

双通道共轴聚焦型 X 射线晶体光谱仪

阳庆国¹ 李泽仁¹ 陈光华¹ 黄显宾¹ 蔡红春¹ 李 晶¹ 肖沙里²

(¹ 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)
(² 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 研制了一种用于 Z 箍缩等离子体 X 射线光谱诊断的双通道共轴聚焦型晶体光谱仪。谱仪采用均匀色散(即线色散率为常数)和球面云母晶体作为两个通道的 X 射线色散元件,位于中轴线上的双胶片盒作为探测器,在大致相同的光谱范围内同时获取 Z 箍缩等离子体的时间积分光谱。在中国工程物理研究院“阳”加速器上开展了 Z 箍缩内爆摄谱实验,两通道分别获得了 Z 箍缩铝丝阵等离子体的类氢和类氦光谱谱线。实验结果表明:均匀色散通道光谱分布遵循均匀色散条件,实验得到的线色散率与设计值吻合很好,最大相对误差仅为 3.48%,和球面晶体通道相比,它能更容易、更准确识别和处理光谱,在识别和分析陌生复杂光谱成分时具有优势。

关键词 Z 箍缩;等离子体;均匀色散;晶体光谱仪

中图分类号 O536 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0430001

Dual-Channel, Co-axial, Focusing X-Ray Crystal Spectrograph

Yang Qingguo¹ Li Zeren¹ Chen Guanghua¹ Huang Xianbin¹ Cai Hongchun¹
Li Jing¹ Xiao Shali²

(¹ Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A dual-channel, co-axial, focusing X-ray crystal spectrograph is developed for spectroscopy of the Z-pinch plasmas. The spectrograph uses a uniform-dispersed crystal (the linear dispersion is a constant) and a spherical crystal as the dispersion element and a double-film box as the detector to achieve the simultaneous measurement of the time-integrated spectra of the plasmas in almost the same spectral range. The experiment is carried out on the “Yang” accelerator at Chinese Academy of Engineering Physics (CAPE) and the H-like and He-like emission lines of Al Z-pinch plasmas are obtained. The results show that the linear dispersion obtained by the uniform-dispersed channel, is agree with the designed value very well due to satisfying the uniform dispersion condition, and the maximum relative error is only 3.48%. Compared with the spherical crystal channel, it has the advantage of easiness and veracity for spectra identification and processing and it may be useful for the complicated spectra identification and analysis.

Key words Z-pinch; plasmas; uniform dispersion; crystal spectrograph

OCIS codes 300.6560; 340.7440; 340.7480; 300.2140

1 引言

晶体光谱仪是获取热稠密等离子体状态参数的重要光谱学诊断工具。通过测量等离子体辐射出来的 X 射线光谱强度及其分布,可以获得诸如等离子体的离化状态、密度、温度、电磁场和偏振状态等重

要信息,在 Z 箍缩等离子体、激光等离子体和磁约束等离子体诊断领域有着非常广泛的应用^[1~12]。根据分光晶体的面型不同,可以分为平面、凹面和凸面晶体光谱仪,具有聚焦和成像功能的凹面晶体光谱仪因其具有高的光谱亮度、高的空间和谱分辨能

收稿日期: 2011-09-28; 收到修改稿日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(11005098)资助课题。

作者简介: 阳庆国(1979—),男,博士,副研究员,主要从事高能量密度物理诊断与测试技术等方面的研究。

E-mail: yungore@163.com

力,成为近年来晶体光谱仪发展的一个重点方向。常用的聚焦成像型晶体光谱仪主要有 Von Hamos 柱面晶体谱仪^[4]、ELICS 锥面晶体谱仪^[5~9]和 FSSR2D 球面晶体光谱仪等^[10~12]。但上述光谱仪均属于非均匀色散晶体光谱仪,因其色散坐标和光谱波长与光谱仪的几何结构相关,并且是非线性的,给光谱的识别和处理带来不便。本课题组^[13]提出了一种均匀色散的晶体光谱仪的设计方法,这种谱仪的线色散率为常数,色散坐标和光谱波长满足线性关系,因而大大简化和方便了光谱的辨识和后期处理。

本文介绍一种双通道的共轴聚焦型 X 射线晶体光谱仪,其中一个通道采用均匀色散云母晶体,另一个通道采用球面云母晶体,在中国工程物理研究院流体物理研究所的“阳”加速器装置上进行了验证对比实验,利用 X 射线胶片分别获得了铝 Z 箍缩等离子体的 K 壳层跃迁辐射的类 H 及类 He 谱线。

2 基本原理

双通道共轴聚焦型 X 射线晶体光谱仪的几何结构图如图 1 所示,谱仪采用两块共轴旋转对称的弯曲晶体(根据不同实验需求,可以更换不同面型或材料的晶体,本文采用一块均匀色散晶体和一块球面晶体)作为 X 射线色散元件。光源位于晶体对称轴上,从它发出的相同波长的 X 射线被晶体在弧矢面内聚焦于探测器平面上(位于对称轴上)形成像点,而不同波长的 X 射线在子午平面内按照布拉格衍射条件 $n\lambda = 2d\sin\theta$ (λ 为 X 射线波长, θ 为布拉格角, d 为晶面间距, n 为衍射级次)被晶体色散于探测器平面上的不同位置。

如果以光源中心为原点建立如图 1 所示的坐标系,晶体在子午面内的面型表示为函数 $r = r(\varphi)$,其中 φ 为入射光线和 X 轴之间的夹角,则由光线追迹方法可知,X 射线的波长 λ 与其在探测器上色散空间坐标 x 可由以下关系式联系起来^[13]:

$$\begin{cases} x = \frac{2r^2 r'}{(r'^2 - r^2)\sin\varphi + 2rr'\cos\varphi}, \\ \lambda = \frac{2d}{n} \frac{r}{\sqrt{r'^2 + r^2}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $r' = dr(\varphi)/d\varphi$ 。(1)式是针对弧矢聚焦型晶体谱仪建立的基本关系式,Von Hamos 柱面晶体谱仪、ELICS 锥面光谱仪和球面晶体光谱仪(FSSR-2D)等都可利用此关系式来计算谱仪的线色散率、空间和光谱放大率、光谱分辨力以及谱仪亮度等性

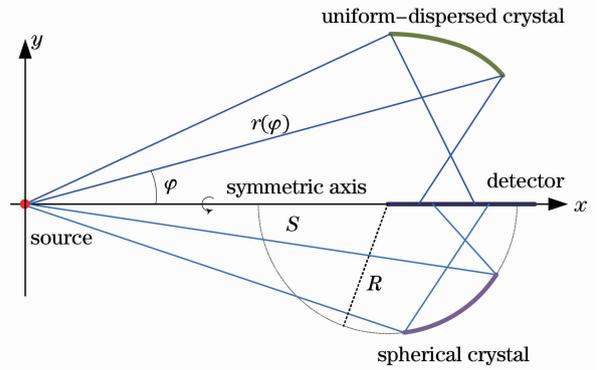


图 1 双通道共轴聚焦型 X 射线晶体光谱仪子午平面内的几何示意图

Fig. 1 Geometry for the dual-channel, co-axial, focusing X-ray crystal spectrograph in meridian plane

能参数。对于均匀色散晶体谱仪,其光谱波长和色散坐标满足线性关系,因此其晶体的面型函数 $r(\varphi)$ 应该满足

$$x = K\lambda + b, \quad (2)$$

式中 K 为常线色散率, b 为初始色散坐标, x 和 λ 由(1)式给出。均匀色散晶体和球面晶体一样具有旋转对称性,其旋转母线即是由(2)式定义的光滑曲线。满足该条件的晶体称为均匀色散晶体。(2)式没有解析解,但是如果提供初始条件 $r(\varphi_0)$,则可以求得任意精度的数值解(离散坐标),提供给精密数控机床用于晶体托和压弯模具的加工。

3 实验及结果分析

针对 Z 箍缩 Al 等离子体 X 射线光谱诊断需求,设计了双通道共轴聚焦晶体光谱仪,其具体参数如表 1 所示。两个通道均采用云母晶体,其摄谱范围大致相同。由于云母晶体具有多级次衍射,其中二阶和三阶衍射涵盖了大部分 Al 热稠密等离子体的内壳层跃迁谱线,因此光谱图像里既有二阶谱也有三阶谱,对于均匀色散通道,其线色散率也是与阶次成比例关系,这些在谱线辨识过程中需要予以注意。

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的“阳”加速器装置上开展。实验中加速器电流峰值约为 858 kA,峰值电压约为 65 kV,内爆时间(10%~90%)约 110 ns,负载为 8 根长度约 15 mm,直径 25 μm 的铝圆形丝阵。谱仪安装在“阳”加速器装置的底部法兰口上,其晶体和探测器事先均经过精确定位以满足几何条件。

表 1 双通道共轴聚焦晶体谱仪设计参数

Table 1 Design parameters for the dual-channel, co-axial, focusing X-ray crystal spectrograph

Channel	Uniform-dispersed (CH1)		Spherical FSSR2D (CH2)	
Crystal	Mica 002		Mica 002	
$2d$ / nm	1.984		1.984	
φ / ($^\circ$)	[4, 9]		[3.5, 8]	
θ / ($^\circ$)	[44.48, 72.76]		[39.36, 70.17]	
n	2	3	2	3
λ / nm	[0.6951, 0.9474]	[0.4634, 0.6316]	[0.6291, 0.9332]	[0.4194, 0.6221]

For CH1, the constant linear dispersion, K are -120 mm/nm for the 2nd order and -180 mm/nm for the 3rd order, the constant dispersion coordinate b is 641 mm and the initial polar length $r(\varphi_0)$ is 580 mm. For CH2, the spherical radius of the crystal is 90 mm and the distance of source to spherical center is 500 mm

采用 Kodak BioMax MS 胶片作为光谱探测器,其数字化后(采样率为 30 m/pixel)的光谱图像如图 2 所示。图中光谱两端的扭曲变形是由于晶体在加工过程中边界应力太大和不均匀导致晶体结构破坏和面形误差,晶体结构破坏使得晶层排列不规则,引起衍射线弯曲或变形,而面型误差引起曲率变化则使得光谱图像离焦,谱线的尺寸发生变化,由于设计的球面晶体的曲率半径比均匀色散晶体的曲率

半径(平均曲率半径为 102 mm)要小,其弯曲难度要更大些,因而其光谱图像质量要更差一些。云母晶体存在较强的散射本底,可以通过图像处理的方法予以扣除,以降低其对光谱识别的影响。在晶体加工过程中,改善工艺条件,使得晶体内部应力均匀化,或者在设计过程中,避免重要谱线位于边界区域,能够提高光谱图像质量和识别成功概率。

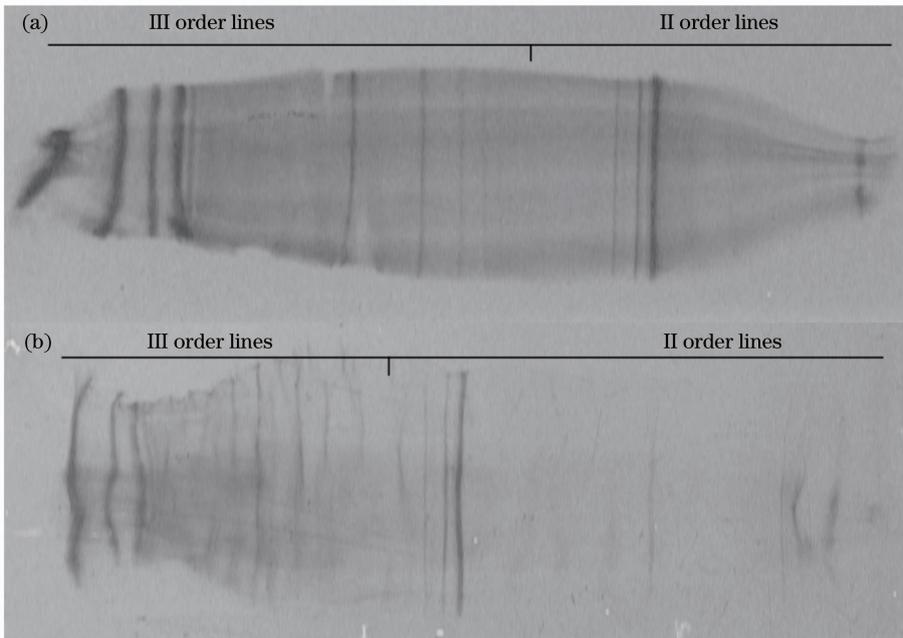


图 2 双通道共轴聚焦 X 射线晶体光谱仪通道 1(a)和通道 2(b)同时获得的 Z 箍缩 Al 等离子体光谱图像
Fig. 2 X-ray spectral image of Al Z-pinch plasmas obtained by CH1 (a) and CH2 (b) of the dual-channel, co-axial, focusing X-ray spectrograph

针对均匀色散晶体光谱仪的特点,编写了半自动化的光谱识别程序,其界面如图 3 所示。其主要功能包括对光谱图像进行预处理,计算截面图并自动寻找峰值,通过定标和搜索光谱数据库,实现谱线的自动识别。由于均匀色散晶体光谱仪的线色散率为常数,因而只要通过理论预估和经验判断准确找

到其中一条谱线,剩余谱线则均可按程序自动识别。对于球面晶体谱仪,其谱线识别过程则没有这么简单,因其线色散率是非线性的并且与光谱仪的几何结构相关,在识别过程中需要对光谱图像的坐标进行校正计算,所引入的计算误差以及仪器对准误差都会导致谱线识别困难或失败。

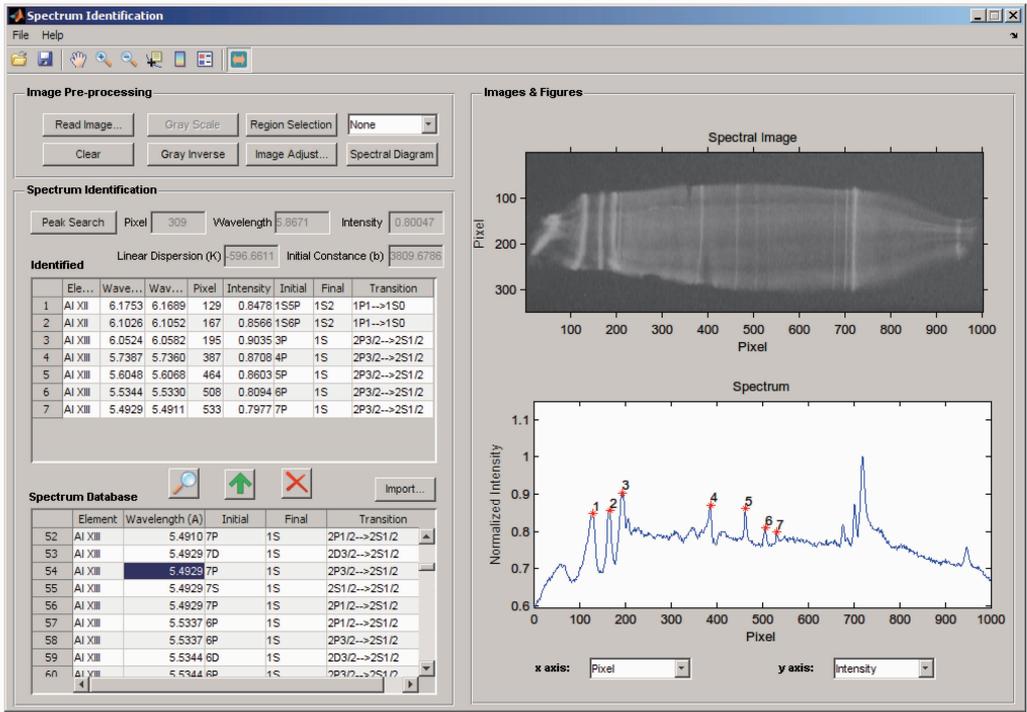


图 3 均匀色散晶体光谱仪光谱识别程序

Fig. 3 Spectrum identification program for the uniform-dispersed crystal spectrograph

由于 Z 箍缩等离子体属于热稠密等离子体,其典型跃迁辐射主要来自于内壳层的类氢和类氦光谱。图 4 给出了谱仪两个通道光谱图像的相对强度分布图,其已识别谱线的像素值、波长以及跃迁轨道列于表 2 中(球面晶体通道谱线的识别是依据图像相似性,参照了均匀色散通道谱线识别结果)。图 5 绘出了已识别谱线的像素值与波长的关系图。图中

的直线是根据最小二乘法拟合的色散线,其斜率即是均匀色散通道的线色散率。可以看出,实验数据和拟合直线吻合得很好。对于 2 阶衍射,其实际线色散率为 -3861 pixel/nm (或 -115.83 mm/nm),与设计 -120 mm/nm ,相对误差只有 3.48% ;对于 3 阶衍射,其实际线色散率为 -5967 pixel/mm (或 -179.01 mm/nm),与设计 -180 mm/nm ,相

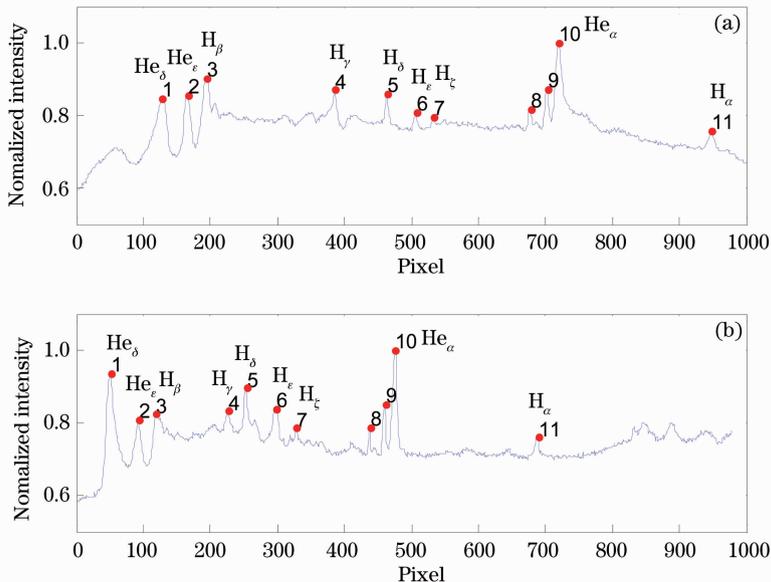


图 4 通道 1(a)和通道 2(b)记录的 Z 箍缩 Al 等离子体光谱分布图

Fig. 4 Spectra of Al Z-pinch plasmas from CH1 (a) and CH2 (b)

对误差则只有 0.6%。对于球面晶体,其数据同样显示在图中,但是其线性度较差,特别是三阶衍射(二阶衍射的线色散率变化范围为 -149 ~

-60 mm/nm;三阶的线色散率变化范围为 -224 ~ -91 mm/nm),谱线辨识前需要进行坐标校正和波长标定,给识谱过程增加困难。

表 2 已识别 X 射线谱线的波长、像素值和轨道跃迁

Table 2 X-ray wavelength, pixel position and transitions for identified spectral lines

No.	Pixel (CH1)	Pixel (CH2)	Wavelength /nm	Ion	Transitions
1	129	80	6.1753	Al XII	1s5p ¹ P ₁ - 1s ² 1S ₀
2	167	122	6.1026	Al XII	1s6p ¹ P ₁ - 1s ² 1S ₀
3	195	148	6.0524	Al XIII	3p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}
4	387	256	5.7387	Al XIII	4p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}
5	464	283	5.6048	Al XIII	5p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}
6	508	327	5.5344	Al XIII	6p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}
7	533	358	5.4929	Al XIII	7p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}
8	678	467	7.8720	Al XII	1s2s ³ S ₁ - 1s ² 1S ₀
9	703	490	7.8038	Al XII	1s2p ³ P ₂ - 1s ² 1S ₀
10	720	506	7.7571	Al XII	1s2p ¹ P ₁ - 1s ² 1S ₀
11	948	718	7.1709	Al XIII	2p ² P _{3/2} - 1s ² S _{1/2}

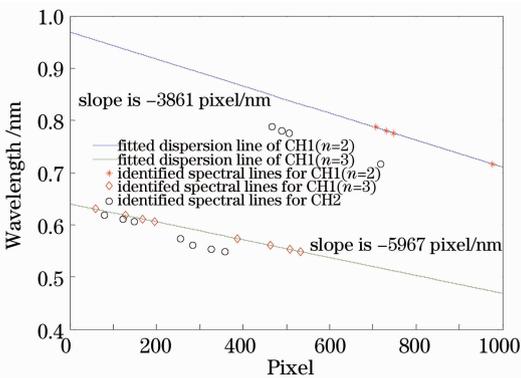


图 5 已识别谱线的波长与像素值关系图

Fig. 5 Wavelength versus pixel number for the identified spectral lines

通道共轴聚焦 X 射线晶体谱仪,并且在“阳”加速器上开展了 Al 丝阵 Z 箍缩内爆摄谱实验,获得了 Al 丝阵 Z 箍缩等离子体的类氢和类氦光谱。对比实验结果表明:两个通道均具有较高的谱线亮度,高的空间分辨力和光谱分辨力($\lambda/\Delta\lambda > 200$,能够清楚分辨 Al 类氦的共振线和及其伴线),可以实现摄谱范围互补以及实验结果相互验证;此外,均匀色散通道因遵循均匀色散条件,比球面晶体通道更容易、更准确识别和处理光谱,因此在识别和分析陌生复杂光谱成分时具有优势。

参 考 文 献

1 V. Arora, S. R. Kumbhare, P. A. Naik *et al.*. A simple high-resolution on-line X-ray imaging crystal spectrograph for laser-plasma interaction studies[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(7): 2644~2648
 2 Fan Pingzhong, E. Fill, Guan Tietang. Soft X-ray crystal

4 结 论

研制了一种采用均匀色散晶体和球面晶体的双

- spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 923~926
范品忠, E. Fill, 关铁堂. 软 X 射线晶体谱仪[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 923~926
- 3 Sun Lan, Han Shensheng, Xu Zhizhang *et al.*. Crystal spectrometers in line-shaped plasma measurement and their applications in experimental X-ray laser investigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 62~67
孙 岚, 韩申生, 徐至展等. 线状等离子体测量中的晶体谱仪及其在 X 射线激光实验中的应用[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 62~67
- 4 T. A. Hall. A focusing X-ray crystal spectrograph[J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1984, **17**: 110~112
- 5 E. Martinolli, M. Koenig, J. M. Boudence *et al.*. Conical crystal spectrograph for high brightness X-ray K α spectroscopy in subpicosecond laser-solid interaction[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(6): 2024~2028
- 6 U. Andiel, K. Eidmann, F. Pisani *et al.*. Conical X-ray crystal spectrometer for time integrated and time resolved measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(4): 2369~2374
- 7 S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, M. D. Mitchell *et al.*. Extreme luminosity imaging conical spectrograph[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10F309
- 8 Yang Qingguo, Li Zeren, Peng Qixian *et al.*. Theoretical calculation and design for cylindrical and conical bent crystal spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 382~387
阳庆国, 李泽仁, 彭其先等. 圆柱面和圆锥面弯晶谱仪的理论计算及设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 382~387
- 9 C. Bonté, M. Harmand, F. Dorchies. High dynamic range streak camera for sub-picosecond time-resolved X-ray spectroscopy[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(4): 043503
- 10 S. A. Pikuz, J. D. Douglass, T. A. Shelkovenko *et al.*. Wide band focusing X-ray spectrograph with spatial resolution [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(1): 013106
- 11 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Spherical bent crystal spectroscopy in laser-produced plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2008, **20**(2): 251~254
王洪建, 肖沙里, 施 军等. 激光等离子体球面晶体光谱成像 [J]. *光学学报*, 2008, **20**(2): 251~254
- 12 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
刘利峰, 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
- 13 Yang Qingguo, Ye Yan, Chen Guanghua *et al.*. Focusing X-ray spectrograph with spatial resolution and uniform dispersion [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2011, **634**: 52~58

栏目编辑: 李文喆