

复合折射透镜的进展和应用*

黄承超 穆宝忠 王占山[†] 陈玲燕

(同济大学精密光学工程技术研究所 上海 200092)

摘要 文章介绍了 X 射线复合折射透镜的工作原理,详细回顾了 X 射线复合折射透镜的发展历程,综述了近年来 X 射线复合折射透镜的研究成果及其主要应用领域。

关键词 X 射线光学,复合折射透镜,同步辐射,聚焦

The development and applications of compound refractive lenses

HUANG Cheng-Chao MU Bao-Zhong WANG Zhan-Shan[†] CHEN Ling-Yan

(Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The principle of X-ray compound refractive lenses is outlined. Furthermore, their development and applications are reviewed in detail.

Keywords X-ray optics, compound refractive lenses, synchrotron radiation, focusing

1 引言

在过去的 30 年里, X 射线光学元件得到了迅速发展。由于 X 射线相对任何材料的折射率都很小,且有一定的吸收,因此,直到 1996 年, X 射线聚焦光学元件只有反射^[1-5](K-B 系统、毛细管和波导管)和衍射(菲涅耳波带片和布拉格-菲涅耳波带片)^[6,7]两种形式。这些光学元件已广泛应用于 X 射线成像^[3]、X 射线衍射^[8]、X 射线荧光分析^[9]和 X 射线微探针^[2]等研究领域。为了获得更多的材料结构和成分信息,需要使用更短波长的硬 X 射线。对于硬 X 射线,反射和衍射光学元件的制作成本昂贵,调试困难,甚至是无法制造^[10]。为了克服反射与衍射光学元件的不足,迫切需要研制一种造价低廉、调试方便,并且能够有效工作在硬 X 射线波段(能量大于 5keV)的 X 射线光学元件。

1996 年,针对第三代同步辐射硬 X 射线研究工作的需求,法国欧洲同步辐射装置的科学家提出了 X 射线复合折射透镜的概念,并用实验进行了验证^[11],用复合在一起的多个折射透镜实现了 14keV 硬 X 射线的会聚,焦距 1.8m。与以往的想法不同,这次是采用低原子序数材料来减小 X 射线吸收。目前通过合理设计透镜参数,复合折射透镜的透过率

已做到 90% 左右。与其他 X 射线光学元件相比, X 射线复合折射透镜具有不改变光路走向、高温稳定性好且易冷却、结构简单紧凑、对透镜表面粗糙度要求低、可工作在高能 X 射线波段(100keV—1MeV)等许多优点,因此,很快成为 X 射线光学元件研究的一个热点并已在多个同步辐射研究中心的光束线预聚焦^[12]、X 射线成像^[13-16]、X 射线衍射^[17]与荧光分析^[18]、高分辨率 X 射线微探针^[19,20]等方面获得广泛应用。

2 复合折射透镜的发展

2.1 柱面复合折射透镜

1996 年,在《Nature》上一篇题目为“ A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays ”的文章第一次提出了复合折射透镜的概念^[11](如图 1 所示)。物质对 X 射线的折射率 n 为 $1 - \delta + i\beta$, X 射线光束(14keV)在依次通过 30 个口径 D ($D = 2R$)为 0.6mm 的铝制双凹透镜后,在焦平面上(离透镜 1.8m)得到了 $8\mu\text{m}$ 的焦斑(入射光束宽度

* 国家自然科学基金(批准号:30575076)资助项目
2008-01-07 收到

[†] 通讯联系人, Email: wangzs@mail.tongji.edu.cn

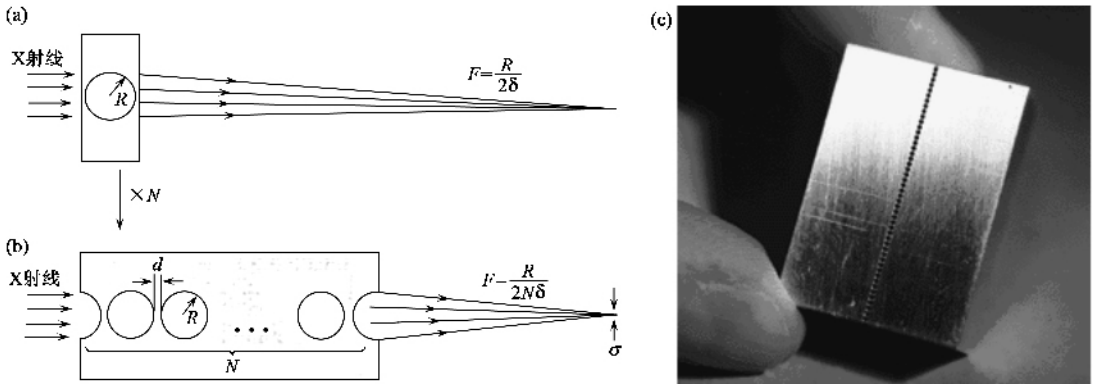


图1 第一个复合折射透镜 (a)单个折射透镜 (b)复合折射透镜^[11] (c)实物图

为 $150\mu\text{m}$) 并具有 3 倍的增益. 透镜的制作仅仅是在一个铝铜合金块(铜占总质量的 4%)上钻了 30 个孔. 相对于单个折射透镜 54m 的焦距 ($F = R/2\delta$), 通过复合的思想, 大大缩短了透镜的总焦距 ($F = R/2N\delta$, 其中 N 为凹透镜的个数), 使 X 射线折射透镜的应用成为可能.

试. 现在, 以铝或铍制成的抛物面复合折射透镜作为关键部件的 X 射线显微成像系统, 能够工作在 5keV 到 150keV 的硬 X 射线波段, 得到 $300\text{—}500\text{nm}$ 的分辨率^[14]. 抛物面复合折射透镜与层析 X 射线扫描技术相结合, 能够在亚微米分辨率下提供不透明介质的三维图像. 图 3 为抛物面复合折射透镜的结构图. 图 4 为装配好的抛物面复合折射透镜(包括透镜盒、准直导轨).

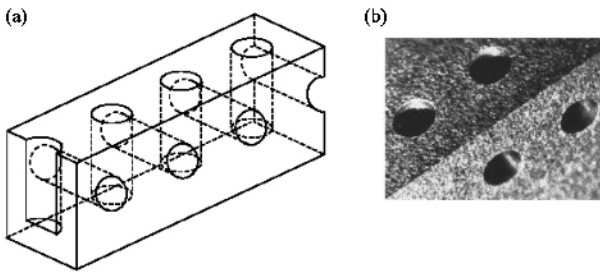


图2 (a)交叉柱面复合折射透镜结构图^[21] (b)实物图

第一个复合折射透镜属于柱面复合折射透镜. 虽然制造简单, 但一维聚焦和球差阻碍了它的应用. 文中同时预言了两种可行的二维聚焦透镜: 一种是成 90° 交叉放置的两个柱面复合折射透镜(如图 2 所示); 另一种是塑料球透镜.

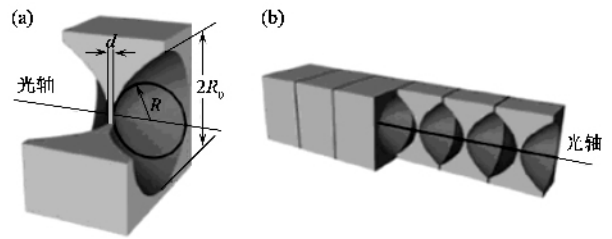


图3 抛物面复合折射透镜的结构图 (a)单个透镜 (b)组合单个透镜形成复合折射透镜^[22]

2.2 抛物面复合折射透镜

上述第一个预言是在 1998 年成为现实^[21]. 但是与同为二维聚焦的抛物面复合折射透镜相比, 交叉柱面复合折射透镜无论在关键参数(透过率, 增益系数)还是在成像质量(比如球差控制)上, 都无法与后者相比. 因此, 抛物面复合折射透镜就很快成为复合折射透镜研究的热点, 而柱面复合折射透镜则光芒不在. 到了 2001 年, 抛物面复合折射透镜的技术已经成熟, 立刻应用于第三代同步辐射装置的光束线预聚焦、成像系统以及衍射和荧光分析上. 抛物面复合折射透镜有以下显著特点: 比如能够二维聚焦, 没有球差和其他像差, 结构简单紧凑且易于调

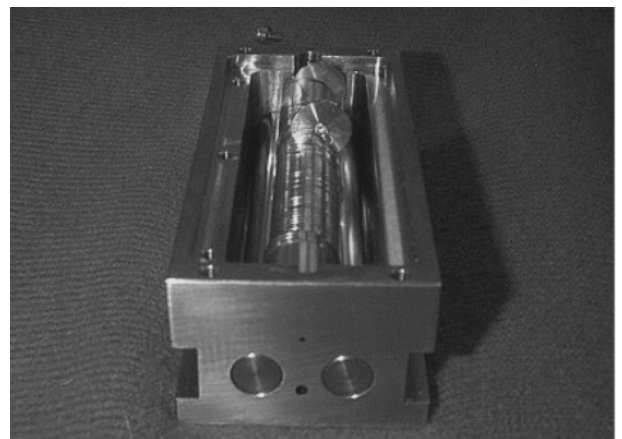


图4 装配好的抛物面复合折射透镜

正因为抛物面复合折射透镜具有以上优点和良好的应用前景, 在国际上, 激起了一股研究复合折射透镜的热潮. 几乎同时出现了全新的 4 种复合折射透镜的设计, 并都用实验进行了验证.

2.3 平面透镜

作为集成电路制造技术基石,光刻工艺有着丰富的技术积累.自然很容易想到用光刻工艺来制造平面透镜.在应用不同的光刻工艺,制造平面透镜时,使用的材料非常丰富,从硅到光刻胶,再到金刚石、玻璃碳.同时,为了增大透过率,提高增益系数,透镜的形状也经过了许多的优化,但主要可以分为两大类:一类是平面抛物形折射透镜;另一类是 kinoform 透镜.现分别介绍如下:

2.3.1 平面抛物形折射透镜

平面抛物形折射透镜是一切平面透镜的原型.现在仍广泛应用于 X 射线衍射和荧光分析以及 X 射线微探针技术当中.在 2000 年,通过等离子体刻蚀的方法在硅片上第一次制造出了平面抛物形折射透镜^[23](如图 5 所示).透镜高度为 $100\mu\text{m}$,透镜壁的厚度为 $5\mu\text{m}$.由图 5 可以看出,5 组不同透镜个数的复合折射透镜构成了整个图形.透镜个数分别是 1 2 4 6 8 个.5 组透镜在 8keV 处都有相同的 18cm 的焦距.由于硅对 X 射线吸收比较大,所以在文献[23]中,作者提出一种最小吸收的平面抛物形折射透镜的设计,可以有效地减少吸收,增大透过率.具体内容会在随后的 2.3.2 节中涉及.

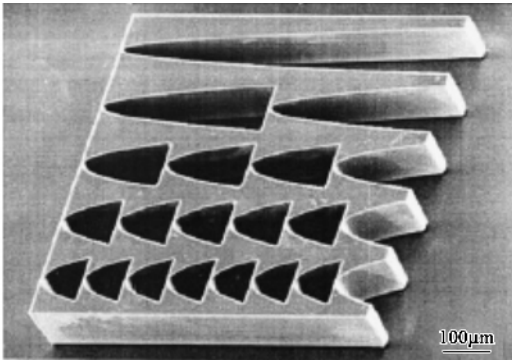


图 5 第一块平面抛物形折射硅透镜的 SEM 照片

虽然硅对 X 射线吸收较大,但是由于其在高能 X 射线中具有良好的稳定性且结实耐用,所以,在随后几年中,仍出现了不少针对特殊要求而设计的平面抛物形折射硅透镜.图 6 是一种针对不同能量进行设计的整合平面抛物形折射硅透镜,所有的透镜都具有相同的 0.5m 的焦距^[24].如果想要改变能量,只要平移透镜,使光束通过相应的平面抛物形折射透镜就行了.

平面抛物形折射透镜是一维聚焦,但只有实现二维聚焦,才能把透镜应用于 X 射线成像以及 X 射

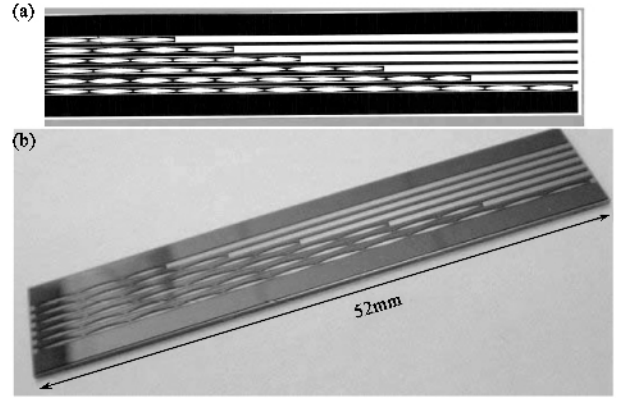


图 6 宽能量范围的平面抛物形折射透镜 (a)设计图;(b)实物图

线微探针测量.因此,类似于交叉柱面复合折射透镜的设计,通过把两个平面抛物形折射透镜交叉放置,实现二维聚焦.装置图如图 7 所示^[25].

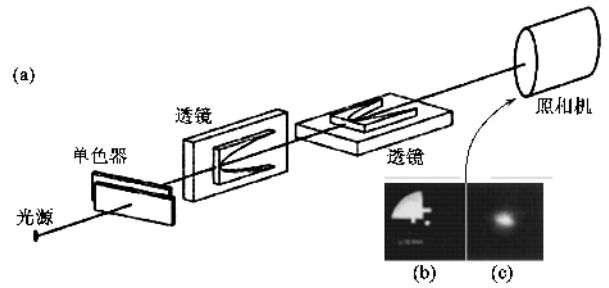


图 7 (a)二维聚焦的装置图;(b)全视野图像;(c)中心焦点图像

虽然硅在高能量同步辐射白光照射下,有良好的稳定性,但是在一般情况下(能量在 $5\text{--}40\text{keV}$),用光刻胶制造的平面抛物形折射透镜优势明显.首先,光刻胶 98% 的成分是低原子序数的 C, H, O, 对 X 射线吸收小,能够比硅透镜得到更高的透过率和增益系数.其次,光刻胶透镜只要使用一到两次图形转移过程,特别是 SU-8 光刻胶,只要使用一次图形转移过程就能完成平面抛物形折射透镜的制造,大大缩短了透镜制造的工艺周期,降低了工艺的复杂程度,从而压缩了成本,提高了图形转移的保真度.最后,通过改变入射光的角度和特殊的掩模板,使用光刻胶可以制造出复杂的图形,达到了要使用两组平面抛物形折射硅透镜才能实现的二维聚焦^[26](如图 8 所示).

正因为用光刻胶制造平面抛物形折射透镜有如此多的优点,所以一直以来,平面抛物形折射光刻胶透镜是复合折射透镜研究的焦点之一,已广泛应用于同步辐射光束线的纳米聚焦和光束线准直当中.通过垂直放置两个 SU-8 平面抛物形复合折射透镜,

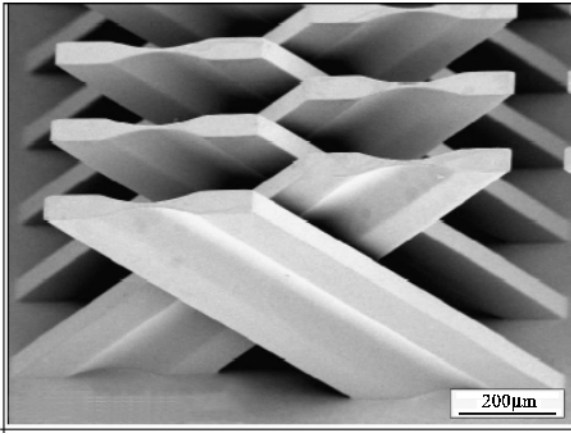


图8 SU-8交叉透镜的局部照片(单个透镜和基片成 $\pm 45^\circ$ 倾斜,每个元件的面型是准抛物形面型)

对应于 21keV,在毫米量级的焦距位置上,得到了一个 $47 \times 55 \text{nm}^2$ 的焦斑,并且光通量达到了 $1.7 \times 10^8 \text{ph/s}$.装置如图9所示^[19].

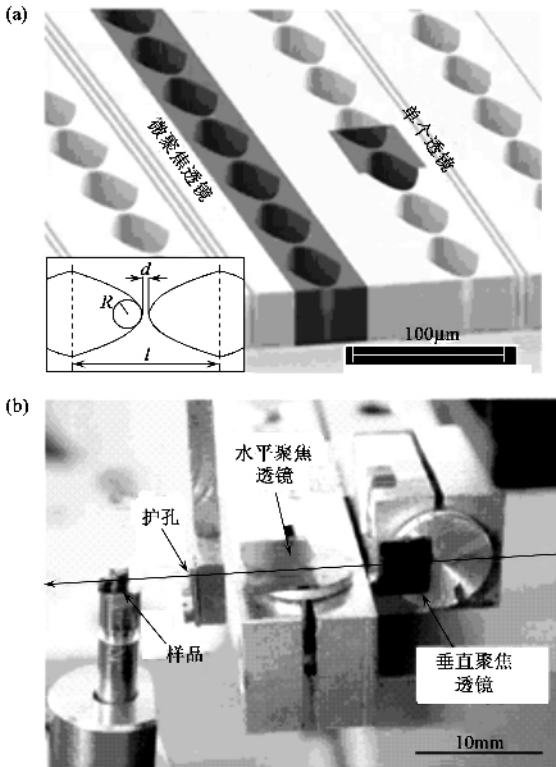


图9 (a)扫描电子显微照片(单个透镜和一个纳米聚焦透镜通过阴影表示出来)(b)纳米探针装置图(X射线光束通过交叉放置的纳米聚焦透镜聚焦到样品上)

随着光刻工艺制造平面抛物形折射透镜技术的发展,金刚石、镍也因为各自特点而被用于平面抛物形折射透镜的制造.金刚石具有低X射线吸收、低热膨胀性和高热传导性,在第三代同步辐射波荡器光束的长时间照射下无损伤,是工作在将来X射线

自由电子激光中的理想光学元件^[27].而镍则由于其密度较大,故其对X射线的折射效果较为明显,可以大大缩小工作在高能量下(如150keV)平面抛物形折射透镜的几何尺寸^[28].

对于一些特殊材料,如玻璃碳,现在采用激光烧蚀的方法进行加工.不过,加工的时候,引进了掩模板投影技术.如图10所示^[29].这种新的制造技术还可用于金刚石、蓝宝石材料的复合折射透镜的制造.

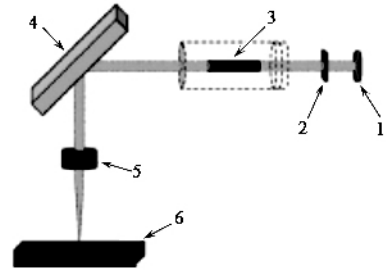


图10 通过掩模板投影方式在玻璃碳上制造平面抛物形折射透镜(1——激光腔球面镜 2——掩模板 3——激光激发物质; 4——平面镜 5——投影光学镜 6——玻璃碳块)

2.3.2 Kinoform 透镜

Kinoform 透镜的设计思路是通过去除透镜中对X射线会聚没有贡献的部分,尽可能增大X射线透过率和增益系数.现在kinoform透镜已经发展出很多种类.

最小吸收平面抛物形透镜是kinoform透镜中最早出现的一种,在2000年,它与第一个平面抛物形折射硅透镜同时被提出,并进行了实验验证^[23].如图11和图12所示.最小吸收平面抛物形透镜能够明显增大透过率.对于同样的参数设置,当普通的平面抛物形折射透镜的透过率是15.8%的时候,最小吸收平面抛物形透镜的透过率能够达到36.5%,是普通平面抛物形折射透镜的2.3倍^[23].

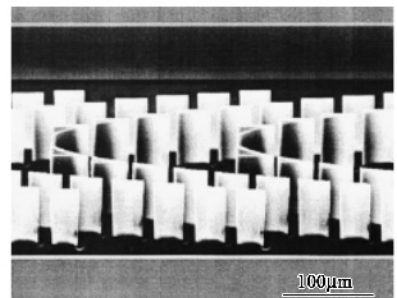


图11 最小吸收平面抛物形硅透镜^[23]

在最初的最小吸收平面抛物形折射透镜设计的基础上,通过平移透镜块,能得到一种“短的”最小吸收平面抛物形透镜,即现在最为常见的kinoform透镜的形状.如图13所示.

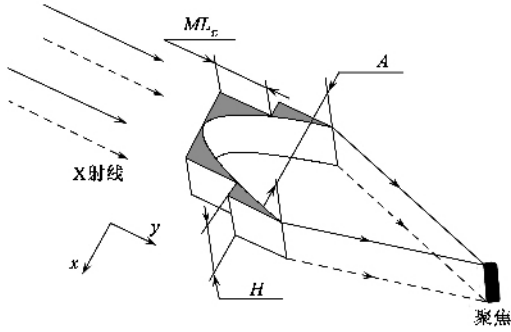


图 12 最小吸收平面抛物形透镜的示意图(图中 L_π 是 X 射线在材料中相位变化 π 所经过的距离, M 是一个偶整数^[30])

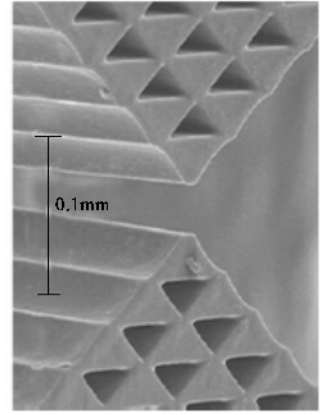


图 15 类棱镜结构的简单罗列,实现 X 射线的聚焦^[32]

还有一种 kinoform 透镜的变形——棱柱透镜(也叫沙漏透镜),也是现在研究的热门。和图 14 中右边两种透镜类似,在制造大几何孔径的棱柱透镜时,不会受到光刻工艺的高宽比的限制。图 15 是现在已经通过实验验证的棱柱透镜。其原理同后面介绍的梳齿透镜具有相似性:离光轴越远的光束,通过的棱镜个数更多,从而更向光轴偏转,最终所有光束会聚在一点,形成聚焦。棱柱透镜的几何孔径能够做到毫米量级。图 15 是它的局部照片。国际上,现已实现棱柱透镜对垂直方向上 $500\mu\text{m}$ 的 8keV 的 X 射线光束的会聚,焦线尺寸为 $2.8\mu\text{m}$,并得到了 25 倍的增益^[32]。

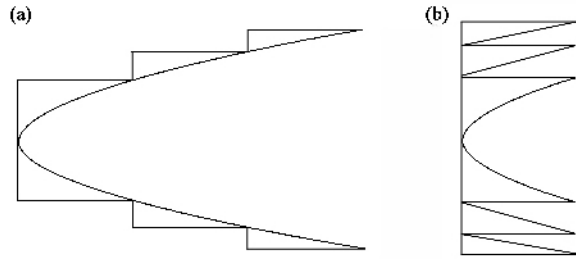


图 13 (a)一个“长”的“kinoform 透镜(X 射线自左向右入射); (b)一个“短”的“kinoform 透镜(把透镜块移到一个平面上,与二元波带片非常相似)

现在 kinoform 透镜已经有如图 14 所示的好几种变形,但是其原理和效果与前面讨论的 kinoform 透镜完全相同。图 14 中左边两种透镜对 X 射线的吸收比右边两种少,在相同条件下,能够得到更大的透过率和增益系数。但是由于受到光刻工艺中图形转移的高宽比限制(即图形的刻蚀深度和图形的最小宽度之间的比值),当透镜几何孔径做到 1mm 时,其离轴最远的部分宽度在 $20\mu\text{m}$ 量级,对于不同的光刻设备,图形高度最多在 $40\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 之间。极大地限制了透镜的应用。而右边两种透镜由于不存在离轴越远、尺寸越小的缺点,所以可以把透镜几何孔径做到毫米量级,从而可以提高分辨率^[31,32]。

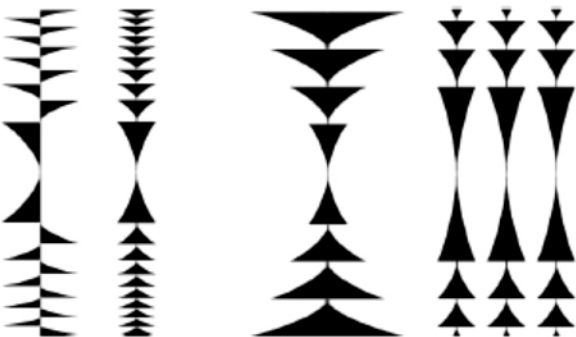


图 14 kinoform 透镜的几种变形^[32]

2.4 Multi-prism 透镜(即梳齿透镜)

早在 2000 年,一篇刊登在《Nature》上的题目为“Focusing hard X-rays with old LPs”的文章,介绍了一种全新的复合折射透镜,如图 16 所示^[33]。通过两块从密纹唱片上切下来的片断,做成一个没有球差的硬 X 射线折射聚焦透镜。离光轴越远的光束会通过更多的齿,从而获得更多的偏转,最后汇聚在一条线上。通过调节两行梳齿分开的角度,可以实现对焦距的改变。通过同样的方法,根据梳齿透镜对不同能量 X 射线光束的焦距不同,也可以作为单色器使用。文中所提到的梳齿透镜在 23keV 处,焦距为 22cm ,增益系数为 1.7。

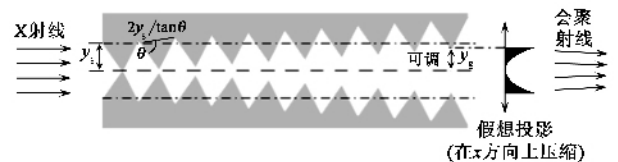


图 16 梳齿透镜的简略图(只显示了 300 个齿中的 10 个)

正因为梳齿透镜结构简单,成本低和容易装调,相继出现了不同材料制成的梳齿透镜,现在已经有硅、光刻胶、铍和锂的梳齿透镜,在同步辐射上测试时,增益系数已经能够达到 $40^{[34]}$ 。

通过使光束通过不同个数的梳齿,可以制造出焦距可调的复合折射透镜。如图 17 所示^[35]。把梳齿透镜的两个部分面对面地对准放置,然后用两块平板象三明治一样从两边夹住固定,然后在 $x-y$ 平面上切出一个斜面,当光束沿着 y 轴方向射入时,通过沿着 x 轴移动梳齿透镜,就可以改变焦距。

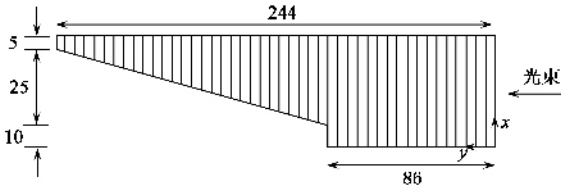
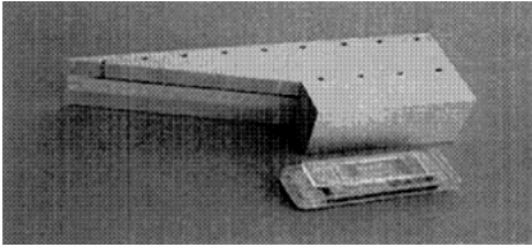


图 17 可调焦距的梳齿透镜(上图是实物照片,下图是俯视图)

2.5 气泡透镜

气泡透镜的第一次提出并验证是在 1999 年一篇题目为“*A microcapillary lens for x-rays*”的文章中。如图 18 所示^[36]。气泡透镜和别的复合折射透镜相比,有着显著的优势。首先其透镜的面型是由液体张力作用,自然形成的,所以其面型粗糙度几乎为零。其次,通过使用不同内径的中空管和不同黏度的环氧树脂,最大的气泡透镜的几何孔径可以做到 1mm 左右,而最小可以做到 0.05mm^[37]。再次,其制作的方法相对比较简单,现在普遍采用的方法就是在已经充满环氧树脂的中空玻璃管中,依次充进气泡,而气泡和气泡之间就自然形成了所要的透镜。所以这种气泡透镜的制造完全可以在一般实验室条件下完成。

自从气泡透镜诞生以来,对其研究就一直没有停止过。由于所使用的环氧树脂对 X 射线的吸收较小,现在可以放置几百个透镜,从而在短焦距和接近 50% 的高透过率的情况下得到了几微米量级的焦斑^[20],并且由于近轴区域可以近似地看成抛物面型又可以二维聚焦,所以气泡透镜已经成功地用于以一般的铜阳极 X 射线管作为光源的 X 射线成像实验^[15]。

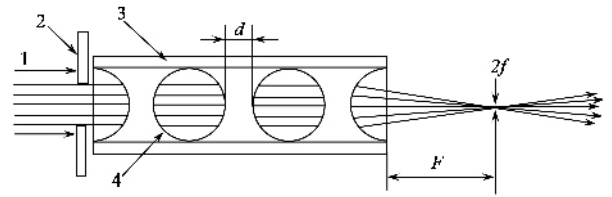


图 18 透镜示意图(1—X 射线光束 2—光阑 3—中空玻璃毛细管 4—环氧树脂)

2.6 球面复合折射透镜

从柱面复合折射透镜向抛物面复合折射透镜的跳跃获得巨大成功,使作为过渡产物的球面透镜从一开始就失去了发展的空间。但是与其他种类的复合折射透镜相比,球面复合折射透镜是最简易的二维聚焦透镜,在中子成像上^[38,39]以及二维聚焦^[40]上仍然有着一定的应用。

3 复合折射透镜的应用

正因为复合折射透镜具有以上提到的不需要改变光路方向、高温稳定性好、易冷却、结构简单紧凑、对表面粗糙度要求低、可工作在高能 X 射线波段、成像无球差(以抛物面复合折射透镜为代表)等特点,所以复合折射透镜已广泛地应用于各种 X 射线显微成像和微探针技术中,并且已作为一些同步辐射装置的光束线预准直装置。全世界能量最高的 3 台同步辐射装置(日本 Spring8,美国 APS,欧洲 ESRF)上都使用了复合折射透镜,其中日本 Spring8 为 BL10XU 光束线,美国 APS 为 1-ID 振荡器光束线,而在复合折射透镜的诞生地——欧洲的同步辐射装置(ESRF)上,已经至少有 6 条光束线(ID10A + B (TROIKA), ID11, ID13, ID18F, ID22 和 ID28 光束线)使用了复合折射透镜。除了以上 3 个同步辐射装置外,德国 DESY 的 BW4 光束线也把复合折射透镜作为一种可供选择的光束线准直装置。归纳起来,复合折射透镜主要有以下三种用途。

3.1 光束线预准直

第三代同步辐射装置能量都在 GeV 数量级,在其高亮度出射光直接照射下,物体能在几分钟之内温度上升到 100℃ 以上,并且大剂量的辐射会破坏有机物质的内部结构,因此需要一种高温稳定性好、耐辐射的光束线预准直光学元件。与国际上普遍采用的预准直光学元件相比,复合折射透镜结构更加简单,高温稳定性好,

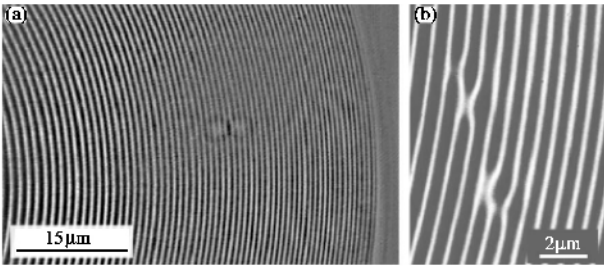


图 19 (a)一个菲涅耳波带片(最外环宽度为 300nm,厚度为 1.25 μm)的 X 射线显微照片($E = 23.5\text{keV}$) (b)一个菲涅耳波带片具体的显微照片($E = 14.4\text{keV}$).在波带片上的一些缺陷也可以看出来

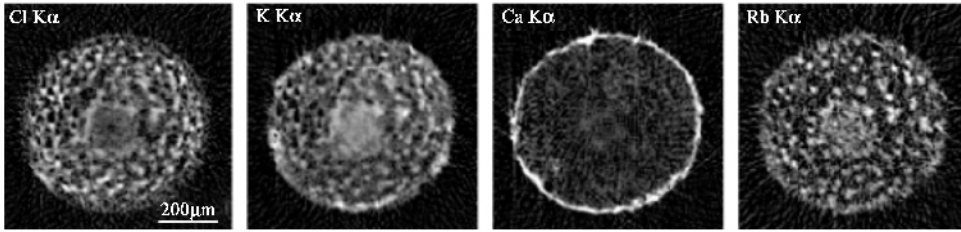


图 20 一个桃花心木树根的荧光显微层析照片(用 Al 折射透镜在 19.5keV 能量处拍摄.在根部横截面上,Cl, Ca, K 和 Rb 元素分布情况都被显示出来)

且易散热,是一种理想的预准直光学元件.美国 APS 的 1-ID 振荡器光束线^[41]以及欧洲 ESRF 的 ID10A + B (TROIKA)光束线^[42]都已使用了该技术,取得了很好的效果.

3.2 微聚焦

很多 X 射线分析技术(如 X 射线衍射、荧光、吸收以及反射率分析)的横向分辨率都与光斑尺寸成正比关系.因此对微聚焦方法的研究一直是国际上的热门课题.由缩小倍率 $m = f/(L_1 - f)$ 可以看出,透镜焦距 f 越小,光源到透镜的距离 L_1 越大,则得到的焦斑就越小.在欧洲 ESRF 的 ID13 光束线上,复合折射透镜的焦距已能做到毫米量级,最小可以得到一个 $47 \times 55\text{nm}^2$ 的焦斑^[19].

3.3 X 射线显微成像

3.3.1 全视场透射式 X 射线显微镜

全视场透射式 X 射线显微镜使用了和常规光学以及透射电子显微镜一样的光学设计思路.基本原理就是用一个成像元件作为显微镜的物镜,以得到一个放大的像.当物体放在物方焦距外面一点点的位置时(即 L_1 比 f 略大一点),那么在 L_2 处就会得到一个被放大很多的像 $L_2 = L_1 f / (L_1 - f)$.放大倍率为 $L_2 / L_1 = f / (L_1 - f)$.这项技术也可以用于动态

成像和相衬成像.

对于硬 X 射线,复合折射透镜是一个适于全视场成像的光学元件.在 X 射线的光子能量在 10keV 及以上的情况下,复合折射透镜的焦距在米的数量级,整个显微镜的长度在 10—25m 的数量级,分辨率能达到 100—300nm,如图 19 所示^[16].

3.3.2 扫描 X 射线显微镜

扫描 X 射线显微镜的基本原理是用光学元件产生一个微焦斑,通过机械式扫描样品,同时用一个相应的探测器测量透过的 X 射线,然后根据每个焦斑的信息还原成相应的图像.聚焦的 X 射线探针可

以在每次扫描中得到样品每点的衍射或者吸收的数据,同时还能用于 X 射线激发的荧光以及光电子探测.扫描 X 射线显微镜的空间分辨率受聚焦元件本身的限制.

对于硬 X 射线,可以用复合折射透镜作为微聚焦元件,得到了 50nm 的分辨率^[19].现在通过改变工作波长和透镜个数,可以获得较大的焦距和较长的景深,以便基于复合折射透镜的扫描 X 射线显微镜用于一些特殊的样品环境,比如高温或者高压.同时由于工作在更短的波长,所以可以更加方便地对包括宽角和小角散射在内的衍射现象进行研究.

3.3.3 三维 X 射线显微术

当扫描显微镜与层析 X 射线扫描技术结合在一起后,我们就可以得到样品的内部三维结构,这其中包括不同种类原子的分布以及原子的化合价.这项技术可应用在研究植物的新陈代谢中.如图 20 所示^[22].

4 结束语

近年来,由于复合折射透镜具有独特的光学性能,已成为 X 射线光学领域内的一个重要研究方向,其研究成果广泛应用于第三代同步辐射光源中.在过去十几年里,复合折射透镜走过了从无到有,从

单一到多样化的过程,成为了 X 射线光学研究的热点之一。

在上海,现正在建设第三代同步辐射光源,第一期工程完工后将建有 7 条光束线。在这种形势下,自主设计和制造第三代同步辐射光源上使用的 X 射线聚焦与成像元件变得越来越重要。作为应用于第三代同步辐射光源的重要一种 X 射线元件,复合折射透镜自然应该进入研究的日程当中。

参 考 文 献

- [1] Mimura H , Matsuyama S , Yumoto H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,2005 ,44 :L539
- [2] Hignette O , Cloetens P , Rostaing G *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,2005 ,76 :063709
- [3] Bilderback D H , Hoffman S A , Thiel D J. Science , 1994 , 263 :201
- [4] Feng Y P , Sinha S K , Deckman H W *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1993 ,71 :537
- [5] Jarre A , Fuhse C , Ollinger C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 , 94 :074801
- [6] Baez A V. J Opt Soc Am. ,1961 ,51 :405
- [7] Chao W , Harteneck B , Liddle J A *et al.* Nature(London , United Kingdom) ,2005 ,435(7046) :1210
- [8] Salbu B , Krekling T , Lind O C *et al.* Nucl. Instr. & Meth. A ,2001 ,467—468 :1249
- [9] David C , Kaulich B , Barrett R *et al.* Appl Phys. Lett. ,2000 , 77 :3851
- [10] Snigireva I , Snigirev A. J. Environ. Monit. ,2006 ,8 :33
- [11] Snigirev A , Kohn V , Snigireva I *et al.* Nature (London) , 1996 ,384 :49
- [12] Snigireva I , Grigoriev M , Shabelnikov L *et al.* Proc. of SPIE , 2002 ,4783 :19
- [13] Gary C K , Pikuz S A , Mitchell M D *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,2004 ,75(10) :3950
- [14] Lengeler B , Schroer C G , Richwin M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999 ,74 :3924
- [15] Piestrup M A , Gary C K , Park H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 ,86 :131104
- [16] Schroer C G , Günzler T F , Benner B *et al.* Nucl Instr. & Meth. A ,2001 ,467—468 :966
- [17] Castelnau O , Drakopoulos M , Schroer C *et al.* Nucl. Instr. & Meth. A ,2001 ,467—468 :1245
- [18] Simionovici A , Chukalina M , Günzler F *et al.* Nucl. Instr. & Meth. A ,2001 ,467—468 :889
- [19] Schroer C G , Kurapova O , Patommel J *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2005 ,87 :124103
- [20] Dudchik Y I , Kolchevsky N N , Komarov F F *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,2004 ,75(11) :4651
- [21] Lengeler B , Tummeler J , Snigirev A *et al.* J. Appl. Phys. , 1998 ,84(11) :5855
- [22] Lengeler B , Schroer C G , Benner B *et al.* Nucl. Instr & Meth A ,2001 ,467—468 :944
- [23] Aristov V V , Grigoriev M V , Kuznetsov S M. Opt. Communications ,2000 (177) :33
- [24] Snigireva I , Snigirev A , Yunkin V. Synchrotron Radiation Instrumentation. Eighth International Conference ,2004. 708—711
- [25] Grigoriev M , Shabelnikov L , Yunkin V. Proc. SPIE ,2001 , 4501 :185
- [26] Nazmov V , Reznikova E , Somogyi A. Proc. of SPIE ,2004 , 5539 :235
- [27] Snigirev A , Yunkin V , Snigireva I *et al.* Proc. of SPIE , 2002 ,4783 :1
- [28] Snigirev A , Snigireva I , Michiel M Di *et al.* Proc. of SPIE , 2004 ,5539 :244
- [29] Artemiev A , Snigirev A , Kohn V. Rev. Sci. Instrum. ,2006 , 77 :063113
- [30] Aristov V , Grigoriev M , Kuznetsov S *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,77(24) :4058
- [31] Jark W , Pérennès F , Matteucci M. Proc. of SPIE ,2004 , 5539 :59
- [32] Jark W , Pérennès F , Matteucci M. J. Synchrotron Rad. , 2004 ,11 :248
- [33] Cederström B , Cahn R N. Nature ,2000 ,404 :951
- [34] Cederström B , Ribbing C , Lundqvist M. Proc. of SPIE , 2002 ,4783 :37
- [35] Khounsary A , Shastri D , Mashayekhi A. Proc. of SPIE , 2002 ,4783 :49
- [36] Dudchik Yu I , Kolchevsky N N. Nucl. Instr. & Meth. A , 1999 ,421 :361
- [37] Dudchik Yu I , Kolchevsky N N , Komarov F F. Nucl. Instr. & Meth A ,2000 ,454 :512
- [38] Beguiristain H R , Anderson I S , Dewhurst C D *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2002 ,81(22) :4290
- [39] Cremer J T , Piestrup M A , Gary C K *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2004 ,85(3) :494
- [40] Ohishi Y , Baron A Q R , Ishii M *et al.* Nucl. Instr. & Meth. A ,2001 ,467—468 :962
- [41] Shastri S D , Mashayekhi A , Cremer J T *et al.* Proc. of SPIE , 2003 ,5195 :63
- [42] Zhang L , Snigirev A , Snigireva I *et al.* Proc. of SPIE ,2004 , 5539 :48