宽光谱在线弯晶谱仪研制

杨国洪,韦敏习,张文海,侯立飞,车兴森,刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621909)

摘 要: 研制了高精度在线准直、超宽光谱范围和高能谱分辨的在线凸圆柱面弯晶谱仪。使用耦合针状CsI(Tl)闪烁体的大面阵 CMOS 相机对 X 射线光谱进行在线测量,用 QTZ(1010)(2*d*=0.851 2 nm)X 射线晶体的能谱测量范围是 1.84~7.38 keV,能谱分辨 880@2.375 keV,动态范围≥1 000。在神光-Ⅲ主机高功率激光装置上,对钛激光等离子体发射的 X 射线谱进行实验测量,获得了优质的光谱图像;对钛离子 X 射线精细结构光谱进行了辨识,与理论计算和其他实验结果吻合。该谱仪用于神光-Ⅲ主机通用诊断搭载平台,具有抗瞬发超强电磁脉冲干扰能力,工作稳定。

关键词: 弯晶谱仪; 在线测量; 电磁脉冲; 钛激光等离子体

中图分类号: O536;O434.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0820001

Fabrication of on-line wide energy range convex crystal spectrometer

Yang Guohong, Wei Minxi, Zhang Wenhai, Hou Lifei, Che Xingsen, Liu Shenye

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621909, China)

Abstract: The convex crystal spectrometer, consists of a convex crystal and CMOS camera which assembles CsI(Tl) scintillation, has been designed and fabricated to record X- ray spectra in the energy range of 1.84-7.38 keV by QTZ (1010) (2*d*=0.851 2 nm) X-ray crystal at one shot. The spectral resolving power was 880 at 2.375 keV, dynamic range of at least 1 000. This spectrometer has characteristics of online aiming, high resolving power, and wide energy range and less noise counts. At Shenguang-III laser facilities, soft X-ray spectroscopy from Titanium laser-produced plasmas was obtained by the spectrometer, main lines of Titanium ions have been identified in the excellent agreement with theoretical calculation and other experiment results. On the DIM of Shenguang-III laser facilities, the spectrometer can work stably and adapts to the over loading electron magnet pulse environment.

Key words: convex crystal spectrometer; on-line measurement; electron magnet pulse; Titanium laser-produced plasmas

收稿日期: 2016-12-10; **修订日期:** 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11304292,11404303)

作者简介: 杨国洪(1966-),男,研究员,主要从事 X 射线光谱学及其应用方面的研究。Email: yangg_h@sina.com

通讯作者: 韦敏习(1980-),男,副研究员,主要从事 X 射线诊断技术方面的研究。Email: wmx17@sina.com

0 引 言

在惯性和磁约束核聚变物理实验中，通过高能谱分辨的 X 射线晶体谱仪测量等离子体发射的 X 射线光谱，获得等离子体的电子温度、电子密度、离子温度、离化度、离子布局和辐射不透明度等等离子体的状态信息[1-4]，可深入校验物理模型和数值模拟程序。

对于 X 射线光谱测量，实验诊断期望同时满足高能谱分辨、宽光谱测量范围和在线测量需求。根据测量需求，凸柱面弯晶谱仪具有可通过调整与 X 射线光源距离、光谱记录介质长度和与弯晶距离等来大幅度调整 X 射线的能谱测量范围和能谱分辨力；同时凸圆柱面弯晶分析器的研制也较成熟，因此凸圆柱面弯晶谱仪得到发展和应用[5-9]。但是，对于美国 NIF、Omega 和中国神光系列大型高功率激光装置，当激光与物质相互作用时会产生瞬发(ns 级)、超宽频谱(0.01~20 GHz)、梯度超电子仪器极限(30 V/m)千倍(>50 kV/m)的电磁脉冲(EMP)，此时普通的 X射线光谱在线探测系统已不能正常工作[6,9]。为了适应超强 EMP 干扰，光谱记录一般都采用非在线记录方式，如使用 X 射线胶片和成像板等。但是为了实现在线和宽能谱范围的 X 射线光谱测量需求，必须选用大面阵的在线光谱记录系统；目前商用大面阵(>30 mm×30 mm) 的软 X 射线 CCD 相机还有待开发。近年来，国内外已开始研制耦合 X 射线闪烁体的可远程控制的 CMOS 相机，应用于高功率激光装置的软 X 射线光谱的在线测量。

针对神光-Ⅲ主机大型高功率激光装置特殊实验环境条件，研制了集高精度在线准直、使用耦合 CsI(Tl)闪烁体的超大面阵 CMOS 相机、高能谱分辨、超宽光谱范围的凸面反射式柱面弯晶谱仪。利用该谱仪，对钛激光等离子体发射的 X 射线光谱进行了在线测量，谱仪具有抗瞬发超强电磁脉冲干扰能力，工作稳定。

1 弯晶谱仪设计

1.1 弯晶谱仪原理

弯晶谱仪基于凸圆柱面衍射 X 射线光学特点设计，其光路如图 1 所示[6]。在图 1 中，假设凸圆柱面弯晶的圆心为几何原点，X 射线源与原点的垂直和水平距离分别为 S 和 h，任一入射到 X 射线晶体面上的 X 射线与水平面的夹角为 θ，探测面到原点的垂直距离为 f。从图 1 中的几何关系可以推出任一入射的 X 射线的光路。

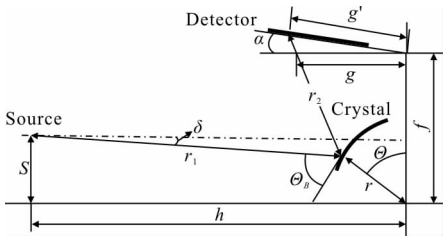

图 1 弯晶谱仪光路设计

Fig.1 Optical scheme of convex crystal spectrometer

X 射线与水平面的夹角：

$$\delta=\arctan\left(\frac{s-r\cdot\cos\Theta}{h-r\cdot\sin\Theta}\right) \tag{1}$$

X 射线在晶体的布拉格衍射角：

$$\Theta_B=\Theta+\delta \tag{2}$$

X 射线经晶体衍射后在探测面上的水平坐标：

$$g=r\cdot\sin\Theta+\frac{r\cdot\cos\Theta-f}{\tan(2\Theta+\delta)} \tag{3}$$

$$g'=g\cdot\frac{\sin(2\Theta+\delta)}{\sin(2\Theta+\delta+\alpha)} \tag{4}$$

X 射线到晶体的光程：

$$r_1=\frac{h-r\cdot\sin\Theta}{\cos\delta} \tag{5}$$

X 射线从晶体到探测面的光程：

$$r_2=\frac{f-r\cdot\sin\Theta}{\sin(2\Theta+\delta)}+g\cdot\frac{\sin\alpha}{\sin(2\Theta+\delta+\alpha)} \tag{6}$$

根据布拉格衍射原理，X 射线入射到晶体上时得到衍射加强的条件是:

$$n\lambda=2d\cdot\sin\Theta_B \tag{7}$$

式中：n 为衍射级数；λ 为 X 射线波长；d 为晶面间距；Θ_B 为布拉格角。

1.2 能谱分辨

能谱分辨是凸柱面弯晶谱仪的重要指标。理论上可由公式(7)可推导出：

$$P=\lambda/\delta\lambda=\tan\Theta_B\delta\Theta_B \tag{8}$$

但是影响谱仪的能谱分辨的因素很多，如光源大小、晶体摇摆曲线、弯晶的晶面间距变化、晶体厚度和等离子体的各种展宽等，无精准表达公式[3-5,10]。Donaldson 等给出该谱仪能谱分辨力的评

估公式[4]：

$$P=\lambda/\delta\lambda=\frac{r_1}{S_x}\tan\Theta_B \tag{9}$$

式中：S_x 为光源直径。

由公式(9)可知，能谱分辨力与光源到晶体的距离 r_1 成正比，与光源大小 S_x 成反比，尽量使用大的布拉格角 Θ_B。当记录系统灵敏度足够时，若需要提高能谱分辨力，就必须增大 r_1，或者减小 S_x。

对于神光-Ⅲ激光装置的凸柱面弯晶谱仪，将 r_1 提升至 1 200 mm，利用公式(1)、(2)、(5)和(9)，对光源大小直径分别为 0.8、0.6、0.4 mm 的能谱分辨力进行了计算，结果见图 2。从图 2 中可知，当光源直径为 0.8 mm，能谱分辨力从 255@8.5 keV 渐变至 1 900@1.8 keV；光源直径为 0.4 mm 的能谱分辨是 0.8 mm 的两倍，与光源大小 S_x 成反比。

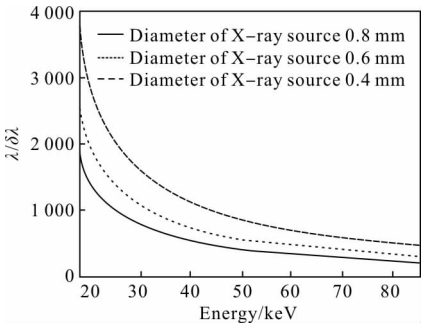

图 2 X-Ray 分辨率

Fig.2 Resolution of X-Ray line

1.3 在线记录系统

在线记录系统主要由生长针状 CsI(Tl)闪烁体的光纤面板[11]和 CMOS 相机耦合组成。优化后的 CsI(Tl)厚度为 100 μm，可以将 X 射线转换为波长为 550 nm 的可见光；由有效面积 98.6 mm×49.2 mm、49 μm/pixel、A/D 转换为 16 位的 CMOS 相机进行在线记录。该记录系统的探测效率由 X 射线闪烁体 CsI(Tl)厚度和生长质量、光纤面板光传输效率、CMOS 相机像元大小和量子效率等因素综合确定。

在神光-Ⅲ主机激光装置特殊实验环境条件下，CMOS 相机以光纤方式进行信号传输，使用蓄电池供电方法，同时线缆采取宇航级屏蔽，使相机在瞬态超强电磁脉冲干扰下可以正常稳定工作。同时，在 CMOS 相机上设有测温电路，可实时显示控制系统的温度，尽量使系统工作在常温状态，达到控制系统噪声目的。

1.4 系统准直

谱仪使用双光束交汇的光学瞄准系统进行高精度在线准直[12]。瞄准精度主要由光学镜头、光束夹角和 CCD 相机象元等因素决定。该瞄准系统物距为 812 mm，系统长度为 190 mm，外形直径为 φ160 mm。粗瞄视场为 φ150 mm，精瞄视场为 φ5.2 mm；指向空间分辨为 35 μm，轴向空间分辨为 260 μm。

在外界无光照条件下，利用自带的 LED 照明系统，CCD 相机可对瞄准定位用的直径 φ200 μm 的金球清晰成像；为防物理实验产生的高速碎片和高能 γ 射线损伤，使用 1 mm 厚的铅电动屏蔽体保护光学成像镜头，结构设计见图 3。

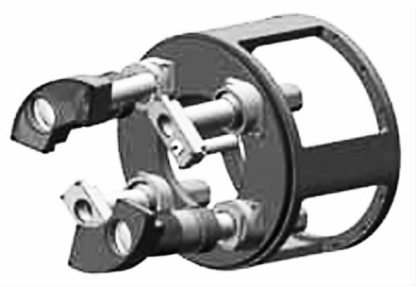

图 3 瞄准系统结构

Fig.3 Structure of aiming system

1.5 谱仪结构参数与系统设计

根据神光-Ⅲ主机高功率激光装置的物理实验需求、靶室环境和在线探测系统的有效面阵，优化后的凸柱面弯晶谱仪参数为 s=100 mm，h=1 200 mm，f=125 mm，r=120 mm 和 α=0°。利用耦合 CsI (Tl)的 CMOS 相机，有足够大的有效探测面积实现多通道同时测量。

在谱仪结构中，正面和侧面分别使用 4 mm 和 1 mm 厚的铅屏蔽高能 γ 射线干扰，利用光纤远程传输进行相机的参数设置、图像记录和传输，实验时采用蓄电池供电方式，谱仪外壳充分接地，利用赤道通用诊断搭载平台(DIM)进行接触散热，线缆采取宇航级屏蔽，实现对激光打靶产生的瞬发超强电磁脉冲干扰的有效屏蔽。

宽光谱弯晶谱仪主要由瞄准系统、弯晶系统和 CMOS 在线记录系统组成，谱仪外型为 680 mm×160 mm×160 mm，系统质量为 16.5 kg，满足 DIM 搭载平台的空间和质量要求，谱仪实物见图 4。

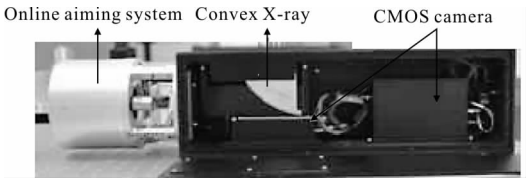

图 4 弯晶谱仪实物

Fig.4 Convex crystal spectrometer

2 神光-Ⅲ主机激光装置实验

宽光谱在线弯晶谱仪实验在神光-Ⅲ主机激光装置上进行。首先对谱仪进行离线瞄准,获取模拟靶点在四个 CCD 相机上的位置，然后将谱仪搭载于 DIM 上,利用 DIM 的精密调节能力,通过对安装于靶位置的直径为 φ200 μm 金球的在线瞄准,完成准直。

利用神光-Ⅲ主机波长为 0.35 μm、脉冲半宽度为 200 ps、四个光束组共计 32 路激光打高纯度 2 mm×2 mm 的 Ti 平面靶,激光能量共 6.4 kJ,焦斑直径约 φ800 μm,激光功率密度约 6.4×10^{15}W/cm^2。利用该谱仪对 Ti 的类氦及其附近离子发射的 X 射线光谱进行在线测量。实验中,在 CsI(Tl)闪烁体前加 20 μm 厚无针孔的 Be 膜，屏蔽了杂散的可见光和荧光,同时也可阻挡实验中产生的高速碎片,起到保护闪烁体和 CMOS 相机的作用。

3 实验结果与谱辨识

3.1 实验结果

在神光-Ⅲ主机激光装置上，使用 QTZ(1010)(2d=0.851 2 nm)晶体的弯晶谱仪获得 Ti 的激光等离子体光源发射的 X 射线光谱实验原始图见图 5,光谱扫描见图 6。可以看出，光谱的本底信号计数<65，光谱最大计数>12 500，实验图像的信噪比>190;因 A/D 为 16 位,最大计数为 65 535,探测系统的动态范围≥1 000,X 射线光谱十分清晰。

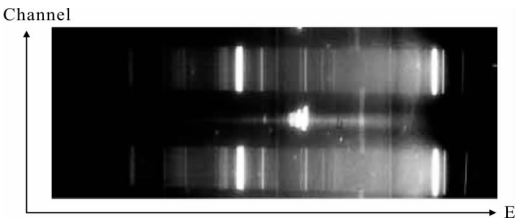

图 5 Ti 等离子体发射 X-射线的光谱实验结果

Fig.5 Experiment result of X-ray line from Titaniumions

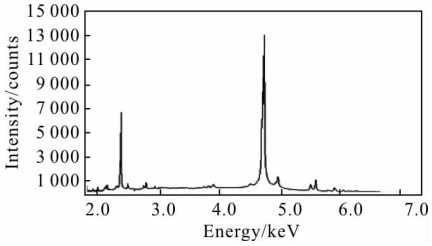

图 6 Ti X 射线光谱图

Fig.6 Drawing of Titanium X-ray spectra

实验结果表明,该光谱仪适应神光-Ⅲ主机装置物理实验的测量需求，具有抗瞬发超强电磁脉冲能力,系统工作正常。

3.2 谱线辨识

对于 Ti 高温等离子体,国际上已评价其类氦离子的 $1s^2$-$1s2p(^1P_1)$光谱,其能量为 4 750 eV。从图5 可看出,对于 QTZ(1010)(2d=0.851 2 nm)晶体,可以测量 Ti 的一级和二级 X 射线光谱,二级光谱信号也清晰,且强度约为其一级的 50%。将其一级和二级光谱作波长基准,辅助两光谱线间距,利用公式(1)~(7),推出谱仪的 s、h、f 和 r 四个系统参数实际值，然后对 Ti 的实验光谱进行波长定标。谱仪的测量范围为 1.84~7.38 keV。用 Origin 软件进行谱线拟合,获得光谱仪在 X 射线光源直径为 φ800 μm 情况下的能谱分辨力($\lambda/\Delta\lambda$)为 550@4.750 keV、880@2.375 keV;与图 2 中评估为 468@4.750 keV、1 094@2.375 keV 有差异,评估是基于圆形光谱记录,而此处为平面记录,此外还有其它因素未考虑,如记录介质的空间分辨力、全光程、柱面弯晶半径 r 和信噪比等。能谱测量范围、能谱分辨和系统灵敏度是 X 射线能谱仪的主要系统指标;已获得前两个指标,系统灵敏度足够灵敏,需实验标定才能定量给出。

Primout 等人用 TRANSPEC 程序对电子温度为 2 340 eV、电子密度为 4.8×10^{21}/cm^3 的 Ti 激光等离子体类氦离子光谱进行了模拟计算与实验光谱的辨识[1]。图 7 为神光-Ⅲ主机装置 Ti 激光等离子体发射的 X 射线光谱局部图，对图 7 中标为 S、I、R、W、X、Y、和 Z 的 7 条主要谱线进行了辨识,它们属于 Ti 类锂、类氦和类氢离子跃迁谱线,与 Primout[1]和美国 NIST 结果较好吻合,光谱辨识结果见表 2。

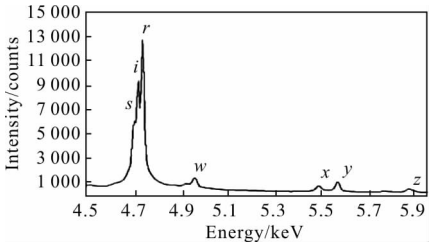

图 7 Ti X 射线光谱局部图

Fig.7 Part of Titanium X-ray lines

表 2 Ti 离子的 X 射线光谱辨识

Tab.2 Identified lines X-ray of Titanium ions

Line	Transition level	Energy/eV		
		Expt[this work]	Expt[1]	Theor[NIST]
S	$1s^2 2p-1s(^2S)2p^2(^1D)$	4 714	4 713.8	4 713.9
I	$1s^2-1s2p(^3P_1)$	4 730	4 727	4 727.0
R	$1s^2-1s2p(^1P_1)$	4 750	4 750	4 749.5
W	$1s-2p(^1P_{1/2})$	4 962	4 966	4 966.1
X	$1s^2 3s-1s2s3p(^2P_{3/2})$ $1s^2 3s-1s2s3p(^2P_{1/2})$ $1s^2 3s-1s2s3s(^2P_{1/2})$	5 526	5 530[13]	5 527.6
Y	$1s^2-1s3p(^3P_1)$	5 571	–	5 575.4
Z	$1s^2-1s4p(^1P_1)$ $1s^2-1s4p(^3P_1)$	5 875	–	5 873.4 5 870.7

4 结 论

文中研制了具有高精度在线准直、超宽光谱范围、高能谱分辨等特点的在线凸柱面弯晶谱仪。使用耦合针状 CsI(Tl)闪烁体的大面阵 CMOS 相机实现对 X 射线光谱进行在线测量，用 QTZ(1010)(2*d*=0.851 2 nm)X 射线晶体时，其能谱测量范围为 1.84~7.38 keV，能谱分辨 880@2.375 keV，动态范围≥1 000。利用该弯晶谱仪，对钛激光等离子体产生的 X 射线谱进行在线测量，获得了优质的光谱图像；对钛激光等离子体 X 射线光谱进行了准确辨识，结果与理论计算和其他实验较好吻合。

采用光传输、蓄电池供电和宇航级屏蔽等方法，使该弯晶谱仪具有抗实验中的瞬发超强超宽频谱的电磁脉冲干扰能力，在神光-Ⅲ主机高功率激光装置上可稳定工作。根据实验需求，通过 X 射线晶体和闪烁体厚度的更换，该谱仪还可以测量不同能量范围的 X 射线光谱。该谱仪的方法与技术在磁约束核聚变(MCF)和 Z-Pinch 等其他领域也具有较高的参考和使用价值。

参考文献：

[1] Primout M. Characterization of a hybrid target multi-keV X-ray source by a multiparameter statistical analysis of titanium K-shell emission [J]. ***High Energy Density Physics***, 2016, 18 (1): 55-66.

[2] Regan S P. Applied plasma spectroscopy: laser -fusion experiments[J]. ***High Energy Density Physics***, 2009, 5(4): 234-243.

[3] Hauer A A, Delamater N D, Koenig Z M. High-resolution X-ray spectroscopic diagnostics of laser-heated and ICF plasmas [J]. ***Laser and Particle Beams***,1991, 9(1): 3-48.

[4] Donaldson T P, Hutcheon R J, Key M H, et al. Soft X-ray spectroscopy of laser-produced plasmas with a convex mica crystal spectrometer [J]. ***Journal of Physics B Atomic and Molecular Physics***, 1976, 9(10): 1645-1655.

[5] Baronova E. Three-channel X-ray crystal spectrometer for diagnosing high energy [J]. ***Review of Scientific Instruments***, 2006, 77(10): 103104.

[6] Seely J. Hard X-ray spectrometers for the national ignition facility [J]. ***Review of Scientific Instruments***, 2001, 72 (6): 2562-2565.

[7] Chen Shengbiao. Design and application of two-channel convex reflection curved crystal spectrometer [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2008, 20(4): 612-615. (in Chinese)

[8] Wang Hongjian. Convex crystal spectrometer for Z-pinch plasma X-ray diagnosis [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2011, 23(2): 403-406. (in Chinese)

[9] Szabo C I. Mitigation of fluorescence and scattering in reflection convex-crystal X-ray spectrometers [J]. ***Radiation Physics and Chemistry***, 2006, 75(11): 1824-1829.

[10] Gersten M. Sources size line broadening in convex curved crystal X-ray spectrographs [J]. ***J Appl Phys***, 1982, 53 (3): 1297-1302.

[11] Liao Hua. Experimental study on an X-ray CsI (Tl) converting screen with large format and high spatial resolution [J]. ***Journal of Shenzhen University Science and Eningeering***, 2014, 31(2): 174-178. (in Chinese)

[12] Wang Wei. A Method for shenguang III diagnostic instrument manipulator high pricision automatic aiming[J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2014, 43(6): 0612002. (in Chinese)