

文章编号:1000-582X(2008)04-0397-04

球面弯晶分析器研制

施 军¹,肖沙里¹,王洪建¹,唐昶环²,刘慎业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 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘 要:在激光聚变实验中为了获取等离子体的重要信息,采用球面弯曲晶体成像谱仪来研究等离子体辐射的 X 射线,利用球面弯晶对 X 射线进行诊断而提供时间、空间、光谱分辨。该强聚焦晶体能增强信噪比,提高谱仪的空间分辨能力及立体角收集辐射能力。实验结果表明球面弯晶分析器对波长范围为 0.2~0.4 nm 的 X 射线其分辨率可达 600~1 000,聚光效率在同样距离条件下比平晶分析器高一个数量级以上,适合于研究等离子体 X 射线光谱学。

关键词:X 射线光谱学;等离子体诊断;弯曲晶体;球面成像

中图分类号:TL 651

文献标志码:A

Research and development of a spherical bent crystal analyzer

SHI Jun¹, XIAO Sha-li¹, WANG Hong-jian¹, TANG Chang-huan², LIU Shen-ye²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China)

Abstract: An X-ray imaging spectrometer with a spherically bent crystal was used to investigate critical issues in laser fusion experiments. A High-resolution bent crystal spectrometer for Z-pinch and laser-produced plasmas was developed on paper. We described the study of X-ray diagnostics to get temporal, spatial, and spectral resolutions simultaneously for the laser fusion experiments with a spherically-bent crystal. The use of a strongly-focusing crystal could significantly increase the signal-to-noise ratio. The collection solid angle of the spherically-bent crystal was larger than that of the pinhole camera and zone plate. The sensitivity of the focusing crystal analyzer was greatly enhanced. The results indicate that the calculated wavelength resolution is 600~1 000 in 0.2~0.4 nm, and the spherically bent crystal is suitable for study of diagnosing soft X-ray spectroscopy.

Key words: X-ray spectroscopy; plasmas diagnosis; bent crystal; spherical imaging

在激光聚变过程中,为研究等离子体电离、形成及融合过程,等离子体不稳定性及发展,内爆碰撞辐射过程,聚爆时 X 射线辐射变化过程和能转换机制,需采用晶体谱仪来获得聚爆靶发射的 X 射线时间分辨和二维空间分辨信息^[1-2]。球面弯晶成像谱

仪能够使等离子体成像,其图像诊断是研究高功率 Z 箍缩和激光等离子体聚爆过程与不稳定的主要手段。该成像能显示出裂变或聚变材料尺寸、形状和分布情况^[3-4],能深入研究等离子体状态及辐射的时空特性,从原理上解决辐射驱动靶球燃料界面诊

收稿日期:2007-12-08

基金项目:国家自然科学基金(NSAF 基金)资助项目(10576041)

作者简介:施军(1972-),男,重庆大学博士研究生,主要从事仪器科学与技术、X 射线光谱仪研究。

肖沙里(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65105287;(E-mail)xiaoshali@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

断难题,为聚变点火提供重要验证依据。该诊断技术优点在于:晶体分析器可远离靶点,避免碎片溅射以及韧致辐射背景对被测信号覆盖影响;其探测器位于罗兰圆聚焦点上而拥有较高空间分辨能力;比针孔相机和波带片有更大的立体角收集辐射能力。

1 球面弯曲晶体成像系统

1.1 球面弯曲晶体成像特点

在 ICF 激光实验研究中,由于其特殊的等离子体形状——大纵横比的线状结构,使平晶谱仪的应用受到很大的限制,通常无法同时得到高的谱分辨率、空间分辨率和灵敏度,特别是在利用 X 射线谱进行激光等离子体的参数诊断中,由于灵敏度低和光源加宽的影响,使掺杂等诊断技术的应用受到很大限制,还使得对一些十分重要的伴线、互组合线、共振线及其谱线形状不易分辨,影响了对其中物理过程的深入了解和研究。通常可行的解决方法是在谱仪中利用弯晶分析器代替平晶分析器,在弱源、长探测距离情况下特别适合于 X 射线激光的光谱研究,它能提高光信号的聚集作用,增加测量光谱范围^[5-6]。

使用球面弯曲晶体的成像方法已经在自发射显微镜和背光系统中得到广泛应用^[7]。在该成像配置中的谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)为 $10^3 \sim 10^4$ 的一段窄光谱波段中,能在需要的单色光中得到图像。其最明显最重要的差别是球面弯曲晶体成像仪比针孔相机和波带片有更大的立体角收集辐射能力。

球面弯曲晶体具有更好的聚焦能力,外部特定位置放置探测器。几乎所有其它 X 射线能量在图像中都将消除,因为它们不能被晶体反射。这种系统的空间分辨率依赖于球面镜光学原理和弯曲晶体的质量。以前这些光谱仪不可行的原因之一是不能精确地将晶体弯曲成小半径的弯晶分析器,而现在的工艺及设备已经能够保证其精度。在 X 射线背光几何机构中采用球面弯曲晶体能够消除硬 X 射线背景,当 X 射线满足布拉格条件时,来自于背光区域光源的软、硬 X 射线的背景都能被消除;通常约翰逊晶体几何学的光谱分辨率一般取决于 X 射线源的大小以及晶体的角散射性质,球面弯晶应用于背光几何机构的另一个优点是可用于获取空间分辨率小于 $10 \mu\text{m}$ 的图像;还有一个优点就是其空间分辨率只是部分依赖于 X 射线源的尺寸,这意味可采用大尺寸(大于 $100 \mu\text{m}$)的光源,相反,采用点发射系统来获取小于 $10 \mu\text{m}$ 的空间分辨率时,系统就必须采用一个低放大倍率的小光源,或者用针孔来减小光源尺寸,其代价是牺牲 X 射线照度。

1.2 球面弯曲晶体成像光路结构

由于弯曲晶体的强聚焦作用,能够适应软 X 射线诊断的要求,实验需要利用椭圆弯晶^[8-9]或球面弯晶来获取特定波长的 X 射线。在此采用的球面弯晶一维成像光路图几何关系如图 1 所示,X 射线从靶丸辐射出来之后,经球面晶体衍射及滤光膜透射,最后通过狭缝到达 CCD 探测器。

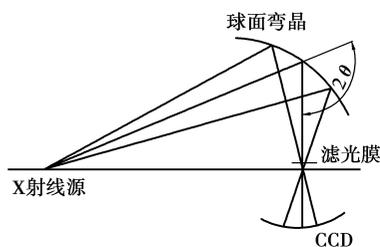


图 1 球面弯曲晶体衍射一维光路

这种方案基于晶面布拉格衍射,仅当 X 射线满足布拉格公式(1),才能被晶体反射。

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

式中: λ 为入射 X 光波长; d 为晶面间的距离; θ 为布拉格角; n 为反射级次。因为多数晶体的 $2d$ 范围在 $0.2 \sim 2 \text{ nm}$,所以使用布拉格晶体分光镜设备的等离子体光谱在 $1 \sim 10 \text{ keV}$ ($0.12 \sim 1.2 \text{ nm}$) 间较为理想。

目前国内弯晶谱仪通常采用约翰逊法光谱摄制法,聚焦晶体为圆柱形弯曲晶体。这里对约翰逊结构的一个改进方案是使用球状弯曲晶体来代替圆柱形弯晶,其几何原理可以用罗兰圆结构来描述^[10]。罗兰圆直径与晶体的弯曲半径相等,来自于罗兰圆上一点的辐射经过球形弯曲晶体反射后在罗兰圆上某点聚焦。在罗兰圆平面即子午平面,所有器件按约翰逊光谱摄制仪原理工作,按布拉格条件将 X 射线沿罗兰圆散开。在垂直罗兰圆平面上即弧矢平面,晶体如一凹面镜将 X 射线聚焦在此平面上(见图 2)。

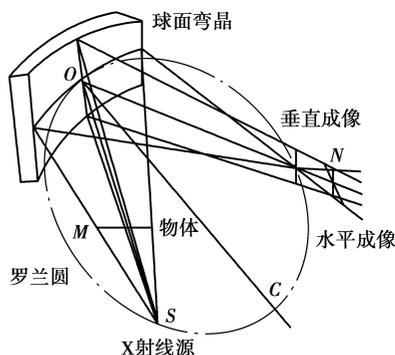


图 2 球面弯曲晶体二维成像光路

图2中,令 $OC=R, OS=a, OM=p, ON=q$,需要成像的物体置于罗兰圆内,与晶体距离为 p , p 必须满足

$$R_m \sin \theta > p > \frac{R_m}{2} \sin \theta, \quad (2)$$

式中: R_m 为晶体在子午面的弯曲半径; q 为晶体到探测器的距离。这些参量在水平面(子午)和垂直面(弧矢)满足式(3)(4)关系:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R_m \sin \theta}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin \theta}{R_s}. \quad (4)$$

在子午面上的放大率可由式(5)得到:

$$M_m = \frac{q - R \sin \theta}{R \sin \theta - p}. \quad (5)$$

在弧矢面上的放大率可由式(6)得到:

$$M_s = \frac{q}{p}. \quad (6)$$

对于球面系统在弧矢和子午方向的空间分辨率,可由式(7)估算给出:

$$\sigma = \frac{L_s(1 - R \sin \theta)(M + 1)}{M}. \quad (7)$$

由式(7)得到的空间分辨率只能是一近似值,实验得到的结果可能有所不同,由于式(3)决定探测器的位置,所以没有散光发生在子午面方向,因此该面上的空间分辨率优于式(7)的预期值。

1.3 球面弯曲晶体的聚焦特性

图3指明了球面弯曲晶体在子午(水平)弧矢(垂直)两平面射线的聚焦特性。晶体的中心与罗兰圆于 C 点接触,晶体半径为 R ,两倍于罗兰圆半径。晶体球面中心为 O , F_m 、 F_s 分别是子午、弧矢平面的焦点,其连线与晶体相交于 B 处。这些平面上的光线,通过 F_m 、 F_s 点,经晶体反射聚焦于 A 处的检测器,检测器平面假定垂直于 CA 。

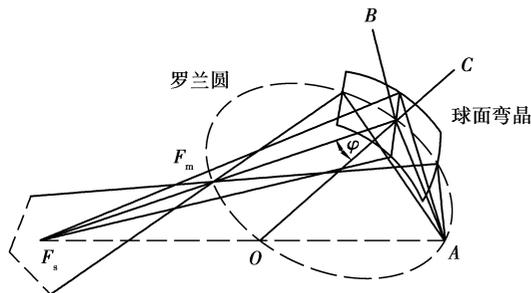


图3 球面弯曲晶体子午、弧矢面聚焦光路

f_s/f_m (子午、弧矢平面的焦距之比)由布拉格角 θ 的函数给出:

$$\frac{f_s}{f_m} = -\frac{1}{\cos(2\theta)}. \quad (8)$$

该等式由图3可得出,一光线入射至 B 在 A 点检测到,在平面内形成三角形 OBA 。三角形 OBA 与 OCA 是同样的三角形,可通过绕 OA 轴旋转形成, B 、 C 是球面上不同的点。入射光线经过弧矢面焦点 F_s ,该点必须在 OA 线上, OA 由子午平面和倾斜平面 OBA 相交形成。角度 φ 是入射光线与反射光线在 B 点的夹角, $\varphi=180^\circ-2\theta$ 。因为角 OAB 与 OAC 是相等角, $CA=f_m$,再由图3的几何关系就可推出等式(8)。

式(8)对球面晶体谱仪设计有重要的作用。布拉格角 $\theta < 45^\circ$ 时, f_s/f_m 比值为负,弧矢平面光线发散; $\theta > 45^\circ$ 时, f_s/f_m 比值为正,弧矢平面光线会聚; $\theta = 45^\circ$ 时弧矢平面光线是平行的。在 θ 为 45° 时可获得平行瞄准的弧矢平面光线,就能够利用通光孔径的高度尺寸,其数值几乎等于晶体直径。这相当有用,因为用于激光聚变相关的实验装置通光孔径必须尽可能小。

2 球面弯晶分析器的制作

由于云母晶体具有较好的光学特性,它可以通过加热到数百摄氏度而塑性弯曲成型,以适应晶体分析器所需要的曲率,故在此采用云母晶体来制作球面弯晶分析器。云母晶体通常使用的是沿 002 晶面的剥离,为了精确地控制晶面指向,同时要控制 1 mm 以下的厚度在工艺上有一定难度,较好的云母晶体通常使用改进型的布里奇曼技术来获得。晶体必须具有相当大的有效尺寸,目前国内能够使用的最大尺寸在 80 mm 以下。云母晶体本身具有较好的塑性变性能,但在 1° 以下的镶嵌延伸下容易损坏。它相对石墨有更好的韧性,更容易被应用。在使用好几个月后,该晶体的性能并无显著退化,可以完好地保持物质的原始结构。

晶体分析器衬底采用不锈钢材料,利用数控机床或者电火花加工。球形的表面应符合设计的理论数据,借助于三坐标仪测得球面曲线最大误差为 0.02 mm 。此外,还必须考虑到材料的机械加工特性、表面光洁度、温度膨胀系数。云母晶体按照预期的平面分成很多层,切割成约 0.2 mm 厚度的薄片,这些薄片置于数百度高温下,在凹凸折弯机上进行塑性弯曲。云母晶体片在2块凹凸钢模间进行挤压成形,分别具有凹凸的圆轮廓,以使晶体片具有准确的曲率。在凹面钢块表面和云母晶体片之间放置了弹性垫圈,凹面和凸面钢块精确地决定了云母晶体的曲率半径。将2个凹凸钢块连接成型在一起需要的压力要用螺杆和凸块之间的缓冲机构作用,以减

少过大压力造成晶体损坏的危险。由于热膨胀或者调节中的偶然事故而带来的尺寸改变也可能导致晶体材料在高温下损坏,这些都必须要制作过程中给以重点注意。最后将弯曲后的晶片用慢固化率的环氧树脂粘贴在球面不锈钢基底上。

制作完成的球面弯晶分析器实物见图4。

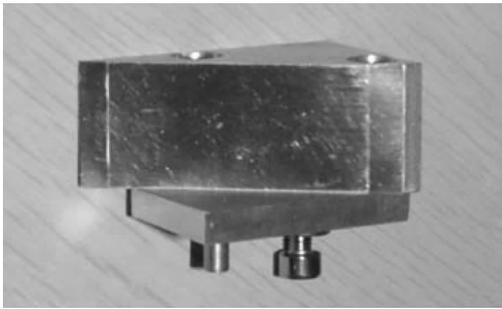


图4 球面弯晶分析器图

目前已进行的球面弯晶分析器聚光实验结果证明,该弯晶分析器具有很高的光谱空间分辨率和灵敏度,对波长范围为0.2~0.4 nm的X射线其分辨率可达600~1 000,在同样的距离条件下比平晶分析器高一个数量级的聚光效率,因此球面弯曲晶体特别适用于研究等离子体X射线光谱学。

3 结 语

随着国家神光、强光、托卡马克、箍缩、同步辐射等大型设施的建成,其相关诊断设备和物理实验方面的工作已非常迫切。而球面弯曲晶体成像是国内尚没有开展的一项具有挑战性的理论和实验研究,在国外一些国家已经有较好的实验研究基础。通过获得等离子体聚爆压缩图像、温度分布、密度分布等重要参数,可以分析等离子体的聚爆过程和辐射机理,探索提高总辐射能量的技术途径。球面弯晶技术也可用于天体等离子体物理、医学及生物化学分子成像等方面的研究,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 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]. Review of Scientific Instruments, 2004,75(10): 3672-3677.
- [2] 易荣清,杨国洪,崔延莉,等. 北京同步辐射3B3中能束
- 线X射线探测系统性能研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6287-6292.
- YI RONG-QING, YANG GUO-HONG, CUI YAN-LI, et al. Study of X-ray detector system characteristics on the 3B3 medium energy beamline in BSRF[J]. Acta Physica Sinica, 2006,55(12): 6287-6292.
- [3] SHELKOVENKO T A, PIKUZ S A, SKOBELEV I Y, et al. X-pinch plasma conditions from time resolved X-ray spectroscopy[J]. Review of Scientific Instruments, 2003,74(3): 1958-1961.
- [4] SHELKOVENKO T A, PIKUZ S A, SINARS D B, et al. Time-resolved spectroscopic measurements of ~ 1 keV, dense, subnanosecond X-pinch plasma bright spots[J]. Physics of Plasmas, 2002,9(5):2165-2173.
- [5] KOCH J A, AGLITSKIY Y, BROWN C, et al. 4.5 and 8 keV emission and absorption X-ray imaging using spherically bent quartz 203 and 211 crystals invited[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74 (3): 2130-2135.
- [6] HEETER R F, EMIG J A, FOURNIER K B, et al. X-ray spectroscopy with elliptical crystals and face-on framing cameras[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3762-3764.
- [7] LEE S G, BAK J G, BITTER M, et al. Imaging X-ray crystal spectrometers for KSTAR[J]. Review of Scientific Instruments, 2003,74(3): 1997-2000.
- [8] XIAO S L, PAN Y J, ZHONG X X, et al. High-resolution X-ray focusing concave (elliptical) curved crystal spectrograph for laser-produced plasma[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(8): 495-496.
- [9] 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 双通道椭圆弯晶谱仪分辨率的影响因素分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002,25(10):27-29.
- XIONG XIAN-CAI, ZHONG XIAN-XIN, XIAO SHA-LI, et al. Analysis on influencing factor of resolving ratio for two-channel elliptical crystal spectrometer[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002,25(10):27-29.
- [10] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, et al. Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine[J]. Applied Optics, 2003,42(19): 4059-4071.

(编辑 李胜春)