

文章编号 1004-924X(2004)04-0415-05

X射线椭圆弯晶谱仪实验研究

肖沙里¹, 唐跃林¹, 熊先才¹, 钟先信¹, 高洁¹, 杨国洪²
(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要: 利用椭圆从一个焦点发射出的光线经椭圆面反射必汇聚于另一焦点的性质, 设计了基于 620~ 6200 eV 的 X 射线椭圆弯晶谱仪。文中分析了系统原理, 完成了谱仪光学色散系统、探测系统及仪器的研制。采用 KAP、LiF、PET、MiCa 作为色散元件, 其 2d 值在 0.4~ 2.6 nm、Bragg 角为 30°~ 67.5°, 晶体尺寸为 120×8×0.2 mm, 偏心率为 0.958 6, 焦距 1 350 mm, 光程长 1 456 mm, 分析器基底材料用数控铣床加工。实验在上海“神光 II”号装置上实施, 激光能量为 150 J, 波长为 0.35 μm, 真空度为 3×10⁻³ Pa。为达到光学对准, 采用了小点光源以及精密望远镜对中。实验结果显示出金靶在 0.63~ 0.79 nm 范围, 其分辨力(Δλ/λ)达到了 1/486。谱的分辨力还与晶体特征和激光靶源尺寸有关。谱仪性能好、使用方便、简单, 具有高的收集效率和分辨能力, 能够有效获取激光惯性约束聚变中激光等离子体发射光谱的丰富信息。

关键词: 晶体谱仪; 激光等离子体; X 射线谱; 光谱分析

中图分类号: O561 文献标识码: A

Experimentation of the X-ray elliptical crystal spectrograph

XIAO Sha li¹, TANG Yue lin¹, XIONG Xian cai¹, ZHONG Xian xin¹, GAO Jie¹, YANG Guo hong²

(1. *The Key Laboratory of Optic-electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*; 2. *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract: Based on the theory that is ray emitted from a focus (front) of an ellipse will converge on the other focus (back) by the reflection on the elliptical surface, the Elliptical Crystal Spectrograph (ECS) in the X-ray region of 620~ 6 200 eV was designed. The principle of the system was analyzed, and the design and manufacture were accomplished. KAP, LiF, PET and MiCa are used as dispersive elements covering Bragg angle from 30° to 67.5°. The crystal sizes are 120×8×0.2 mm with the curved analyzer substrate of eccentricity $\epsilon = 0.958 6$, focal distance of 1 350 mm, and optical path length of 1 456 mm. The analyzer of the elliptical profiles was machined into a suitable substrate material using a Computer-Controlled milling machine. The Elliptical Crystal Spectrograph was experimented on Shanghai “Shenzhou II” with laser energy of 150 J, laser wavelength of 0.35 μm, and chamber vacuum level 3×10⁻³ Pa. To achieve optical alignment with a small point source, an aligned telescope was precisely fitted to the elliptical analyzer block.

收稿日期: 2004-03-05; 修订日期: 2004-06-15.

基金项目: 国家 863-804 课题资助项目 (No. 803 804 3)

The result shows that spectra of Au target can be measured in 0.63~0.709 nm with a resolution of $1/486$ ($\Delta\lambda/\lambda$). It is found that the resolution of the spectrograph depends on the rocking curve and the thickness of the crystal and the laser spot diameter. In addition, ECS is simpler and easier to use, with a higher collecting efficiency and a better resolution. It can effectively obtain abundant information of the laser-plasma emission spectra in an inertial confinement fusion.

Key words: crystal spectrograph; laser plasma; X-ray spectrum; spectral analysis

1 引言

由激光作用的软 X 射线发射谱的研究是一个相当重要的课题^[1-3],像激光驱动的各种惯性约束聚变^[4]、极紫外软 X 射线发射激光^[5-6]、连续高阶谐波的产生^[7]等。激光产生等离子体的潜在应用是作为 X 射线光源^[8],显微印刷术^[9]、微生物细胞学^[10]、逆光小球聚爆^[11]等。

用激光惯性约束核聚变 ICF 可产生千万度高温的等离子体,以构成一种独特且方便的 X 射线源。它不仅可提供 X 射线发射的研究,还可以模拟研究等离子体的流体动力学过程和辐射传输过程,是一种极佳的用于实验室的微型核爆炸模拟源^[12]。尤其是在当今世界各国共同签订全面禁止核试验条约之后,激光核聚变研究已成为核武器微型化以及实验室探索武器发展规律的一种极好的途径。

高温等离子体 X 射线谱可用来测量电子温度、等离子体的离化态、电子能量分布、电子密度和 X 射线发射的总能量。从中可以看出等离子体 X 射线载有高温离子体的大量有用信息^[13-14]。椭圆弯晶谱仪(以下简称弯晶谱仪)就是一种获取激光惯性约束核聚变信息的重要诊断仪器^[15]。

2 仪器分光原理

在高温等离子体 X 射线的诊断过程中,用晶体作为分光元件是一较好的手段。因为晶体中原子间距与 X 射线的波长相近,故可作为 X 射线谱的分光光栅。LiF、PET、Mica、KAP 这几种晶体是较理想的色散元件。

2.1 晶体分析波长范围

此次研究的弯晶谱仪的测量波长范围是 0.2~2 nm, Bragg 角为 $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 。

根据 Bragg 衍射原理^[16-17],得到衍射明条纹

的条件是:

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

式中, d 是晶体的晶面间距; θ 是 Bragg 衍射角; m 是衍射级次; λ 为 X 射线的波长。

在弯晶谱仪的实验研究中,使用一级衍射条纹,即 $m=1$ 则式(1)变为:

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

由于弯晶谱仪覆盖的 Bragg 角是 $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$,根据公式(2),可计算出这四种晶体的测量波长,分别如表 1 所示。

表 1 晶体测量的波长范围

Tab. 1 Measured wavelength range by crystal

晶体材料	hkl	$2d$ (nm)	测量波长 λ (nm)
LiF	(200)	0.403	0.20~0.37
PET	(002)	0.874	0.44~0.81
Mica	(002)	1.984	0.99~1.83
KAP	(1010)	2.663	1.33~2.46

2.2 椭圆面弯曲晶体分析器^[12]

椭圆面弯曲晶体分析器(以下简称椭圆弯晶分析器)的工作原理如图 1 所示。位于靶室内的金属靶,处于椭圆的一个前焦点,其发射的 X 射线经椭圆面反射后会聚于另一焦点。衍射晶体通过粘结法固化在金属椭圆基底上,其表面构成一椭圆柱面, X 射线经晶体衍射后会聚于后焦线上。在后焦线处放置一镀膜以隔离杂散光影响,消除低能区 X 射线。通过镀膜的 X 射线投射到探测面,以便记录空间分辨或时间分辨的有用信息。光源到狭缝的距离(即椭圆的焦距)为 1350 mm,两个椭圆的离心率均为 0.9586,椭圆的弧长为 125.64 mm,光路的光程为 1456.304 mm,通光孔径为 150 mm。

为了确保点源辐射和附近散射的聚焦,晶体分析器的曲率为一椭圆面:

$$\rho = \frac{h}{1 - e \cos \beta}, \quad (3)$$

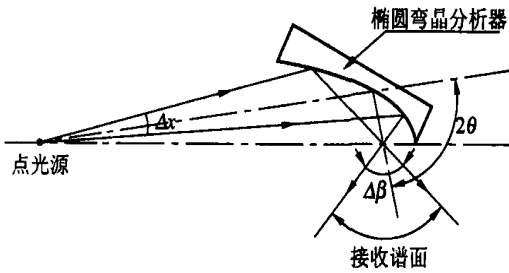


图 1 椭圆弯晶分析器的工作原理示意图
Fig. 1 The fundamental of the curved crystal analyzer

式中 e 为椭圆面的离心率; h 为特征半径的距离; ρ 为距出口的焦点距离; $\beta = \pm 90^\circ$ 。

弯晶分析器设计的特点是使被测量的辐射垂直于圆弧探测表面, 在探测圆的角度位置 β 与离开分析器的 Bragg 反射角 θ 相关, 由方程(4) 给出。

$$\theta = \arctan\left(\frac{1 - e \cos \beta}{e \sin \beta}\right), \quad (4)$$

在图 1 中对来自椭圆的一条射线的角度位置 x , 由此确定了 θ 和 β 的相对关系, 并进行微分

$$\frac{dx}{d\theta} = 2 - \frac{d\beta}{d\theta}, \quad (5)$$

由方程(4) 可以得到 $\frac{d\beta}{d\theta}$

$$\frac{d\beta}{d\theta} = \frac{e^2 + 1 - 2e \cos \beta}{e(1 - \cos \beta)}, \quad (6)$$

在 Bragg 角 θ 的微分角范围 $d\theta$ 内, 弯晶分析器所衍射的每秒光子数 $dN = P(\theta) d\theta$ 。于是由椭圆弯晶分析器衍射的发射强度的角分布成为

$$\frac{dN}{d\theta} = P(\theta) = i_0 a \phi \frac{dx}{d\theta} I_N(\theta), \quad (7)$$

式中 a 为发射圆面积, ϕ 为弯晶分析器接收光束的角度密度, 并在垂直于 Bragg 反射平面的平面内测量; $I_N(\theta)$ 为晶体摆动曲线, 它是在 θ 角范围内的反射, i_0 为光子强度, R 为集成反射率。由积分方程(7), 便得到在衍射谱线内每秒总的光子数 N 。

$$N = i_0 a \phi \left(\frac{dx}{d\theta}\right) \int I_N(\theta) d\theta = i_0 a \phi \left(\frac{dx}{d\theta}\right) R, \quad (8)$$

其中, 椭圆面弯曲晶体由计算机控制数控线切割机床加工制作而成, 位置精度控制在 0.01 mm 以下。

3 椭圆弯晶谱仪的设计方案

椭圆弯晶谱仪采用椭圆弯晶作为色散元件。对空间和时间分辨的实验, 采用 X 光胶片或 X-

CCD 探测器或 X 光条纹相机作为检测装置。当光源聚焦点作为椭圆的一个几何焦点确定后, 聚焦的光辐射在椭圆晶体面上, 发生衍射并通过第二个焦点, 从狭缝入射到探测圆上。同时, 为防止杂散光的进入, 在狭缝前面放置铍膜滤片。椭圆弯晶谱仪的系统设计方案如图 2 所示。

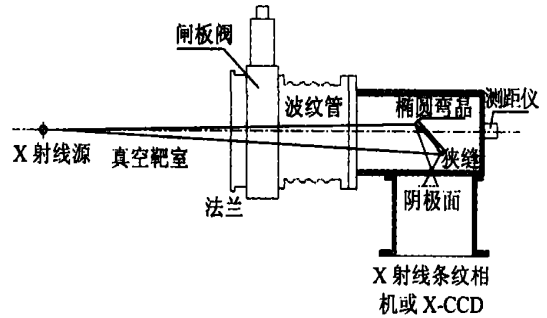


图 2 椭圆弯晶谱仪系统设计方案
Fig. 2 The system design of the Curved Crystal Spectrograph

椭圆弯晶谱仪由六个部分组成: 谱仪真空室、光谱检测系统、定位支撑调节基座、瞄准对中装置、三维可调部件和靶室连接的可换装置等。

谱仪真空室—即椭圆弯晶谱仪箱体, 主要用于安装色散元件椭圆弯晶及其导轨和支承固定机构, 并将谱仪的狭缝机构(即椭圆的后焦线)安置在此箱体上, 通过法兰与 X-CCD(或胶片盒)及条纹相机相连, 使通过狭缝获得的光谱能被有效记录下来。整个谱仪抽取真空, 使整个光学系统处于高真空状态(3×10^{-3} Pa)。

光谱检测系统—即椭圆弯晶谱仪的光学系统。其目的是满足记录激光等离子体发出的 X 射线在时间上和空间上的分辨。X 射线通过箱体上对应的狭缝, 分别在胶片盒(或 X-CCD)上进行空间分辨, 在条纹相机上进行时间分辨。

瞄准对中装置—为了满足椭圆弯晶的椭圆焦点与靶室靶心距离为 1 350 mm 的要求, 使用瑞士莱卡(Leica)测距仪, 其测量的有效距离为 0.3 ~ 100 m。通过在箱体中安装瞄准器的方法, 在打靶前测量测距仪到靶心的距离和测距仪到瞄准器的距离, 然后通过其固定的几何关系, 就能计算出椭圆弯晶的焦距, 并能将其调整为 1 350 mm。

三维可调部件—为了保证对光源点的瞄准对中, 提高安装精度, 在外部利用波纹管的可挠动特性和特殊设计的十字工作台进行三维方向的粗略

调整; 在箱体内部则设计有一可在真空状态下对整个椭圆弯晶定位系统进行调整的微调装置, 以满足实验要求。

整台仪器装配示意图如图 3 所示。

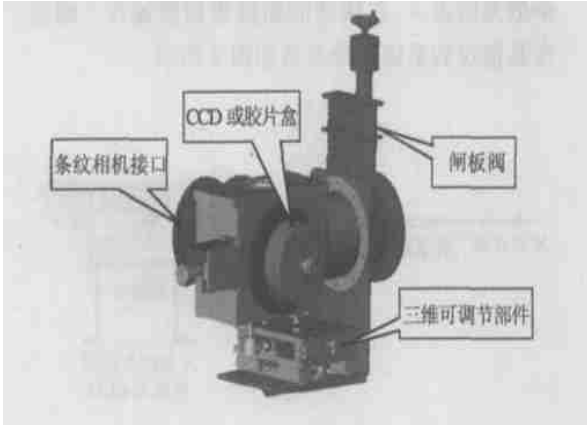


图 3 椭圆弯晶谱仪装配示意图

Fig. 3 The assembled Curved Crystal Spectrograph

4 实验研究结果

实验在上海“神光 II 号”装置上进行, 弯晶谱仪位于靶腔轴线夹角为 70° 的方向, 实验真空度为 3×10^{-3} Pa。实验以钽玻璃三倍频激光注入, 利用波长为 $0.35 \mu\text{m}$ 的激光辐照样品靶, 以使其产生等离子体。实验中采用靶点为 Au 的双点背光 Au 腔靶, 靶腔南北放置。打靶激光能量 $E_c = 150(\text{J}/\text{束}) \times 4$ 束, 激光脉宽 $\tau_c = 600$ ps, 激光焦靶为 $\Phi 200 \mu\text{m}$ 。在靶前用 PET 弯晶分析器测量等离子体中的发射谱线, 用 X 射线 CCD 记录。

实验中 X-CCD 探测到的光谱图像如图 4 所示。图 5 为光谱图像经软件计算处理后得到的波长在 $0.6 \sim 0.7 \text{ nm}$ 之间的 X 光谱图。表 2 是 X

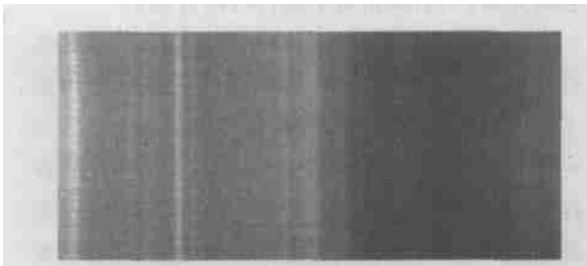


图 4 X-CCD 成像谱图

Fig. 4 The image detected by X-CCD

-CCD 所探测到的谱线波长及相应分辨力。从中可以看出, 椭圆弯晶谱仪达到了较好的实验结果。

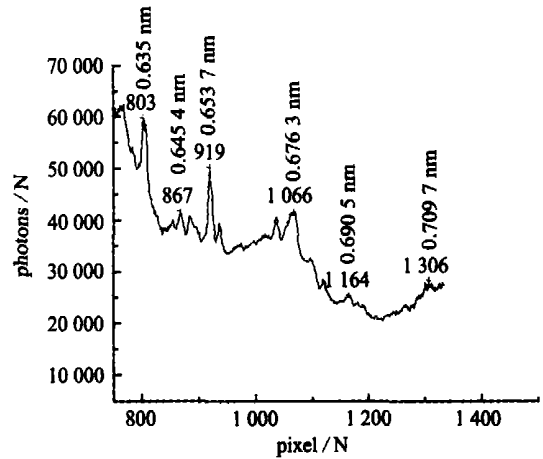


图 5 波长在 $0.6 \sim 0.7 \text{ nm}$ 之间的谱线

Fig. 5 The spectrum in the range of $0.6 \sim 0.7 \text{ nm}$

表 2 X-CCD 探测到的谱线波长及分辨力(Au 靶)

Tab. 2 Spectral wavelength detected by X-CCD and resolution (Au target)

峰值像素	谱线波长 (nm)	分辨力
803	0.6353	1/309
867	0.6454	1/278
919	0.6537	1/287
1066	0.6763	1/516
1164	0.6905	1/340
1306	0.7097	1/486

5 结论

椭圆弯晶谱仪的实验研究提供了一种激光等离子体诊断的方法, 与平晶谱仪相比, 它具有探测效率高、分辨能力好, 采用不同晶格常数的晶体分析器可以覆盖较宽的探测频率范围, 并具有自聚焦的能力。实验结果显示出金靶在 $0.63 \sim 0.79 \text{ nm}$ 范围, 其分辨力 ($\Delta\lambda/\lambda$) 达到了 $1/486$ 。谱的分辨力还与晶体特征和激光靶源尺寸有关。谱仪性能良好、使用方便、简单, 具有高的收集效率和分辨能力, 能够有效获取激光惯性约束聚变中激光等离子体发射光谱的丰富信息。

参考文献:

- [1] HAUER A A, DELAMATER N D, KOENIG Z M. High resolution X-ray spectroscopic diagnostics of laser heated and ICF plasmas[J]. *Laser Part. Beams.*, 1991, 9(1): 3-5.
- [2] AGLITSKIY Y, LEHECKA T, OBENSCHAIN S, *et al.* X-ray crystal imagers for inertial confinement fusion experiments (invited)[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, 70(1): 530-532.
- [3] ARORA V, KUMBHARE S R, NAIK P A, *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.
- [4] CAMPBELL E M. Recent results from the Nova program at LLNL[J]. *Laser Part. Beams.*, 1991, 9(2): 209-212.
- [5] NAGATA Y, MIDORIKAWA K, KUBODERA S. Soft X-ray amplification of the Lyman α transition by optical field induced ionization[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71(23): 3774-3776.
- [6] FIEDOROWICZ H, BARTNIK A, LI Y, *et al.* Demonstration of Soft X-ray lasing with neonlike argon and nickel like xenon ions using a laser irradiated gas puff target[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(3): 415-417.
- [7] HUILLIER A L, BALCOU P. High order harmonic generation in rare gases with a 1 ps 1.053 nm laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70(6): 774-778.
- [8] TURCU I C E, DANCE J B. *X-rays from Laser Plasmas*[M]. Wiley, New York, 1999.
- [9] CHAKER M, LA FONTAINE B, COTE C Y, *et al.* Laser plasma sources for proximity printing or projection X-ray lithography[J]. *Sci. Technol.*, 1992, B 10: 3239-3241.
- [10] STEAD A D, COTTON R A, DUCKETT J G, *et al.* Use of soft x-rays to study the ultrastructure of living biological material[J]. *X-Ray Sci. Technol.*, 1995, 5(1): 52-54.
- [11] HAMMEL B A, KEANE C J, KANIA D R, *et al.* K- and L-shell X-ray spectroscopy of indirectly driven implosions (invited)[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, 63(10): 5017-5019.
- [12] 孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
SHUN J W. *High temperature plasma X-ray spectroscopy*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [13] 项志遵, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
XIANG ZH L, YU CH X. *High-temperature plasma diagnostic technology*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1982. (in Chinese)
- [14] 王峰, 徐朝银, 潘国强, 等. 同步辐射 X 射线双晶体单色仪能量扫描[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 401-404.
WANG F, XU CH Y, PAN G Q, *et al.* Energy scanning of the double crystal monochromator at X-ray beam Lines[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 401-404. (in Chinese)
- [15] 熊先才, 钟先信, 肖沙里, 等. 双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 592-596.
XIONG X C, ZHONG X X, XIAO SH L, *et al.* Analysis of the transmission efficiency of a two channel elliptical crystal spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 592-596. (in Chinese)
- [16] 王英华. X 光衍射技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 81-83.
WANG Y H. *Fundament of X-ray diffraction technology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 81-83. (in Chinese)
- [17] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 250-256.
YANG F J. *Atomic physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 250-256. (in Chinese)

作者简介: 肖沙里(1953-), 男, 重庆人, 重庆大学光电工程学院, 副教授, 主要研究方向为光学精密仪器、测试及控制等方面的研究;

唐跃林(1975-), 男, 四川广安人, 重庆大学光电工程学院, 硕士研究生, 主要研究方向为光学精密仪器、测试及控制等方面的研究。E-mail: tonnyue@163.com