

背面曝光技术制作沙漏状 X 射线组合折射透镜^{*}

朱艳青^{1 2)} 梁静秋^{1 并} 梁中翥¹⁾ 黄鑫华^{1 2)} 乐孜纯³⁾ 伊福廷⁴⁾
侯凤杰⁴⁾ 黄万霞⁴⁾ 董 文³⁾ 王维彪¹⁾ 王志立⁴⁾ 崔乃迪^{1 2)}

1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3 浙江工业大学, 杭州 310032)

4 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2008 年 4 月 21 日收到, 2008 年 8 月 4 日收到修改稿)

在分析沙漏状 X 射线组合折射透镜(X-ray compound refractive lens, XCRL)的折射聚焦理论的基础上, 设计并利用背面曝光技术制作了 SU-8 材料的沙漏状 XCRL, 该技术在保证图形准确性的同时减少了工艺步骤, 使制作更加简便易行. 在 10 keV 单色 X 射线辐射下, 对制作的透镜进行了聚焦性能的实验测试, 结果表明, 所制作的透镜较好地实现了一维聚焦.

关键词: 组合折射透镜, 背面曝光, 沙漏状, SU-8

PACC: 2920L, 6180C

1. 引言

X 射线组合折射透镜(X-ray compound refractive lens, XCRL)是一种利用折射理论来实现聚焦的 X 射线光学元件^[1-5], 它是由 Snigirev 在 1996 年提出并研制成功的^[6]. 近年来, XCRL 的发展十分迅速, 主要体现在材料的选择和透镜的结构上^[7]. 在材料的选择方面, 密度大而原子序数小的材料比较适合作为透镜材料, 如 Li, B, Si, C, Al 以及 SU-8 胶, 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 环氧树脂, 聚酰亚胺(PI)等聚合物材料. 其中, SU-8 胶具有较好的力学性能、抗化学腐蚀性和热稳定性, 并且在近紫外范围内光吸收度低, 所以整个光刻胶层所获得的曝光量均匀一致, 可得到具有垂直侧壁和高深宽比的厚膜图形, 是一种较理想的 XCRL 材料. 在透镜的结构上, 为了消除球差、减小吸收、增大透镜的增益和透镜的孔径等问题, 人们提出了几种透镜结构. 如最常见的抛物线结构^[8], 虽然消除了圆柱状结构存在的球差, 但是其吸收大的问题仍然没有解决; Kinoform 透镜^[9]去除了引起多余 2π 位相变化的材料, 减少了吸收, 但是它

的实现受制作工艺的限制; Pérénnès 等人提出了沙漏状透镜结构^[10]并由 X 射线曝光技术进行器件制作. 这种透镜是由一系列相同的棱镜单元堆积而成的, 它与 Kinoform 透镜同样具有吸收较低的优点, 并且在制作工艺上更容易实现. X 射线曝光方法具有高精度、高深宽比的突出优点, 但同时也存在工艺步骤较复杂及需要同步辐射光源而使用不便的问题. 本文选用 SU-8 胶作为透镜材料, 采用沙漏状透镜结构, 在分析沙漏状 XCRL 的折射聚焦理论的基础上, 设计并利用背面曝光技术制作了该透镜, 这种工艺方法具有工艺步骤较少, 设备使用方便等优点, 避免了因同步辐射光源少, 使用不便等问题^[11]. 本文最后对制作的沙漏状 XCRL 进行了聚焦性能的测试.

2. 沙漏状 XCRL 的聚焦理论及参数设计

由一系列相同的棱镜单元堆积而成的沙漏状 XCRL 结构如图 1 所示, 该结构去除了引起多于 2π 相位变化的材料(图 1 中白色部分), 从而降低了材料对 X 射线的吸收.

为分析整个结构对 X 射线的聚焦特性, 首先分

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60672014)北京正负电子对撞机国家实验室用户项目资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

析单个小棱镜单元的折射情况 ,如图 2 所示.

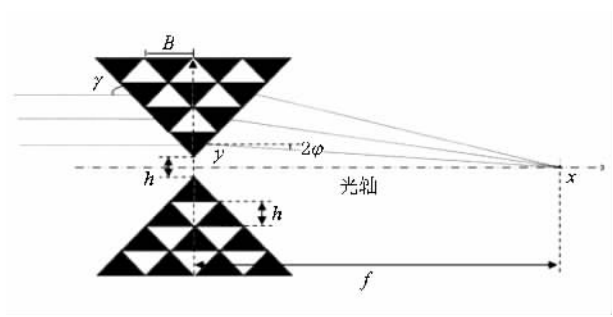


图 1 沙漏状 XCRL 的折射原理

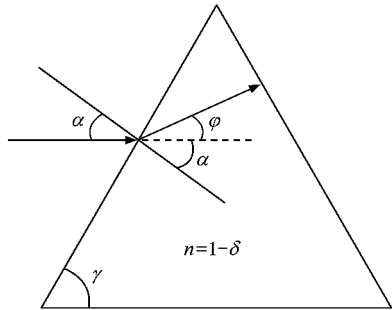


图 2 单个小棱镜折射示意图

在 X 射线波段 ,材料的折射系数可以表示为 $n = 1 - \delta + i\beta$,其中 , δ 和 β 分别代表折射和吸收. δ 值非常小 ,通常介于 10^{-5} 至 10^{-7} 之间 ,这就使得光线通过透镜的偏折非常小.当平行于光轴的平行光以 $\pi/2 - \gamma$ 角(γ 为小三角形的底角)入射到一个小棱镜后会发生一个小角度 $\varphi^{[12]}$ 的偏折 ,

$$\varphi = - \chi (n - 1) \tan(\gamma) = 2\delta / \tan(\gamma). \quad (1)$$

当 X 射线通过 j 个相同的棱镜中心后 ,偏折角为 $j\varphi$,所有通过棱镜中心的光线聚焦到光轴上的同一点 ,如图 1 所示 ,其中 γ 为入射角的余角和小三角形的底角 , h 为小棱镜的高度和两对称小棱镜间的距离 ,小棱镜的底边 $B = 2h / \tan \gamma$,透镜的焦距^[10]

$$f = h / \varphi = h \tan(\gamma) / 2\delta. \quad (2)$$

在光的传播方向上 ,为了减小变形 ,透镜引入 X 射线的等相位面概念 ,在任何不连续材料的波阵面中 ,相位延迟应为 2π 的整数倍.这样可以得到单个棱镜的高度为

$$h = m\lambda \tan(\gamma) (2\delta), \quad (3)$$

从而焦距变为

$$f = m\lambda \tan^2(\gamma) (4\delta^2), \quad (4)$$

其中 , m 为整数 , λ 为入射光的波长.可以看出 , h 值和焦距均取决于整数 m 和入射角两个自由变量 ,而

这些参数需要根据实际制作的工艺条件进行调整和设定.经分析可知 ,竖直方向上透镜孔径为

$$D = (2N + 1)h, \quad (5)$$

其中 , N 为透镜所包含小棱镜的排数.水平方向上的透镜孔径取决于棱镜的深度.

在聚焦光学中 ,衡量聚焦性能的一个主要参数就是透镜的强度增益. X 射线通过透镜的增益 G 定义为在像平面处 ,有透镜时和没有透镜时光束强度的比值 ,即

$$G = \frac{I_{\text{lens}}}{I}, \quad (6)$$

其中 , I_{lens} 为有透镜时像平面的光束强度 , I 为没有透镜时像平面的光束强度.对于一维的聚焦透镜来说 ,其透镜的增益可以表示为

$$G = D/d \cdot (1 + u/v) \cdot T, \quad (7)$$

其中 , D 为透镜孔径 , d 为 X 射线源的尺寸 , u 为透镜距 X 射线源的距离 , v 为聚焦光斑距透镜的距离 , T 为透镜的平均透率.

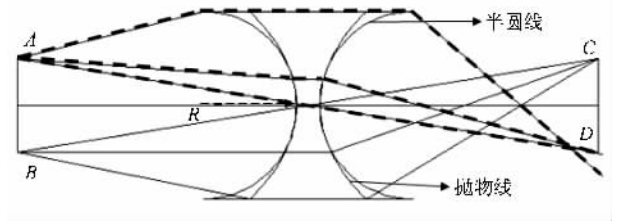


图 3 球面透镜与抛物面透镜的点聚焦示意图

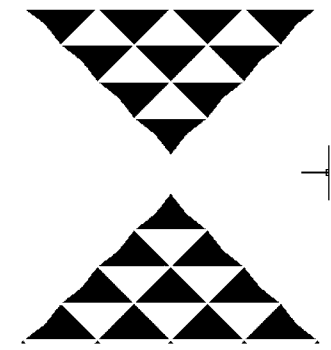


图 4 引入抛物线修正的沙漏状 XCRL

在设计透镜时 ,考虑到聚焦性能 ,引入了抛物线修正消除了球差.图 3 所示为球面透镜和抛物面透镜的点聚焦示意图.从点光源发出的 X 射线进入到球面透镜时(虚线) ,有一些光线会比抛物面透镜多经过一部分额外的材料 ,那么这些光线的波前会比其他的波前传播得更快 ,使得光线会聚到像平面前的多个点上 ,从而在像平面上形成弥散斑 ,产生球

差,而点光源经过抛物面透镜后可会聚到像平面上一点(实线),从而可消除球差.

图 4 所示为本文所设计的引入抛物线修正的沙漏状 XCRL,根据上面的分析计算,具体的设计参数为 $\gamma = 45^\circ$, $m = 1$, $h = 18\text{ }\mu\text{m}$, $B = 36\text{ }\mu\text{m}$, $N = 71$.

3. 背面曝光技术制作沙漏状 XCRL

本文首先制作了如图 4 所示的引入抛物线修正的沙漏状 XCRL 的掩膜版,然后采用背面曝光技术^[13]制作沙漏状 XCRL.具体的制作工艺如图 5 所示.

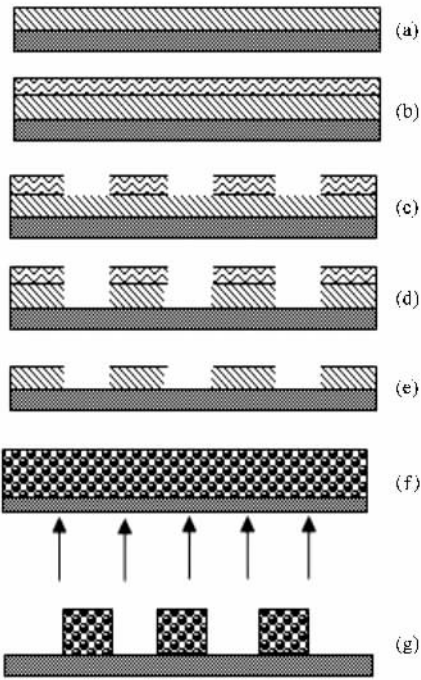


图 5 工艺流程示意图 (a)溅射康铜薄膜 (b)旋涂 BP212 光刻胶并前烘 (c)曝光、显影 (d)湿法腐蚀 (e)去除光刻胶 (f)旋涂 SU-8 光刻胶并进行紫外背面曝光 (g)显影得到透镜结构

图 5(a)在已经清洗好的玻璃衬底上溅射一层厚度约为 300 nm 的康铜薄膜 (b)在康铜薄膜上涂敷一层 BP212 正性光刻胶,并进行前烘 (c)以所制作的引入抛物线修正的沙漏状 XCRL 的掩膜版为掩膜进行曝光、显影 (d)以光刻胶做掩蔽层用 1:1 的 HNO_3 腐蚀液在室温下腐蚀康铜薄膜 (e)去除光刻胶,得到光刻 SU-8 时所需的掩膜 (f)在衬底覆盖掩膜的一面涂敷所需厚度的 SU-8 负性光刻胶,前烘后,将衬底无掩膜面朝上,在康铜掩膜的掩蔽下进行紫外曝光 (g)随后进行后烘、用 SU-8 负性光刻胶专

用显影液进行显影并坚膜,得到 SU-8 材料的沙漏状 XCRL.

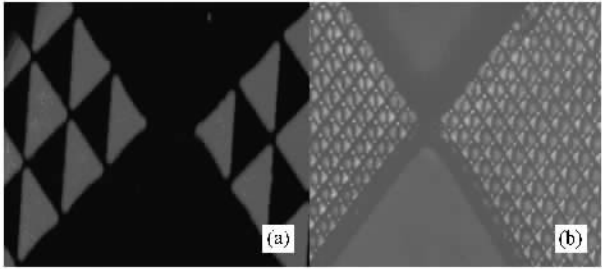


图 6 (a) SU-8 掩膜图形的局部放大图 (b)所制作的沙漏状 XCRL 的局部放大图

图 6(a)给出了制作出的 SU-8 掩膜结构的局部放大照片,可以看出,小棱镜的直线边和抛物线修正的边界图形清晰,效果较好.图 6(b)所示为采用背面曝光技术所制作出的 SU-8 负性光刻胶材料的沙漏状 XCRL,所制作出的透镜结构高度为 $200\text{ }\mu\text{m}$,深宽比达到了 25:1,但侧壁尚不够陡直,存在尺寸误差.通过制作工艺的进一步完善,这一问题会得到解决,并有可能达到更高的深宽比.实验结果表明了采用背面曝光技术制作沙漏状 XCRL 的方法是可行的.

4. 沙漏状 XCRL 的聚焦性能测试实验

图 7 所示为沙漏状 XCRL 聚焦性能测试的实验系统图^[14,15],主要由同步辐射 X 射线源、两块晶体(晶体 I 和晶体 II)、被测的 SU-8 材料的沙漏状 XCRL 以及记录焦斑的 X 射线 CCD 组成.晶体 I 和晶体 II 分别起到单色器和偏折 X 射线的的作用.X 射线辐射经过晶体 I 后,出射能量为 10 keV 的单色 X 射线,再经过晶体 II 的反射,将 X 射线偏折并射向置于晶体 II 后的 SU-8 材料的沙漏状 XCRL,聚焦焦斑由可沿光轴步进移动的 X 射线 CCD 记录.测得的结果如图 8 所示.

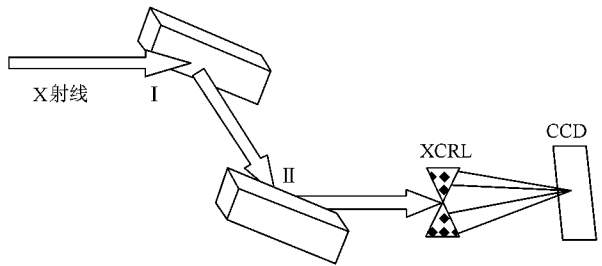


图 7 沙漏状 XCRL 聚焦性能测试实验系统示意图

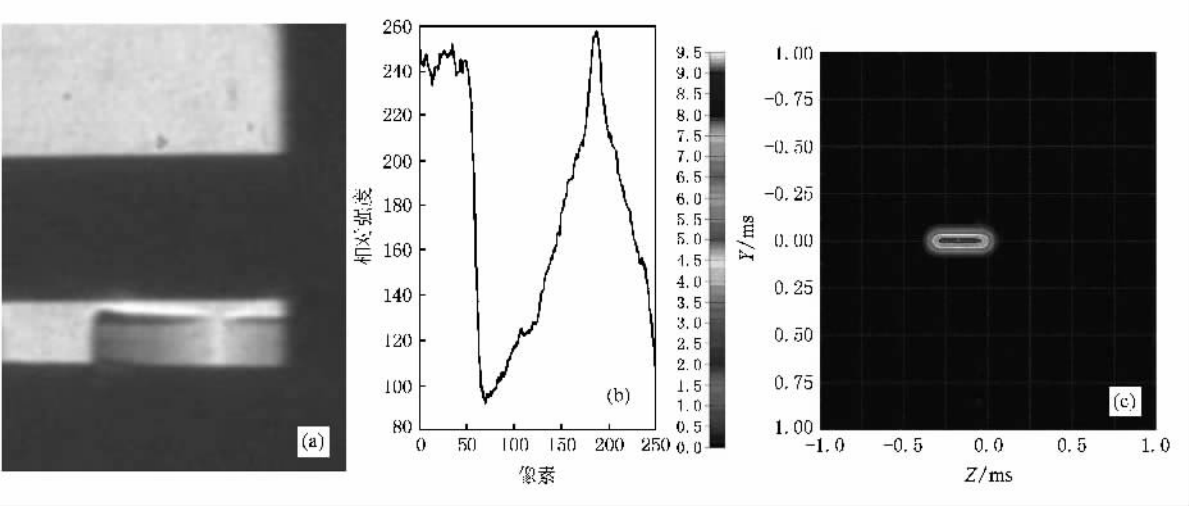


图 8 (a)SU-8 材料沙漏状 XCRL 在像距为 1.65 m 时记录得到的聚焦图像 (b)焦斑强度分布曲线 (c)用 Tracepro 模拟的带有抛物线修正的焦斑图像

图 8(a)所示即为 SU-8 材料沙漏状 XCRL 在像距为 1.65 m 时记录得到的聚焦图像,可以看出,上方的压板没有压紧留有一个狭缝,在一定程度上影响了透镜的聚焦效果.但是将通过沙漏状 XCRL 聚焦焦斑和未经过聚焦的宽亮斑相比较,可以看出透镜的聚焦效果是非常明显的.图 8(b)是根据图 8(a)测试的聚焦图像所得出的焦斑相对强度分布曲线.可以看出图中透镜的聚焦光斑的相对强度值为 212.5,而背景光的相对强度为 192,由透镜的增益的定义式(6)可以得到,所制作出透镜的实际增益为 1.1068,而由(7)式计算得到透镜的理论增益为 1.4297.可以看出实际的增益比较小,分析认为这是由于材料的吸收较大以及所制作透镜的结构误差造成的.图 8(c)是在理论上用 Tracepro 模拟的带有抛物线修正的焦斑图像,由于忽略了材料的吸收,所以模拟得到的光斑强度大于实验得到的光斑强度.根据沿光轴步进移动的 X 射线 CCD 记录和 X 射线 CCD 的像素尺寸估算,得到实验图像的焦斑尺寸为

74 μm ,而理论上的焦斑尺寸为 18 μm ,实验得到的焦斑尺寸比较大,分析认为这是由于透镜结构误差所引起的.通过聚焦的光斑与未经过聚焦的宽亮斑相比较,可以得出所制作的沙漏状 XCRL 较好地实现了 X 射线的一维聚焦.

5. 结 论

本文在对沙漏状 XCRL 的折射聚焦理论的分析基础上,利用背面曝光技术制作了 SU-8 材料的沙漏状 XCRL,在保证图形准确性的同时减少了工艺步骤,使制作更加简便易行.测试结果表明,用该工艺制作的 SU-8 材料的沙漏状 XCRL 可以较好地实现 X 射线的一维聚焦.本文所采用的设计和制作方法对于 XCRL 的应用和发展具有重要的参考价值.

衷心感谢中国科学院高能物理研究所朱佩平、张菊芳、袁清习在器件制作和性能测试中对作者的帮助.

[1] Hart M ,Berman L 1998 *Acta Cryst . A* **54** 850
[2] Kumakhov M A ,Sharov V A 1992 *Nature* **357** 390
[3] Suehiro S ,Miyaji H ,Hayashi H 1991 *Nature* **352** 385
[4] Sun T X ,Ding X L ,Liu Z G 2007 *Optics and Precision Engineering* **12** 1809
[5] Chen B Z 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1973 (in Chinese) [陈宝振 2005 *物理学报* **49** 1973]
[6] Snigirev A ,Kohn V ,Snigireva I 1996 *Nature* **384** 49
[7] Liang J Q ,Huang X H ,Le Z C 2008 *Nuclear Techniques .* **31** 165 (in Chinese) [梁静秋、黄鑫华、乐孜纯 2008 *核技术* **31** 165]
[8] Aristov V V ,Grigoriev M V ,Kuznetsov S M 2000 *Optics Communication* **177** 33
[9] Jark W ,P ren  s F ,Matteucci M 2004 *SPIE* **5539** 59
[10] P ren  s F ,Matteucci M ,Jark W 2005 *Microelectronic Engineering* **78-79** 79
[11] Liang J Q ,Le Z C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 60 (in Chinese) [梁静秋、乐孜纯 2005 *光学精密工程* **13** 60]
[12] Cederstr  m B ,Cahn R N ,Danielsson M 2000 *Nature* **404** 951

- [13] Yi F T ,Miao P ,Peng L Q 2004 *Chinese Journal of Semiconductors* **25**
26
- [14] Le Z C ,Liang J Q ,Dong W 2006 *Acta Optica Sinica* **26** 317 (in

- Chinese)[乐孜纯、梁静秋、董 文 2006 光学学报 **26** 317]
- [15] Alexei E ,Alexander F 2007 *Optics and Precision Engineering* **12**
1816

Hourglass-shaped X-ray compound refractive lens made by back-mask exposure technology^{*}

Zhu Yan-Qing^{1 2)} Liang Jing-Qiu^{1)†} Liang Zhong-Zhu¹⁾ Huang Xin-Hua^{1 2)} Le Zi-Chun³⁾ Yi Fu-Ting⁴⁾
Hou Feng-Jie⁴⁾ Huang Wan-Xia⁴⁾ Dong Wen³⁾ Wang Wei-Biao¹⁾ Wang Zhi-Li⁴⁾ Cui Nai-Di^{1 2)}

1 ❶ State Key Laboratory of Applied Optics ,Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,
Chinese Academy of Sciences ,Changchun ,Jilin 130033 ,China)

2 ❷ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

3 ❸ Zhejiang University of Technology ,Hangzhou 310032 ,China)

4 ❹ Institute of High Energy Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 1000349 ,China)

(Received 21 April 2008 ; revised manuscript received 4 August 2008)

Abstract

Using back-mask exposure technology ,the hourglass-shaped X-ray compound refractive lens(XCRL) was made . Firstly ,the theory of the refractive focusing of the hourglass-shaped XCRL was analyzed . Then the hourglass-shaped XCRL was manufactured using back-mask exposure technology for the first time ,which avoids two-time masking and reduces the transfer times of the figure . The refractive focusing performance of the lens was tested with 10 keV monochromatic X-ray . The experimental results indicated that it has good focusing performance in one dimension , which is in general coincident with the calculated results .

Keywords : compound refractive lens(CRL) , back-mask exposure , hourglass shape , SU-8

PACC : 2920L , 6180C

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60672014) ,the Beijing Electron Positron Collier National Laboratory.

[†] Corresponding author. E-mail :liangjq@ciomp. ac. cn