

# 对数螺旋型劳厄弯晶的 X 射线单色成像应用

毋玉芬<sup>1</sup> 肖沙里<sup>1</sup> 鲁建<sup>1</sup> 钱家渝<sup>1</sup> 刘利锋<sup>1</sup> 黄显宾<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院流体物理研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 利用劳厄晶体研究了 X 射线的单色衍射性质, 研究了对数螺旋型劳厄弯晶在等离子体 X 射线单色成像中的应用。根据光线追迹原理及对数螺旋线的表面方程, 研究了对数螺旋型劳厄弯晶的单色成像原理, 分析了单色衍射像不受透射白光 X 射线影响的准则, 以及子午、弧矢放大倍数和单色成像视场等性能参数。研制了石英晶体 (1010) 对数螺旋劳厄弯晶分析器, 以铜靶 X 射线源作为背光源, 对网丝直径为 50  $\mu\text{m}$  的金属网格进行了单色背光成像实验。实验结果表明, 当背光源尺寸为 110  $\mu\text{m}$  时, 对数螺旋型劳厄弯晶的空间分辨力约为 11.9  $\mu\text{m}$ , 分析器在子午和弧矢方向的视场分别达到 22.3557 mm 和 8.2602 mm。

**关键词** 光谱学; 劳厄弯晶; 对数螺旋; X 射线; 单色成像; 等离子体

**中图分类号** O434.13; TL65 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0615001

## Logarithmic Spiral Bent Laue Crystals for X-Ray Monochromatic Imaging Applications

Wu Yufen<sup>1</sup> Xiao Shali<sup>1</sup> Lu Jian<sup>1</sup> Qian Jiayu<sup>1</sup> Liu Lifeng<sup>1</sup> Huang Xianbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

<sup>2</sup> Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Taking advantages of the monochromatic X-ray diffraction property of Laue crystals, an innovative use of logarithmic spiral bent Laue crystals for X-ray monochromatic imaging is investigated. According to the ray tracing method and the surface equation of the logarithmic spiral, the imaging principles and characteristics of the logarithmic spiral bent Laue crystals are studied, including the condition that the diffracted beam can be separated from the transmitted beam, the magnifications and the field of view (FOV). A logarithmic spiral bent quartz (1010) Laue crystal analyzer is developed. With the proposed crystal analyzer, the monochromatic backlight imaging experiment for the mesh grid with a diameter of 50  $\mu\text{m}$  is carried out by taking an X-ray source of Cu target as the backlighter. The experimental results show that the spatial resolution of the analyzer is approximately 11.9  $\mu\text{m}$  under a source diameter of 110  $\mu\text{m}$ . Furthermore, the FOVs of the crystal analyzer are 22.3557 mm and 8.2602 mm in horizontal and vertical directions, respectively.

**Key words** spectroscopy; Laue crystal; logarithmic spiral; X-ray; monochromatic imaging; plasma

**OCIS codes** 300.6560; 340.7440; 340.7480; 350.5400

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)是实现可控核聚变的重要方式,在惯性约束聚变实验中产生的等离子体 X 射线,包含了如电子温度、电子密度以及不稳定性等特征状态参数信息<sup>[1,2]</sup>,因而开展聚变靶丸等离子体 X 射线测谱及成像诊断具有重要意义<sup>[3,4]</sup>。以弯曲晶体分析器为核心光学元件的 X 射线成像谱仪,是等

离子体 X 射线光谱分析及成像诊断的常用器件<sup>[5~7]</sup>。已有的等离子体 X 射线弯晶成像谱仪通常采用反射式的布拉格结构,如球面及超环面弯晶成像谱仪<sup>[8,9]</sup>。其中,球面弯晶成像谱仪的布拉格角要尽量大于 80°以减小成像差;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,但其固有的高阶像差,六维调节难度以及晶体衍射效

**收稿日期**: 2013-02-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(NSAF10976033)资助课题。

**作者简介**: 毋玉芬(1982—),女,博士研究生,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

**导师简介**: 肖沙里(1953—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事软 X 射线光谱诊断与分析方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn(通信联系人)

率等问题却限制了其实际应用<sup>[10]</sup>。此外,球面弯晶成像器件用于单能成像时的视场范围有限<sup>[11]</sup>,且反射式的成像结构常会限制探测器的空间排布<sup>[12]</sup>。

与反射式弯晶成像谱仪相比,劳厄晶体成像采用透射式的成像结构,能够解决探测器的空间排布问题,且透射式成像更适用于高能 X 射线探测。将劳厄晶体在子午平面按照对数螺旋线形进行弯曲,得到的透射式弯晶分析器能够保证在大立体角范围内的等角特性<sup>[13]</sup>,从而具有较大的单色成像视场。目前关于对数螺旋型劳厄弯晶的研究,多用于实现 X 射线分光<sup>[14,15]</sup>及生物医学领域的 X 射线荧光成像和相衬成像<sup>[16,17]</sup>,而将对数螺旋型劳厄弯晶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。

针对反射式弯晶成像谱仪存在的问题,本文研究了透射式对数螺旋型劳厄弯晶分析器在等离子体 X 射线成像中的应用。与反射式弯晶成像谱仪相比,对数螺旋型劳厄弯晶分析器具有更大的单色成像视场,透射式的成像结构能够解决成像探测器空间排布受限的问题,且更适用于 ICF 中高能 X 射线信息的诊断。

## 2 透射式对数螺旋型晶体成像原理分析

### 2.1 成像原理

晶体对 X 射线进行衍射成像时,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, $\theta$  是入射光线与晶面的夹角, $\lambda$  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。

根据对数螺旋线的几何特性,将晶体材料在子午平面内弯曲成对数螺旋形,极点与螺线上任一点的连线和该点切线永远保持固定的角度。图 1 是透射式对数螺旋型劳厄弯晶 X 射线背光成像示意图,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,将该角设定为布拉格角  $\theta$ ,则满足衍射条件的 X 光将被晶面衍射,从而在晶体后方的探测器上,得到单色 X 射线衍射像。

图 1 中待测目标物体置于极点处光源与透射式对数螺旋晶体分析器之间,光源发出的 X 射线经晶体衍射后,将目标物体的单色衍射像投影到晶体后方的 X 射线成像探测器上。

在空间极坐标系下,对数螺旋型劳厄弯晶的表

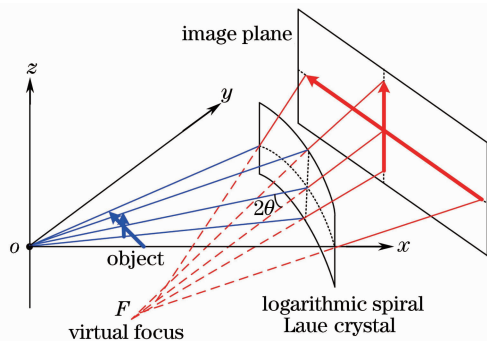


图 1 透射式对数螺旋型劳厄弯晶背光成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of logarithmic spiral bent Laue crystal for X-ray backlight imaging

面方程可描述为

$$r(\varphi, \delta) = d_c \exp(\varphi \tan \theta) \arccos \delta, \quad (1)$$

$$(0 \leq \varphi \leq \varphi_0, -W/2 \leq r(\varphi, \delta) \sin \delta \leq W/2)$$

式中  $\varphi_0 = \cot \theta \lg(1 + Ld_c^{-1} \sin \theta)$ ,由弯晶分析器子午方向的弧长  $L$  决定, $d_c$  是光源到晶体长度方向边界的距离, $W$  为晶体分析器的宽度, $\delta$  是入射光线与  $xoy$  平面的夹角。(1) 式可用于实现对数螺旋型劳厄弯晶分析器衬底材料的数控加工。

### 2.2 成像探测器位置选取

对数螺旋型劳厄弯晶对 X 射线进行衍射成像时,除单色衍射光外,部分白光 X 射线也将穿透晶体到达成像一侧,如图 2 中虚线所示。在透射白光 X 射线与单色衍射光交叠部分,被测物体的局部或全部衍射像将被穿透的白光 X 射线湮没,因此要合理选择成像探测器到晶体中心的距离  $d_i$ ,使得到的单色衍射像不受透射白光 X 射线的干扰。

实际成像时,为避免透射白光 X 射线对单色衍射像的干扰,成像探测器到晶体中心的距离  $d_i$  必须大于图 2 所示  $d_{i0}$ , $d_{i0}$  是衍射光线能够与透射白光 X 射线完全分开的最短距离:

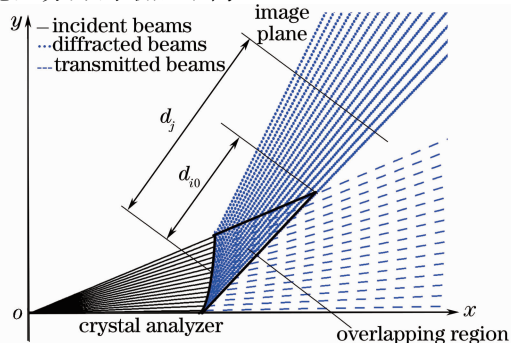


图 2 对数螺旋型劳厄弯晶子午方向成像光路图

Fig. 2 Schematic diagram of logarithmic spiral bent Laue crystal for X-ray backlight imaging in meridian plane

$$d_{i0} = \left[ \frac{\tan \varphi_0 \sec 2\theta \cos(\varphi_0/2)}{\tan 2\theta - \tan \varphi_0} + \cos\left(2\theta + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \exp\left(\frac{\varphi_0}{2} \tan \theta\right) \cos 2\theta \right] d_c. \quad (2)$$

可由单色衍射光下边界与透射白光 X 射线上边界的交点给出。

### 2.3 晶体分析器成像性能分析

对数螺旋型劳厄弯晶的表面方程及成像探测器位置确定后,可通过光线追迹原理确定弯晶分析器在子午和弧矢方向的成像放大倍数及单色成像视场。

为简化计算,假设待测物平面垂直于  $x$  轴(极径)放置,成像探测器检测平面与弯晶分析器中心处( $\varphi = \varphi_0/2, \delta = 0$ )的衍射光线垂直。通过光学追迹计算,得到物平面上点( $y_0, z_0$ )及其对应的像平面上点( $y_i, z_i$ )的表达式为

$$\begin{cases} y_0 = d_0 \tan \varphi \\ y_i = \left[ r\left(\frac{\varphi_0}{2}, 0\right) \sin\left(2\theta + \varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) - r(\varphi, 0) \sin 2\theta \right] \sec\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) + d_i \tan\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right), \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} z_0 = d_0 \sec \varphi \tan \delta \\ z_i = \frac{d_i(\varphi) + r(\varphi, 0)}{d_0 \sec \varphi} z_0, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $d_0$  是物平面到  $y$  轴距离,  $d_i(\varphi)$  是以  $\varphi$  角入射的光线对应的出射光线在  $xoy$  平面内的投影,其表达式为

$$d_i(\varphi) = \left[ d_c \exp\left(\frac{\varphi_0}{2} \tan \theta\right) \cos 2\theta - d_c \exp(\varphi \tan \theta) \cos\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2} - 2\theta\right) + d_j \right] \sec\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right). \quad (5)$$

通过(3)式和(4)式推导出晶体分析器子午(水平)和弧矢(竖直)方向成像放大倍数分别为

$$M_h(\varphi) = \frac{du_i}{du_0} = \frac{du_i}{d\varphi} \left( \frac{du_0}{d\varphi} \right)^{-1} = d_0^{-1} \left[ d_c \exp\left(\frac{\varphi_0}{2} \tan \theta\right) \cos 2\theta - d_c \exp(\varphi \tan \theta) \sin 2\theta \sec \theta \sin\left(\theta + \varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) + d_j \right] \sec^2\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

$$M_v(\varphi) = \frac{dz_i}{dz_0} = d_0^{-1} \left[ d_c \exp\left(\frac{\varphi_0}{2} \tan \theta\right) \cos 2\theta - 2d_c \exp(\varphi \tan \theta) \sin \theta \sin\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2} - \theta\right) + d_i \right] \sec\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \varphi. \quad (7)$$

结合图 1 和图 2,以及放大倍数公式(6)式和(7)式可知,分析器子午和弧矢方向的放大倍数均随像距  $d_j$  的增加而增大。同时,减小物体到光源的距离  $d_0$ ,也会使放大倍数增大。

透射式对数螺旋型劳厄弯晶分析器的成像视场(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  $F_m$  和  $F_s$  分别为

$$F_m = d_0 \tan \varphi_0, \quad (8)$$

$$F_s = d_0 W d_c^{-1} \sec \varphi \exp(-\varphi \tan \theta). \quad (9)$$

### 3 对数螺旋型劳厄弯晶分析器研制

根据所述原理研制了透射式对数螺旋型劳厄弯晶分析器。晶体分析器采用  $\alpha$  石英晶体(1010)作为衍射材料,  $\alpha$  石英晶体具有较好的光学特性,且具有一定的塑性变形能力,相对其他晶体具有更好的韧性,是常用的 X 射线衍射晶体。弯晶分析器衬底材

料利用数控机床加工而成,衬底上的通孔尺寸即晶体分析器有效作用面积为  $40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。石英晶体薄片置于凹凸折弯机上进行塑性弯曲,对数螺旋形的凹面和凸面钢块精确地决定了晶体的曲率半径。最后将弯曲后的晶片粘贴在对数螺旋形的衬底上。加工好的  $\alpha$  石英对数螺旋型劳厄弯晶分析器实物如图 3 所示。

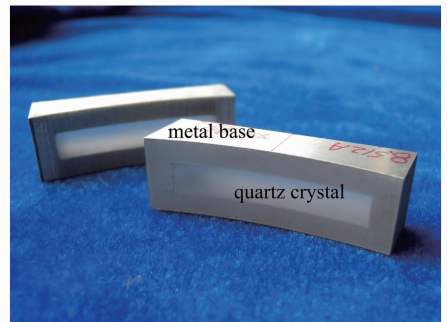


图 3 对数螺旋型劳厄弯晶分析器

Fig. 3 Logarithmic spiral bent Laue crystal analyzer

## 4 X 射线背光成像实验

### 4.1 背光成像实验平台构建

为验证对数螺旋型劳厄弯晶分析器的成像性能,用所研制的晶体分析器对金属网格进行了单色背光成像实验。实验采用牛津公司微焦点铜靶 X 射线衍射仪作为背光源,光源焦斑直径约为  $110\ \mu\text{m}$ ,衍射仪的特征谱线波长为  $0.154\ \text{nm}$ ,结合石英晶体衍射平面的晶格常数  $2d=0.8512\ \text{nm}$ ,确定了对数螺旋型劳厄弯晶分析器的布拉格角为  $10.42^\circ$ 。实验时 X 射线衍射仪负载电流  $0.7\ \text{mA}$ ,电压为  $35\ \text{kV}$ 。图 4 是单色背光成像平台实物图。

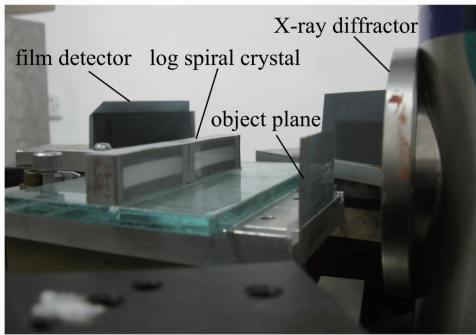


图 4 单色背光成像实验平台

Fig. 4 Experimental platform of monochromatic backlight imaging

实验时,以铜靶 X 射线衍射仪的微焦斑处作为对数螺旋晶体分析器的极点,采用三维定位装置调整并校准晶体分析器的位置坐标,在 X 射线源与晶体分析器之间放置被测金属网格,经晶体分析器衍射的网格单色像由置于晶体后的柯达胶片探测器记录。实验时胶片探测器的曝光时间设定为  $8\ \text{min}$ 。实验具体参数见表 1。

表 1 对数螺旋型劳厄弯晶分析器单色背光成像实验数据  
Table 1 Parameters of monochromatic backlight imaging experiment for logarithmic spiral bent Laue crystal analyzer

Parameters	Value
Crystal	Quartz $10\bar{1}0$
Bragg angle / ( $^\circ$ )	10.42
Object to pole distance/mm	56
Pole to crystal distance/mm	100
Crystal to image distance/mm	135
length /mm	40
Crystal aperture width /mm	15
pole angle $\varphi_0$ /rad	0.3798

### 4.2 实验结果及成像器空间分辨力

实验时所用金属网格实物见于图 5(a),其网丝直径为  $50\ \mu\text{m}$ ,网格周期  $200\ \mu\text{m}$ 。同时作为对比,

图中给出了两根直径约  $70\ \mu\text{m}$  的发丝。图 5(b)是经对数螺旋型劳厄弯晶分析器衍射后,胶片探测器上得到的网格单色衍射像。

根据背光成像实验的各个参数,利用成像系统放大率公式(6)式和(7)式,得到晶体中心点子午和弧矢两个方向的放大率  $M_h=3.818$ ,  $M_v=4.125$ 。根据(8)式和(9)式,可以得到背光成像时子午和弧矢方向的 FOV 分别为  $F_m=22.3557\ \text{mm}$ ,  $F_s=8.2602\ \text{mm}$ 。

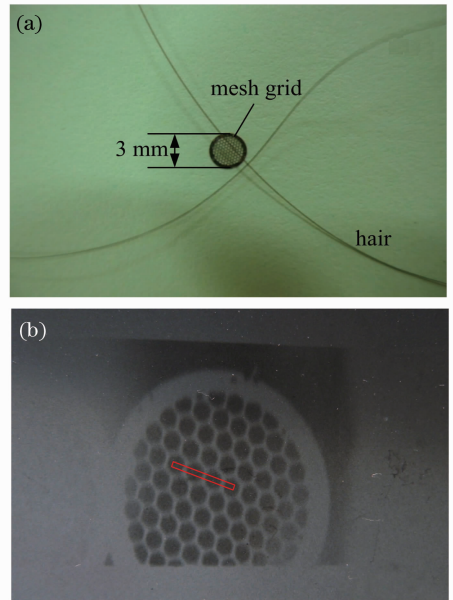


图 5 (a)背光实验所用金属网格;(b)对数螺旋型劳厄弯晶分析器得到的网格单色衍射像

Fig. 5 (a) Mesh grid used in experiment; (b) monochromatic diffraction image of mesh grid by logarithmic spiral bent Laue crystal analyzer

利用 Winview32 软件对所得图像进行数据处理,得到沿子午方向部分图像[图 5(b)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

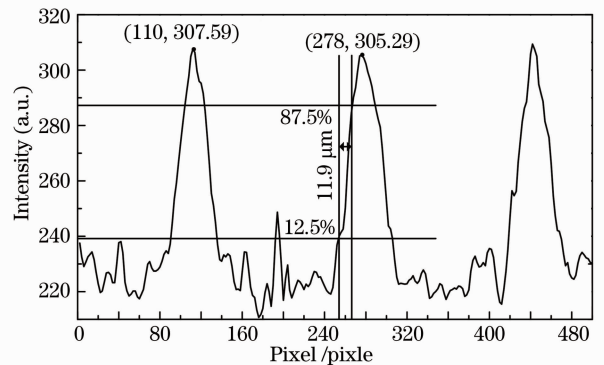


图 6 图 5(a)局部图像的谱线强度与像素相应分布

Fig. 6 Distribution of spectral intensity versus pixel of local image in Fig. 5(a)

图 6 所示。成像系统的空间分辨率可以用图像的上升沿半峰全宽(FWHM)来估算。由图 6 可以看出, 网格的一个峰值周期内约有 168 pixel, 结合网格周期尺寸 200  $\mu\text{m}$  可知, 每个像素所占尺寸约为 1.19  $\mu\text{m}$ 。图中单色衍射图像的 FWHM(网丝峰值边沿延展的 12.5% 到 87.5%<sup>[18]</sup>) 约为 10 pixel, 结合每个像素点的尺寸, 得到成像系统的空间分辨力约为 11.9  $\mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

研究了一种对数螺旋型劳厄弯晶分析器, 用于获取等离子体 X 射线单能谱图像, 理论分析了其成像原理及成像性能。制作了石英晶体对数螺旋劳厄弯晶分析器, 采用铜靶 X 射线源作为背光源, 对网丝直径为 50  $\mu\text{m}$  的金属网格进行了单色背光成像实验。通过对数螺旋型劳厄弯晶的衍射, 在 X 射线成像探测器上得到了网格的单能谱像。单色成像时, 在光源尺寸为 110  $\mu\text{m}$  的条件下, 分析器空间分辨力至少达到 11.9  $\mu\text{m}$ , 晶体分析器子午和弧矢方向的视场分别达到 22.3557 mm 和 8.2602 mm。实验结果初步验证了对数螺旋型劳厄弯晶在大视场范围内的单色成像能力。

弯曲晶体用于单色背光成像时的理论空间分辨力能够达到几个微米<sup>[19]</sup>, 实际空间分辨力受背光源尺寸及成像放大倍数的影响<sup>[18]</sup>。在 ICF 装置中, 采用微米量级的高功率 X 箍缩作为背光源, 可实现对聚爆靶丸的微米量级单色成像。在大装置上的实验将在下一步工作中进行。

## 参 考 文 献

- 1 S. Glenzer, K. Fournier, C. Decker *et al.*. Accuracy of K-shell spectra modeling in high-density plasmas[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(2): 2728~2738
- 2 D. Xiao, N. Ding, C. Ning *et al.*. Numerical investigation on the X-ray production of aluminum-wire-array Z-pinch implosion [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2011, **39**(2): 686~694
- 3 Liu Lifeng, Xiao Shali, Wu Yufen *et al.*. Study of X-ray backlight imaging based on spherically bent quartz crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0815001
- 4 刘利锋, 肖沙里, 毋玉芬等. 基于石英球面弯曲晶体的 X 射线成像研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0815001
- 5 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptical crystal spectrometer researched for Z-pinch plasma X-ray by using Au-wire array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 685~688

- 6 王洪建, 肖沙里, 施 军等. 金丝 Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 685~688
- 5 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. X-ray polarization spectrum diagnosis of laser-produced plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1710~1713
- 7 王洪建, 肖沙里, 施 军等. 激光等离子体 X 射线极化光谱诊断[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1710~1713
- 6 D. Sinars, M. Cuneo, G. Bennett *et al.*. Monochromatic X-ray backlighting of wire-array z-pinch plasmas using spherically bent quartz crystals[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 2202~2205
- 7 Y. Aglitskiy, T. Lehecka, S. Obenschain *et al.*. High-resolution monochromatic X-ray imaging system based on spherically bent crystals[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22): 5253~5261
- 8 I. Uschmann, K. Fujita, I. Niki *et al.*. Time-resolved ten-channel monochromatic imaging of inertial confinement fusion plasmas[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(31): 5865~5871
- 9 E. J. Gamboa, D. S. Montgomery, I. M. Hall *et al.*. Imaging X-ray crystal spectrometer for laser-produced plasmas[J]. *J. Inst.*, 2011, **6**: 04004
- 10 F. Pisani, M. Koenig, D. Desenne *et al.*. Toroidal crystal spectrometer for dense plasma diagnostic [C]. *SPIE*, 1997, **3157**: 250~261
- 11 D. Sinars, G. Bennett, D. Wenger *et al.*. Monochromatic X-ray imaging experiments on the sandia national laboratories Z facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3672~3677
- 12 D. Wittry, N. Barbi. X-ray crystal spectrometers and monochromators in microanalysis [J]. *Microsc. Microanal.*, 2001, **7**(2): 124~141
- 13 Z. Zhong, L. Chapman, B. Bunker *et al.*. A bent Laue analyzer for fluorescence EXAFS detection[J]. *J. Synchrotron Radiat.*, 1999, **6**: 212~214
- 14 N. Kujala, C. Karanfil, R. Barrea. High resolution short focal distance bent crystal Laue analyzer for copper K edge X-ray absorption spectroscopy[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(6): 063106
- 15 Hu Wen, Xie Honglan, Du Guohao *et al.*. Double Laue-crystal monochromator for an X-ray imaging beamline with synchrotron radiation[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007, **31**(6): 597~601
- 胡 雯, 谢红兰, 杜国浩等. 同步辐射 X 射线成像光束线劳厄双晶单色器设计[J]. *高能物理与核物理*, 2007, **31**(6): 597~601
- 16 Y. Zhu, B. Bewer, H. Zhang *et al.*. Bent Laue X-ray fluorescence imaging of manganese in biological tissues[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, **1234**: 457~460
- 17 J. Marcus, M. David, U. Kentaro *et al.*. Phase contrast image segmentation using a Laue analyser crystal [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2011, **56**(3): 515~534
- 18 D. Sinars, G. Bennett, D. Wenger *et al.*. Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 4059~4071
- 19 S. Podorov, A. Nazarkin, E. Forster. An optimized two crystal arrangement for X-ray optics[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 696~699