

球面弯曲晶体硬 X 射线透射成像

施军¹, 赵雨鑫¹, 黎淼^{2*}, 王峰³, 杨国洪³, 韦敏习³¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;²重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065;³中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 提出采用球面弯曲晶体作为透射式成像器件的硬 X 射线成像系统,其基本结构是一个具有各向同性的 X 射线点源和一个球面 Laue 透射晶体,该结构能够解决常用反射式晶体结构不易实现能量在 8 keV 及以上的硬 X 射线成像的难题。在成像系统中,X 射线由微小点源辐射,经过置于球面晶体前面的成像网格物体后,由 α -石英球面晶体透射,最后成像于晶体后方的检测器面上。讨论了球面透射晶体获取不同放大倍率图像的成像机理,利用射线追迹程序设计透射成像系统进行仿真。模拟结果表明,所提结构能够实现二维空间分辨成像。铜靶 X 射线管背光成像实验也证明实验结果与理论分析具有一致性。

关键词 X 射线光学; 硬 X 射线; Laue 晶体; 透射成像; 球面晶体

中图分类号 O536

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134011

Hard X-Ray Transmission Imaging with Spherically Bent Crystal

Shi Jun¹, Zhao Yuxin¹, Li Miao^{2*}, Wang Feng³, Yang Guohong³, Wei Minxi³

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

² College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

³ Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract A hard X-ray imaging system with spherically bent crystal as transmission imaging device is proposed. Its basic structure is an isotropic X-ray point source and a Laue spherical transmission crystal. Different from the reflection configuration, it enables us to solve the problem in hard X-ray imaging with energy above 8 keV. In the imaging system, the X-ray is radiated by a small point source, is dispersed by a transmission grating placed in front of the spherically bent α -quartz crystal, is transmitted by the crystal, and finally is imaged on the detector surface behind the crystal. The imaging mechanism of spherical transmission crystal to obtain different magnification images is discussed, and the ray tracing program is used to design the transmission imaging system for simulation. The simulation results show that the proposed structure can achieve two-dimensional spatial resolution imaging. The backlight imaging experiment of X-ray tube with Cu target also proves that the experimental results are consistent with the theoretical analysis.

Key words X-ray optics; hard X-ray; Laue crystal; transmission imaging; spherical crystal

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-12; 录用日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61604028)、重庆市留学创新基金项目(cx2018023)、等离子体物理重点实验室基金项目(6142A04180207)

通信作者: *limiao@cqupt.edu.cn

1 引言

激光惯性约束聚变的研究成果在基础科学研究方面具有重要作用,同时在经济能源等领域中也有实际应用价值。在激光聚变实验中,靶丸压缩的对称性和均匀性是实现靶丸高效聚爆的关键因素之一,目前较多采用能量在 10 keV 以下的软 X 射线的能谱对聚爆靶丸进行成像诊断^[1-4]。通常而言,由于弯曲晶体光谱仪检测和成像结构设计较简单,谱分辨率和空间分辨率高,故在聚变等离子体成像诊断领域中应用非常广泛,常用的晶体成像结构有球面弯曲晶体、超环面晶体等^[5-8]。然而,由于这种反射结构需要满足较大的布拉格角度,通常在 70° 以上比较恰当,因此反射式晶体成像结构并不适合于能量为 8 keV 及以上的硬 X 射线聚焦成像^[9-11]。硬 X 射线成像焦深大、穿透能力强,可以克服软 X 射线难以透过较大密度物质的缺陷^[12-13],尤其在高温高密度聚变等离子体成像诊断研究中,当聚爆靶在压缩状态下密度达到峰值时,成像的背光源 X 射线能量大于 15 keV 时优势会更加明显^[14-15]。因此,硬 X 射线成像技术不可或缺,其在高温高密度等离子体复杂流体界面示踪、燃料压缩示踪和温稠密等离子体背光照相等领域中都具有广泛的应用前景。

本文基于 Laue 晶体衍射 X 射线原理,提出球面透射晶体 X 射线成像结构,采用不同材料的晶体可以检测能量为 8 keV 以上的高能 X 射线。因为透射部分为无基底的球面弯晶,没有任何基底吸收 X 射线辐射,所以透射晶体成像有助于增加光通量

和提高二维空间分辨率。利用 α -石英晶片加工出透射弯曲晶体成像器,将 X 射线点源布置成背光成像结构,该方案获得了 X 射线经过晶体透射后被成像物体的二维图形。不同于晶体反射式成像结构要求接近正入射的苛刻条件,透射球面弯晶成像结构对入射光偏转角度没有严格的要求,因此其应用范围会更广。同时,透射球面弯晶成像结构布置简便,适应的 X 射线能谱区域更高,进而能够使国内 X 射线成像技术从软 X 射线能谱区域发展到硬 X 射线区域。

2 球面弯曲晶体透射成像

2.1 X 射线晶体衍射

晶体能够衍射 X 射线是因为晶格间距和 X 射线波长数量级相当,散射的 X 射线在某一确定方向上能够产生干涉相加。在图 1(a)中,X 射线以晶体的截面作为反射面,成布拉格角 θ 入射到晶体上,根据 X 射线动力学理论,会有三束出射光,即随着在晶体中的传输距离按指数规律迅速衰减的直接透射光 c,满足布拉格条件的衍射光 a 和异常 Borrmann 效应引起的前向衍射光 b。直接透射光 c 很弱,可以忽略,后两束光相对晶面对称分布,且光强近似相等,在本次设计的透射球面弯晶成像结构中,利用衍射光束 a 进行聚焦成像。在图 1(b)中,单色 X 射线同样以布拉格角入射,此时晶体的表面为反射面,出射光与入射光关于晶面法线对称,从而改变了 X 射线的传播方向,球面晶体与超环面晶体的反射成像即基于此原理。

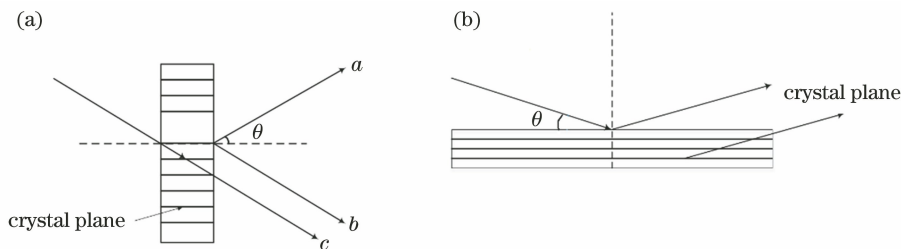


图 1 X 射线透射和 X 射线布拉格反射示意图。(a) X 射线透射示意图;(b) X 射线布拉格反射示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of X-ray transmission and X-ray Bragg reflection. (a) Schematic diagram of X-ray transmission; (b) schematic diagram of X-ray Bragg reflection

图 1(a)中衍射光 a 需要符合 X 射线布拉格衍射条件,即当 X 射线沿着与晶面成 θ 角方向入射至晶体时,衍射光 a 与晶面角度同样也为 θ ,且必须满足

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

式中: λ 是入射 X 射线的波长; d 是晶面间的距离; n

是反射级次。由于透射方式下布拉格角度可以在 10° 以下,而大多数晶体的晶格间距在 0.2~2.0 nm 范围内,因此对应 X 射线的能谱范围能够覆盖常用硬 X 射线能谱区域,超出目前现有的晶体反射成像方式可检测的 X 射线能谱范围。

在激光聚变实验诊断中,能量范围为 8 keV 及

以上的 X 射线成像是通常需要研究的目标,其对应的 X 射线波长低于 0.155 nm。表 1 为常用晶体高能区 0.0124~0.1550 nm X 射线波长对应的布拉格角范围^[16]。考虑到直线透射 X 射线的影响和光路结构设计的关系,即布拉格角偏小,成像光路容易

受透射谱线的干扰,角度偏大则会造成诊断立体角较大,进而可能干涉其他检测设备,故期望结构设计中布拉格角分布在 10°附近。从表 1 中可以看出,对于 0.0124~0.1550 nm 能谱区域的高能 X 射线,一般晶体材料都能够适用,故选材非常方便。

表 1 Laue 透射晶体结构中布拉格角范围

Table 1 Bragg angle range in Laue transmission crystal structure

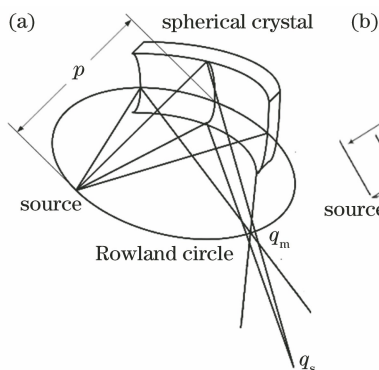
Crystal	Miller index	2d /nm	n	Energy /keV	λ /nm	θ / (°)
Mica	(002)	1.9842	3	8-100	0.0124-0.1550	1.074-13.553
α-quartz	(2020)	0.4264	1	8-100	0.0124-0.1550	1.666-21.316
α-quartz	(1011)	0.6687	1	8-100	0.0124-0.1550	1.063-13.403
α-quartz	(1010)	0.8512	1	8-100	0.0124-0.1550	0.835-10.492
Ge	(111)	0.6532	1	8-100	0.0124-0.1550	1.088-13.727
Si	(111)	0.6271	1	8-100	0.0124-0.1550	1.133-14.310

2.2 球面晶体透射成像结构

对球面晶体透射结构的分析可以对照传统的反射结构,球面晶体反射成像光路结构如图 2(a)所示。由于入射 X 射线并非正入射,因此子午方向和弧矢方向的成像关系式并不一致,相应表达式^[14]分别为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R \sin \theta}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin \theta}{R}, \quad (3)$$



式中: p 为光源与晶体之间的距离; R 为球面晶体半径; q_m 和 q_s 分别为晶体中心到子午方向聚焦点和弧矢方向聚焦点的距离。由于晶体成像面为凹面,故取 R>0, p、q_m 和 q_s 均在晶体同侧,三者符号相同。

X 射线经球面透射晶体后的衍射情况比反射结构复杂,如图 2(b)所示。衍射布拉格平面垂直于晶体表面,布拉格角就是入射角的余角,因此式(2)可以写为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R \cos \theta}. \quad (4)$$

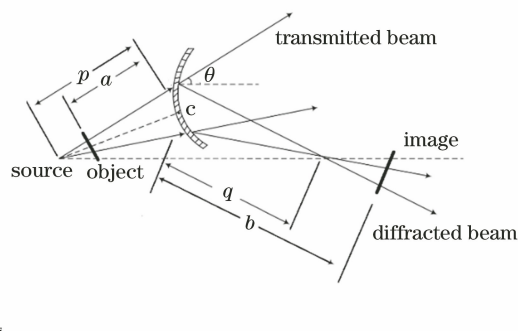


图 2 球面晶体成像光路。(a)反射成像;(b)透射成像

Fig. 2 Imaging optical path of spherical crystal. (a) Reflection imaging; (b) transmission imaging

在透射晶体成像结构中, p 和 q_m 位于晶体异侧,即 p>0、q_m<0。本结构设计要求在晶体的另一侧得到实像,晶体凸面在光路左侧,则 R<0,即球面晶体半径 R 为 -250 mm。光源设定位置与球面反射式相同,即光源与晶体之间的距离 p 为 243.3 mm。晶体材料为 α-石英(1011),采用 Cu 靶作为源辐射,即 X 射线波长为 0.154 nm,可推导出 θ 角为 13.3°。由式(4)可得出 q_m 为 -81.1 mm,“-”号表示透射光线会聚于晶体光路的右侧。若将该晶体成像系统看成焦距为 f 的透镜式成像结构,

则依据透镜成像公式(1/a + 1/b = 1/f),可以认为该结构是焦距为 f = 60.8 mm 的成像系统。当一个物体被放置于距离晶体 81.1 mm(a)处,那么图像会被记录在距离晶体后方 243.3 mm(b)处。在 X 射线透过球面晶体后,光束在子午面和弧矢平面上行进的光路不同,子午方向为聚焦成像,光线行进路线和图 1 中光束 a 一致,其图像放大倍率和反射式球面晶体结构中弧矢面情形一致^[14],故图像放大倍率可表示为

$$M_m = b/a. \quad (5)$$

弧矢方向为投影成像, 光线行进路线和图 1 中光束 b 一致。因此, 该方向放大倍率遵从相似三角形原理, 可表示为

$$M_s = (p + b) / (p - a). \quad (6)$$

由此可以推论, 球面透射成像结构中存在一个位置能够满足子午方向与弧矢方向放大比一致, 即式(5)、(6)所示的放大倍率相等时得到的位置, 理论上此时能够得到一个没有畸变的图像。

2.3 球面透射晶体仿真成像分析

采用 Shadow 射线追迹仿真程序对球面透射晶体成像系统进行模拟分析, 软件是基于 X 射线晶体衍射原理来实现所设计透射晶体聚焦仿真成像的^[17]。成像器件位置布局与图 2(b) 相同, 设置球面晶体弯曲半径为 250 mm, 成像系统的聚焦位置与晶体中心距离设计为 81.1 mm。图 3 为利用仿真程序模拟获得的不同像距条件下的射线强度归一化分布, (x, z) 为成像面位置局部坐标。仿真结果证

实当像距为 81.1 mm 时, 子午面栅格成像分布达到最佳聚焦效果, 如图 3(c) 所示。当像距 b 从 60.0 mm 变化至 81.1 mm 时, 子午面栅格成像分布逐渐呈现会聚效果, 如图 3(a)~(c) 所示。当像距 b 从 81.1 mm 增大到 243.3 mm 时, 栅格成像分布在子午面上且存在明显放大, 如图 3(d)~(f) 所示。图 3 中不同灰度的光谱是用来区别衍射 X 射线的强度差别, 灰度较深部分是 Cu 的 K_α 光谱, 谱线强度最高。在整个像距变化过程中, 弧矢面成像放大比的变化与子午面成像放大比的变化不一致, 对于一组特定的物像距, 虽然子午面与弧矢面具有不同的放大比变化趋势, 但是必定会有一组对应的物像距使得系统能够获得具有相同放大比的成像分布。在本成像系统设计算例中, 在距离球面晶体元件中心 243.3 mm 的像距位置处, 子午面与弧矢面成像放大比相同 ($M_m = M_s = 3$), 故所完成的仿真工作验证了 Laue 球面晶体的衍射聚焦成像性能。

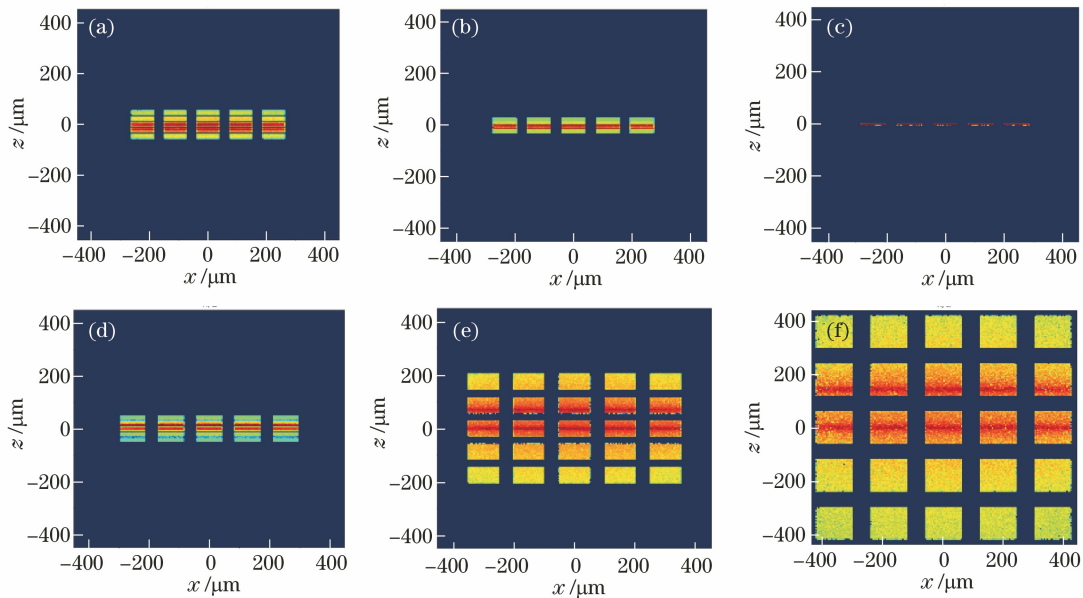


图 3 不同 b 下晶体透射仿真成像的网格图像结果。(a) $b=60.0$ mm ($M_m=0.74$, $M_s=1.87$); (b) $b=70.0$ mm ($M_m=0.86$, $M_s=1.93$); (c) $b=81.1$ mm ($M_m=1.00$, $M_s=2.00$); (d) $b=100.0$ mm ($M_m=1.23$, $M_s=2.12$); (e) $b=160.0$ mm ($M_m=1.97$, $M_s=2.50$); (f) $b=243.3$ mm ($M_m=3.00$, $M_s=3.00$)

Fig. 3 Grid image results of crystal transmission simulation imaging under different b . (a) $b=60.0$ mm ($M_m=0.74$, $M_s=1.87$); (b) $b=70.0$ mm ($M_m=0.86$, $M_s=1.93$); (c) $b=81.1$ mm ($M_m=1.00$, $M_s=2.00$); (d) $b=100.0$ mm ($M_m=1.23$, $M_s=2.12$); (e) $b=160.0$ mm ($M_m=1.97$, $M_s=2.50$); (f) $b=243.3$ mm ($M_m=3.00$, $M_s=3.00$)

3 球面透射晶体加工和成像实验

3.1 球面透射晶体加工

石英晶体在弯曲加工过程中, 其面形和晶格常数不易受应变和温度的影响, 相比其他晶体具有更

优良的弯曲加工性能, 因此这里选择 α -石英(1011) 作为 X 射线衍射晶体, 其晶格常数为 $2d = 0.6687$ nm。为使弯曲晶体成像器后期也能够保持性能稳定, 通常要求衬底材料与晶体一致, 故采用石英玻璃材料作为透射弯晶衬底的材料。加工出厚度

为 10 mm 的圆形玻璃片,利用球面模具磨削使其弯曲半径为 250 mm,中心透射孔直径为 8 mm,外圆直径为 25 mm。利用平面磨削加工将圆形的 α -石英晶体磨至厚度为 0.2 mm 以下的薄片,其外圆直径同样为 25 mm,抛光加工后其表面粗糙度在 100 nm 以下。然后,在特定温度下利用粘贴工艺将 α -石英薄片弯粘贴到玻璃衬底的凹面上,要求面形精度在 10 μm 以下,加工完成后的透射晶体成像器如图 4 所示。



图 4 加工完成的球面透射晶体照片

Fig. 4 Picture of processed spherical transmission crystal

3.2 球面透射晶体 X 射线检测实验

透射晶体检测实验在 Cu 靶 X 射线管装置上进行,按照图 5 布置器件初始位置,使用互补金属氧化物半导体(CMOS)光子探测器作为 X 射线成像检测器件,其像素大小为 55 $\mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$,像素数量为 256 \times 256,感光面积为 14 mm \times 14 mm。选用的被成像物体为网格状的金属薄片,网格可以对光束的强度进行调节。由于采用的 Cu 靶 X 射线源功率偏低,同时在空气中 X 射线强度衰减比较快,会造成

检测器接收的 X 射线信号微弱,因此设计金属网格的通光部分面积大于挡光部分,以确保得到亮度较高的网格图像。透射晶体成像器中心与 X 射线点源距离为 243.3 mm, X 射线源放置在弯曲晶体凸面一侧,入射偏转角为布拉格角,该角度精度是通过在成像器件的定位平面上进行刻线加工来保证的。成像网格物体放置在 X 射线源与弯曲晶体光路中,并布置成背光成像结构,在球面晶体的凹面一侧放置成像检测器件。设置物距 a 为 81.1 mm,则成像系统焦距为 60.8 mm,故成像的准确位置应该在晶体后端距晶体中心 243.3 mm 处。考虑到 X 射线在空气中强度衰减较快,该位置已经不能得到具有较高信噪比的图像,故实际成像实验中分别对像距为 60,70,80,90,100,110,130,160 mm 情况进行了检测,即不断改变像距来观察成像结果的变化状况,可得到具有不同放大比的金属网格图像,如图 6(a)~(f)所示。

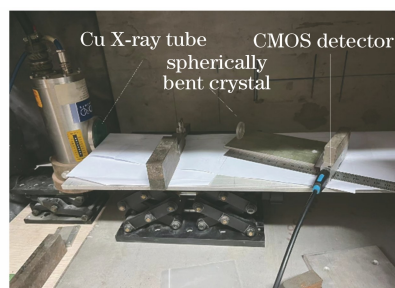


图 5 用铜靶 K_{α} 射线进行球面透射晶体背光成像的实验图

Fig. 5 Experimental diagram of Cu K_{α} backlight imaging with spherical transmission crystal

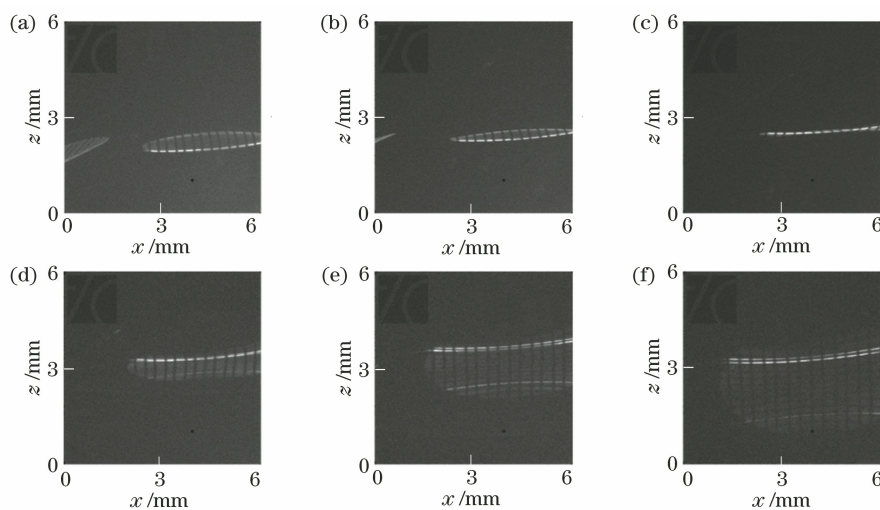


图 6 不同 b 下球面晶体透射成像结果。(a) $b=60$ mm; (b) $b=70$ mm; (c) $b=80$ mm; (d) $b=100$ mm; (e) $b=130$ mm; (f) $b=160$ mm

Fig. 6 Results of spherical crystal transmission imaging under different b . (a) $b=60$ mm; (b) $b=70$ mm; (c) $b=80$ mm; (d) $b=100$ mm; (e) $b=130$ mm; (f) $b=160$ mm

4 分析与讨论

观察图 6 的图像容易看出,在水平方向上网格图像一直在增大,在竖直方向上像距 b 从 60 mm 增加至 70 mm 时图像变窄,在 80 mm 时聚焦成一条线,在 80 mm 以后随着像距的增加,图像整体由窄变宽,网格逐渐向纵横比相同的正方形靠近,这和第 2、3 节的理论和仿真分析结论一致,即子午方向为聚焦成像,弧矢方向为投影成像,表明研制的透射晶体成像系统符合设计要求。图 6 中网格图像有两处异常之处:1) 周边的图像衬度比中心更强,这是由 CMOS 探测器本身缺陷造成的,检测其他谱图也存在这种现象;2) 网格图像排列呈现一定弯曲分布,越靠近边缘越明显,这是透射晶体成像区域偏大造成的,因为成像系统采用的 X 射线管功率较低,故只能设计较大的通光孔径(8 mm)才能得到具有较高信噪比的图像。此外,球面透射晶体的面形精度也有一定的影响。进一步的深入研究工作需要提高器件面形的加工精度,以满足高空间分辨率的 X 射线成像诊断要求。

5 结 论

研究了基于 Laue 式的 X 射线球面弯晶成像系统的典型结构,比较了透射球面弯晶结构与传统反射式结构的异同,分析了透射式球面弯晶成像理论,加工出了石英透射球面弯晶成像器并搭建了由 Cu 靶 X 射线源、金属网格物体和 CMOS 检测器构成的透视式晶体成像系统。推导了成像系统理论计算公式,基于透视式晶体成像系统结构开展了软件仿真分析,并进行了 Cu 靶 X 射线背光成像实验研究,于 CMOS 检测器上获得了金属栅格的图像。对实验结果进行分析可知,球面透射成像的子午方向为聚焦成像,弧矢方向为投影成像,存在一个位置能够获得子午方向与弧矢方向放大倍率相同的图像。由于 X 射线管功率偏低,并且 X 射线在空气中传输过程中衰减严重,得到的图像信噪比没有达到最佳效果,因此后期需要在大型聚变装置和真空环境下进行验证确认,并采用具有更高分辨率的检测器和高表面精度的透射弯晶以获得具有更高空间分辨率的图像。

参 考 文 献

- [1] Gao L, Hill K W, Bitter M, et al. Spatial resolution of a spherical X-ray crystal spectrometer at various magnifications [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D611.
- [2] 姚立, 蒲显东, 韦敏习, 等. 神光 III 原型 X 射线荧光成像原理验证实验 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0634001.
- Yao L, Pu Y D, Wei M X, et al. A proof-of-principle experiment demonstrating X-ray fluorescence imaging at the Shenguang-III prototype laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0634001.
- [3] Stoeckl C, Bedzyk M, Brent G, et al. Soft X-ray backlighting of cryogenic implosions using a narrowband crystal imaging system (invited) [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E501.
- [4] Kim J H, You S J, Seong D J, et al. Electron temperature measurements in plasmas with surface wave absorption and wave cutoff frequency [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(20): 201502.
- [5] Chen H, Bitter M, Hill K W, et al. A high-resolution imaging X-ray crystal spectrometer for high energy density plasmas [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E606.
- [6] Ao T, Schollmeier M, Kalita P, et al. A spherical crystal diffraction imager for Sandia's Z Pulsed Power Facility [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(4): 043106.
- [7] Monot P, Auguste T, Dobosz S, et al. High-sensitivity, portable, tunable imaging X-ray spectrometer based on a spherical crystal and MCP [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2002, 484(1/2/3): 299-311.
- [8] Jahrman E P, Holden W M, Ditter A S, et al. Vacuum formed temporary spherically and toroidally bent crystal analyzers for X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(1): 013106.
- [9] Zhang Z, Nishimura H, Yao A, et al. Note: a Laue crystal imager for high energy quasi-monochromatic X-ray [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(9): 096106.
- [10] Pereira N R, Macrander A T, Stoeckl C, et al. On evaluating X-ray imaging crystals with synchrotron radiation [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 10G126.
- [11] Sinars D B, Cuneo M E, Bennett G R, et al. Monochromatic X-ray backlighting of wire-array z -pinch plasmas using spherically bent quartz crystals [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3):

- 2202-2205.
- [12] Kujala N, Freund W, Liu J, et al. Hard X-ray single-shot spectrometer at the European X-ray free-electron laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(10): 103101.
- [13] 钱凤, 曹磊峰, 肖沙里, 等. 硬 X 射线透射晶体谱仪的设计性能参数[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2292-2296.
- Qian F, Cao L F, Xiao S L, et al. Design parameters of transmission curved crystal spectrometer for hard X-ray diagnoses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2292-2296.
- [14] Faenov A Y, Pikuz T A, Avrutin V, et al. Hard X-ray imaging using free-standing spherically bent crystals[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2224-2227.
- [15] Paternò G, Bellucci V, Camattari R, et al. Design study of a Laue lens for nuclear medicine[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, 48(1): 125-137.
- [16] Underwood J H. X-ray data booklet. Section 4.1 multilayers and crystal [DB/OL]. [2022-01-10]. https://xdb.lbl.gov/Section4/Sec_4-1.html.
- [17] 姚童, 黎森, 施军, 等. 钛靶 X 射线超环面晶体衍射高分辨率聚焦诊断技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2103002.
- Yao T, Li M, Shi J, et al. High-resolution focusing diagnosis technology on Ti-target X-ray diffraction using toroidal crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2103002.