

文章编号 1004-924X(2012)12-2613-06

X 射线单色成像用透射式对数螺线晶体分析器

毋玉芬^{1*}, 肖沙里¹, 鲁建¹, 钱家渝¹, 阳庆国², 黄显斌²

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 中国工程物理研究院 流体物理研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:利用对数螺线晶体在大视场范围内的保角特性, 研究了一种用于等离子体 X 射线单色成像的透射式对数螺线晶体分析器。与反射式弯晶成像谱仪相比, 该分析器具有单能成像视场更大, 实现相同放大倍数时的空间排布简单等优点。根据晶体衍射成像原理及对数螺线晶体的表面方程, 分析了透射式对数螺线晶体分析器的成像原理以及成像性能, 包括子午、弧矢放大倍数以及视场大小等。以铜靶 X 射线源为背光源, 用研制石英晶体透射对数螺线分析器对网丝直径为 100 μm 的金属网格进行了单色背光成像实验。实验结果表明, 晶体分析器的空间分辨力约为 30 μm , 子午和弧矢方向视场分别达到 15.938 7 mm 和 5.900 6 mm。

关键词:等离子体 X 射线; 透射式晶体分析器; 对数螺线; 单色成像

中图分类号: O434.13; TL65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2613

Transmission type logarithmic spiral crystal analyzer for monochromatic X-ray imaging

WU Yu-fen^{1*}, XIAO Sha-li¹, LU Jian¹, QIAN Jia-yu¹, YANG Qing-guo², HUANG Xian-bin²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: youyuanff@sina.com

Abstract: On the basis of the conformal characteristics of a logarithmic spiral crystal in a large field of view (FOV), a new type of transmission crystal analyzer used for X-ray monochromatic imaging was investigated. Compared with a reflection type of crystal analyzer, the logarithmic spiral crystal analyzer has a wider FOV for catching the monochromatic X-ray image and a simple space arrangement for achieving the same magnification. According to the diffraction theory of the crystal and the surface equation of log spiral, the imaging principles and characteristics of the transmission type logarithmic spiral crystal analyzer were researched, including the magnifications in horizontal and vertical directions as well as the FOV sizes. A logarithmic spiral analyzer with a quartz crystal was developed. Then with the proposed analyzer, the monochromatic backlighting experiment for the mesh grid with a diameter of 100 μm was carried out by taking an X-ray source of Cu target as the backlighter. The

收稿日期: 2012-05-11; 修订日期: 2012-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目 (No. 10976033)

experimental results show that the FOVs of the transmission type logarithmic spiral crystal analyzer are 15.938 7 mm and 5.900 6 mm in horizontal and vertical directions, respectively. Furthermore, the spatial resolution of the analyzer is at least 30 μm under a source diameter of 110 μm .

Key words: plasma X-ray; transmission type crystal analyzer; logarithmic spiral; monochromatic imaging

1 引言

在激光惯性约束聚变 (Inertially Confinement Fusion, ICF) 及 Z 箍缩聚爆实验中, 研究聚变及聚爆过程中产生的高温等离子体的状态信息具有重要意义^[1-2]。弯曲晶体分析器以及以弯晶分析器作为核心光学元件的 X 射线谱仪, 是高温等离子体状态检测中常用的 X 射线光谱分析及成像器件^[3-4]。等离子体 X 射线弯晶成像谱仪通常采用反射式布拉格结构。其中, 球面弯晶谱仪的布拉格角要尽量大于 80° 以减小成像像差; 超环面弯晶虽解决了球面弯晶在小布拉格角成像时的像差问题, 但超环面晶体固有的高阶像差及晶体衍射效率问题却限制了其实际应用^[5]。此外, 采用球面弯晶的成像器件进行单能成像时的视场范围有限^[6], 且反射式的成像结构常会限制探测器的空间排布^[7]。为解决传统弯晶器件用于单能成像时视场范围有限的问题, 有学者采用反射式对数螺线晶体实现 Z 箍缩等离子体的单色成像^[8-9], 但该反射式成像结构中需要配置针孔, 这会减小系统的成像效率。目前已有的关于对数螺线晶体的文献中, 该类型晶体仍多用于实现 X 射线分光, 如反射式的布拉格分光光谱仪^[10] 及透射式的 Laue 晶体分光计^[11], 而将对数螺线晶体分析器应用于等离子体 X 射线透射成像的研究尚未见报道。

为实现等离子体 X 射线在大视场范围内的单能成像, 并解决反射式成像谱仪空间排布受限的问题, 本文利用对数螺线晶体在大视场范围内的保角特性, 研制了一种用于等离子体 X 射线单色成像的透射式对数螺线晶体分析器。

2 透射式对数螺线晶体成像原理

2.1 成像原理

晶体对 X 射线进行衍射成像时, 首先要满足

布拉格衍射条件, 即 $2d\sin\theta = n\lambda$, 其中 d 是晶体材料的晶面间距, θ 是入射光线与晶面的夹角, λ 为待测 X 射线波长, n 是衍射级次。X 射线入射到晶面上, 波长满足布拉格衍射条件时才能被晶面衍射, 得到相干衍射像。

柱面及球面弯曲晶体用于单色成像时, 受晶体摇摆曲线的限制, 实际起衍射作用的晶片面积很小, 从而影响了晶体分析器的视场^[6]。根据对数螺线的几何特性, 极点与螺线上任一点的连线 (向径) 和该点切线永远保持固定的角度, 将晶体材料在子午平面内弯曲成对数螺线形。当极点处有 X 射线源发射 X 光到晶片表面时, 入射光线与晶片表面各处切面所成的角均相同。在透射方向, 入射光线与衍射晶面所成的角也为定角, 将该角设为布拉格角 θ , 则满足衍射条件的 X 光将被晶面衍射, 从而在晶体后方的成像板上得到单色 X 射线衍射像。图 1 是透射式对数螺线晶体 X 射线背光成像示意图。

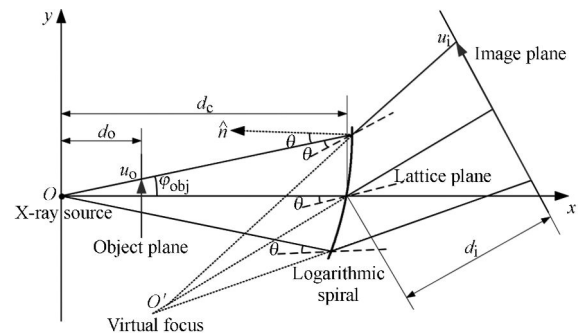


图 1 透射式对数螺线晶体背光成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission type logarithmic spiral crystal for X-ray backlighting imaging

图 1 中, 虚线表示 X 射线透射衍射时参与作用的晶格平面, 这些晶格平面与入射光线之间的夹角为布拉格角 θ 。图中法线方向 \hat{n} 是晶片的表面法线, 入射线与晶片表面法线之间的夹角也等于 θ , 该角可用于确定对数螺线方程。极点发出

的 X 射线经晶体衍射后,将置于光源与晶体分析器光路上的网格目标,投影到距晶体中心 d_i 且垂直于晶体中心处衍射光线的 X 射线成像板上,从而在该成像板上得到放大的网格单能谱像。

根据图 1 可知,在空间极坐标系下对数螺线晶体的表面方程可描述为:

$$r(\varphi, \delta) = d_c e^{\varphi \tan \theta} \cos^{-1} \delta, (-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0, -W/2 \leq r(\varphi, \delta) \sin \delta \leq W/2), \quad (1)$$

式中: $\varphi_0 = \cot \theta \log \{ (2d_c)^{-1} [L \sin \theta + (4d_c^2 + L^2 \sin^2 \theta)^{1/2}] \}$, θ 为布拉格入射角, d_c 是光源极点到晶体中心的距离, L 是晶体分析器子午方向的弧长, W 为晶体分析器的宽度, δ 是入射光线与 xOy 平面的夹角。

2.2 晶体分析器成像性能分析

当成像板距晶体中心 d_i , 且垂直晶体中心处的衍射光线放置时,在水平方向通过光学追迹计算得到物平面上点 u_o , 及其对应的像平面上点 u_i 的表达式如下:

$$u_o = d_o \tan \varphi, \quad (2)$$

$$u_i = [d_c \sin(2\theta + \varphi) \csc \varphi - d_c e^{\varphi \tan \theta} \sin 2\theta \csc \varphi + d_i] \tan \varphi, \quad (3)$$

式中: d_o 和 d_i 分别是物平面到 y 轴, 以及像平面到晶体中心的距离。通过式(2)和式(3)推导出晶体分析器子午(水平)方向的成像放大倍数为:

$$M_h(\varphi) = \frac{du_i}{du_o} = \frac{du_i}{d\varphi} \left(\frac{du_o}{d\varphi} \right)^{-1} = d_o^{-1} [d_c \cos 2\theta - d_c e^{\varphi \tan \theta} \sin 2\theta \sec \theta \sin(\theta + \varphi) + d_i]. \quad (4)$$

结合图 1 和式(4)可知,透射式对数螺线晶体分析器子午方向的光线的虚“焦点” O' 非完全聚焦,得到的单能衍射像在子午方向的放大倍数不是常数值,存在一定像差,但可根据式(4)对得到的单能像进行消像差图像处理,从而得到不失真的像。

在弧矢(垂直)方向,由于晶体分析器未做弯曲处理,入射到晶体分析器同一竖直平面内的光线经晶面衍射后,其反向延长线完全聚焦于一点,如图 2 所示,故晶体分析器弧矢方向的放大倍数为:

$$M_v(\varphi) = \frac{d_i(\varphi) + f(\varphi)}{d_o \sec \varphi} = \frac{d_i(\varphi) + r(\varphi, 0)}{d_o \sec \varphi} = d_o^{-1} [d_c \cos 2\theta - 2d_c e^{\varphi \tan \theta} \sin \theta \sin(\varphi - \theta) + d_i], \quad (5)$$

图 2 和式(5)中: $f(\varphi)$ 是弧矢焦点到晶体上

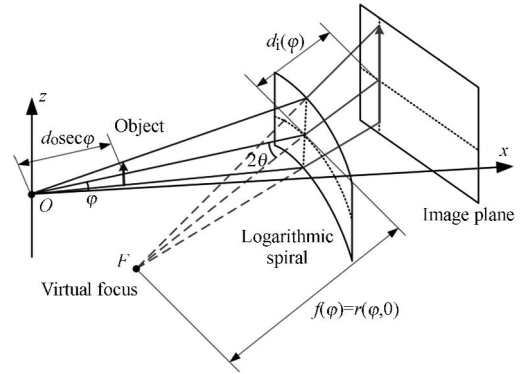


图 2 透射对数螺线晶体弧矢方向成像示意图
Fig. 2 Schematic diagram of log spiral crystal for X-ray backlight imaging in sagittal plane

$r(\varphi, 0)$ 点的距离, $d_i(\varphi)$ 是 φ 角入射光线对应的出射光线在 xOy 平面内的投影, $d_i(\varphi)$ 的值由入射角 φ 决定,其表达式为:

$$d_i(\varphi) = [d_c \cos 2\theta - d_c e^{\varphi \tan \theta} \cos(\varphi - 2\theta) + d_i] \sec \varphi. \quad (6)$$

结合图 1、图 2 以及放大倍数公式(4)和(5)可知,分析器子午和弧矢方向的放大倍数均随像距 d_i 的增大而增加,同时减小物体到光源的距离 d_o , 也会增大放大倍数。因此,成像板的实际放置位置需综合考虑系统放大倍数及等离子体实验装置的空间位置而定。

透射式对数螺线分析器的成像视场(Field of View, FOV)由晶体分析器的几何尺寸决定,结合图 1 和图 2 可知,在子午和弧矢方向的成像视场分别为:

$$F_m = 2d_o \tan \varphi_0, \quad (7)$$

$$F_s = d_o W d_c^{-1} \sec \varphi e^{-\varphi \tan \theta}, \quad (8)$$

式(8)中,为保证弧矢方向发散光线的入射角满足布拉格条件,晶体分析器弧矢宽度应不大于晶体摇摆曲线半高宽 $\Delta\theta$ 确定的最大宽度值 W_m , 即:

$$W \leq W_m \approx 2d_c \sqrt{2 \cot \theta \Delta \theta}. \quad (9)$$

3 透射对数螺线晶体背光成像实验

根据所述原理,本文研制了石英晶体透射对数螺线分析器,并对所研制的晶体分析器进行了 X 射线背光成像实验。单色背光成像实验在 X 射线衍射仪上进行,铜靶 X 射线衍射仪的特征谱线波长为 0.154 nm,选择石英晶体的(1010)面作

为衍射平面,由晶格常数 $2d=0.8512\text{ nm}$ 及射线源特征波长计算出布拉格角为 10.42° ,制作的透射对数螺线晶体分析器各参数及实验数据见表 1。其中,实验的射线源负载电流为 0.7 mA ,电压为 35 kV 。由于射线源电流较弱,单发实验成像胶片的曝光时间设置为 10 min 。图 3 是研制的透射式对数螺线石英晶体分析器实物图。

表 1 透射式对数螺线晶体分析器参数及单色背光成像实验数据

Tab. 1 Parameters of log spiral crystal analyzer and experiment setup

X-ray source parameters		Value
Emission line		Cu K α
Source wavelength/ $\times 10^{-10}$		1.54
Source diameters/ μm		110
Imaging hardware parameters		
Crystal		Quartz (1010)
$2d/\times 10^{-10}$		8.512
Reflection order		1
Bragg angle/ $^\circ$		10.42
Object to pole distance/mm		40
Pole to crystal distance/mm		100
Crystal to image distance/mm		78
Crystal aperture	Length/mm	40
	Width/mm	15
System magnification	Pole angle φ_0/rad	0.196 7
	Meridian	4.123
FOV/mm	Sagittal	4.45
	Meridian	15.938 7
	Sagittal	5.900 6

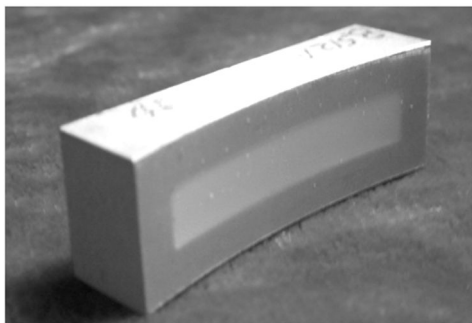


图 3 透射式石英晶体对数螺线分析器

Fig. 3 Transmission type log spiral crystal analyzer

实验所用的金属网格网丝的直径约为 $100\ \mu\text{m}$ 。图 4 是采用点发射背光法得到的网格图像

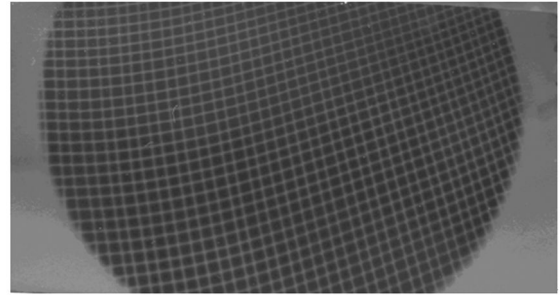
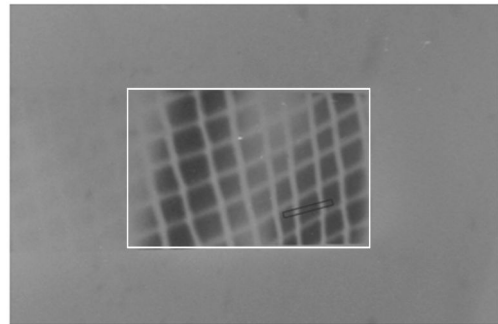


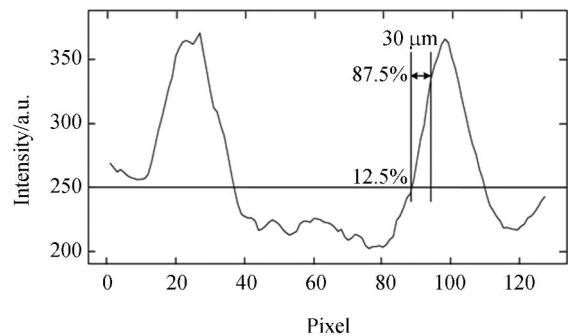
图 4 点发射背光法得到的网格原图像

Fig. 4 Image of mesh grid by point-projection method



(a) 透射式对数螺线晶体分析器得到的网格单能衍射像

(a) Monochromatic image of mesh grid with transmission type log spiral crystal



(b) 子午方向局部图像谱线强度与像素相应分布

(b) Distribution of spectral intensity and pixel in the meridian direction

图 5 实验结果

Fig. 5 Experiment results

(即网格直接置于点光源和成像探测器之间)。由图 4 可以看出,由于制作网格时各边界点的牵拉力不均匀,网孔形状有一定变形,不再是规则的方孔。

图 5(a)是透射式对数螺线晶体分析器获取

的原始 X 射线单能衍射图像,图像由柯达胶片探测器记录并经扫描后转换为数字图像。结合晶体分析器的尺寸,成像实验参数和图 5(a)可知,透射单能成像时对数螺线晶体分析器子午和弧矢方向的视场分别为 15.938 7 和 5.900 6 mm。图 5(a)中,局部像强度较弱,其原因可能是晶体局部线形的不完善以及晶体分析器布置时位置的偏差造成的。利用 Winview32 软件对所得图像进行数据处理,得到沿子午方向的部分图像(图 5(a)中矩形框标注部分)的谱线相对强度与像素位置相应关系,如图 5(b)所示。为得到晶体分析器的单能谱成像空间分辨力,需计算图像的半峰全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)。由图 5(b)可以看出,单能衍射图像的 FWHM 约为 5 pixel,所用成像胶片的像素尺寸为 25 μm ,结合图像放大倍数,得到所研制的透射对数螺线晶体分析器的空间分辨力约为 30 μm 。

参考文献:

- [1] XIAO D L, DING N, NING CH, *et al.*. Numerical investigation on the X-ray production of aluminum-wire-array Z-pinch implosion [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(2): 686-694.
- [2] GLENZER S H, FOURNIER K B, DECKER C, *et al.*. Accuracy of K-shell spectra modeling in high-density plasmas [J]. *Physical Review E*, 2000, 62(2): 2728-2738.
- [3] 施军,肖沙里,王洪建,等. 氩气 Z 箍缩内爆等离子体温度诊断 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1819-1824.
- SHI J, XIAO SH L, WANG H J, *et al.*. Argon-puff Z-pinch implosion plasma temperature diagnosis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1819-1824. (in Chinese)
- [4] 刘利锋,肖沙里,毋玉芬,等. 球面弯曲晶体在 X 射线背光成像的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2023-2028.
- LIU L F, XIAO SH L, WU Y F, *et al.*. Application of spherically bent crystal to X-ray backlight imaging experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2023-2028. (in Chinese)
- [5] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, *et al.*. Monochromatic x-ray imaging experiments on the Sandia National Laboratories Z facility (invited) [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75(10): 3672-3677.
- [6] WITTRY D B, BARBI N C. X-ray crystal spectrometers and monochromators in microanalysis [J]. *Microsc. and Microanal.*, 2001, 7: 124-141.
- [7] GAMBOA E J, MONTGOMERY D S, HALL I M, *et al.*. Imaging X-ray crystal spectrometer for laser-produced plasmas [J]. *JINST*, 2011, 6(P04004): 1-13.
- [8] YANG Q G, LI Z R, PENG Q X, *et al.*. K-shell emission x-ray imaging of z-pinch plasmas with a pinhole and a logarithmic spiral crystal [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, 82(093301): 093301-1-093301-5.
- [9] 毋玉芬,肖沙里,阳庆国,等. 基于对数螺线晶体 Z 箍缩铝等离子体单色成像研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0215003-1-0215003-5.
- WU Y F, XIAO SH L, YANG Q G, *et al.*. Monochromatic imaging of Z-pinch Al plasma based on the logarithmic spiral crystal [J]. *Chinese Journal*

4 结 论

本文研究了一种透射式对数螺线晶体分析器,用于获取 ICF 聚爆靶丸及 Z 箍缩等离子体的 X 射线单能谱像。理论分析了其成像原理及成像性能,采用铜靶 X 射线源作为背光源,对网丝直径为 100 μm 的金属网格进行了单色背光成像实验。通过透射对数螺线晶体分析器的衍射,在 X 射线成像胶片上得到了网格的单能谱像,单色成像时晶体分析器子午和弧矢方向的视场分别达到 15.938 7 和 5.900 6 mm,初步验证了透射式对数螺线晶体分析器在大视场范围内的单色成像能力;在光源尺寸为 110 μm 的条件下,分析器的空间分辨力约为 30 μm 。

下一步工作将致力于改进晶体分析器的设计及表面加工工艺,避免实验图像出现局部光强分布不均匀等问题。此外,将对网丝直径更小的金属网格进行成像实验,检验透射式对数螺线晶体分析器的最小空间分辨能力。

of Lasers, 2012, 39(2): 0215003-1-0215003-5. (in Chinese)

- [10] WITTRY D B, CHANG W Z, LI R Y. X-ray optics of diffractors curved to a logarithmic spiral [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(5): 3534-3540.

- [11] KUJALA N G, KARANFIL C, BARREA R A. High resolution short focal distance bent crystal Laue analyzer for copper K edge x-ray absorption spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, 82(063106): 063106-1-063106-7.

作者简介:



毋玉芬(1982—),女,河南焦作人,博士,2005年、2008年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要从事X射线光学及弯晶成像谱学方面的研究。E-mail: youyuanff@sina.com



鲁建(1988—),男,安徽安庆人,博士研究生,2010年于重庆大学获得学士学位,主要从事X射线探测及成像技术的研究。E-mail: 20100802020@cqu.edu.cn



钱家渝(1955—),男,重庆人,技师,主要从事仪器加工制作的研究。E-mail: qianjiayucqu@163.com



阳庆国(1979—),男,湖南人,博士,副研究员,主要从事Z箍缩等离子体X射线谱线和成像技术的研究。E-mail: yungore@163.com



黄显斌(1977—),男,四川富顺人,硕士研究生,主要从事Z箍缩等离子体理论及实验研究。E-mail: caephxb2003@yahoo.com.cn

导师简介:



肖沙里(1953—),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,在重庆大学光电工程学院分别获得工学硕士、工学博士学位,主要从事光电探测、X射线探测等方面的研究。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn