. According to the experimental results, it is concluded that the PMMA parabolic compound X-ray refractive lenses promises good hard X-ray focusing performance.

**Keywords:** X-ray optics, compound X-ray refractive lens, X-ray focusing, synchrotron radiation

**PACC:** 6180C, 4278C, 4278F, 2920L

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60672014), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China for Distinguished Young Scholars (Grant No. R107377), and BEPC National Laboratory (Grant No. SR-06056).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lzc@zjut.edu.cn