

文章编号 1004-924X(2007)06-0824-05

氟化锂椭圆弯晶分析器的特性及应用

肖沙里, 施 军, 雷小明, 钱家渝, 徐东镗

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 设计了测试能量范围为 0.6~6 keV 的椭圆弯晶谱仪。此谱仪利用椭圆自聚焦原理, 晶体分析器采用氟化锂材料, 椭圆焦距为 1 350 mm, 离心率为 0.958 6, 布拉格角范围为 30~65°。在神光 II 靶室进行了实验, 入射激光波长为 0.35 μm, 激光功率约为 1.6×10¹⁴ W/cm², 与厚度为 100 μm 的钛平面靶法线夹角约为 45°。实验结果证实, 弯曲的氟化锂晶体具有极佳探测效果, 弯晶分析器对波长为 0.2~0.35 nm 的 X 射线的分辨率可达 500~1 000, 同时具有等光程而便于空间分辨测量的优点, 在同样距离条件下比平晶分析器高一个数量级的收光效率, 故适合于激光等离子体 X 射线的光谱学研究。

关键词: 晶体谱仪; 弯晶分析器; 等离子体诊断; 积分反射率

中图分类号: O434.13; TH744.15 **文献标识码:** A

Characteristics and application of elliptical curved LiF crystal analyzer

XIAO Sha-li, SHI Jun, LEI Xiao-ming, QIAN Jia-yu, XU Dong-qiang

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the principle of elliptical focusing, an X-ray elliptical curved crystal analyzer whose measurement range, focal length, eccentricity and Bragg angle range are respectively 0.6~6 keV, 1350 mm, 0.9586 and 30°~60° was designed for investigating the laser producing plasmas. Aimed to the characteristic study of a high density plasma, a experiment was carried out with laser length of 0.35 μm, power of 1.6×10¹⁴ W/cm², and the incident angle on the Ti plane of 45°. The result shows that the sensitivity of elliptical curved LiF crystal has very good detection ability, its calculated wavelength resolution is about 500~1 000 in the range of 0.2~0.35 nm. Experimental results also show that the curved crystal analyzer can be used in spatial resolution measurement for aplanatic property, its sensitivity is higher than a flat crystal. It suggests that curved LiF crystal analyzer is suitable for plasma diagnostic.

Key words: Crystal spectrometer; crystal analyzer; plasma diagnosis; integrated reflectivity

1 引言

在激光产生等离子体领域中, X 射线辐射起着重要的作用^[1,2]。由于 X 射线很容易从等离子体内部逃逸而不受等离子体中产生的极大的电场和磁场影响,尤其是在激光驱动内爆过程中出现不透明的高密度区域,只有 X 射线是一种重要的信息源。X 射线也是研究高密度聚爆热稠密芯子的有用诊断工具。高温等离子体中的电子温度与离子温度大于 10^8 K, 压力大于 1.01×10^{16} Pa, 辐射温度大于 3.5×10^6 K, 根据 X 射线连续谱的斜率、谱线强度和谱线强度比可以确定等离子体的电子温度、电子密度、温度与密度梯度以及喷射速度等参数。与激光光谱学成像方法相比, X 射线光谱学诊断方法可以获得更高密度区的等离子体状态参数。X 射线光谱学方法是一种被动式诊断手段, 其优越性在于: 采用等离子体自身发射的 X 射线作为诊断工具不会对被测等离子体产生干扰, X 射线光谱的发射强度与等离子体的离化状态、能级布居等具有直接关系。因此, 激光等离子体 X 射线探测方法对核聚变研究具有重要而深远的影响。本文设计的谱仪利用椭圆自聚焦原理, 晶体分析器材料为氟化锂, X 射线经位于椭圆一焦点的靶丸辐射出来后, 通过椭圆弯曲晶体衍射, 滤光膜透射, 最后经过位于椭圆另一焦点的狭缝到达 CCD 探测器。实验结果证明, 本光谱分析仪的光谱空间分辨率和灵敏度很高, 摄谱范围宽、无像差, 同时还具有等光程便于空间分辨测量的突出特点, 在同样的距离条件下, 收光效率比平晶分析器高一个数量级, 故特别适合于对高温等离子体辐射的 X 射线进行诊断。

2 椭圆弯晶谱仪设计

ICF 激光实验研究中平晶谱仪的特殊等离子体形状——大纵横比的线状结构, 使其应用受到很大的限制^[3,4]。有些情况下, 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。一种解决方法就是用弯晶分析器代替平晶分析器, 这样在弱源、长探测距离情况下特别适合于 X 射线的光谱研究, 可以提高光信号的聚集作用, 增加光谱测量范围。

2.1 椭圆弯曲晶体分析器

为适应软 x 射线诊断的要求, 实验利用了椭圆弯曲晶体分析器^[5-8], 其光路几何关系如图 1 所示。X 射线从靶丸辐射出来之后, 经椭圆晶体衍射, 滤光膜透射, 最后通过狭缝到达 CCD 探测器。

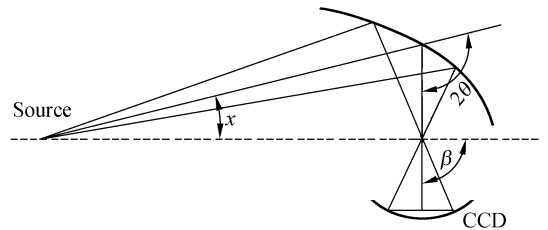


图 1 椭圆晶体衍射几何关系图

Fig. 1 Geometric graph of diffraction from elliptical analyzer

椭圆方程为:

$$\tan \theta = \frac{1 - \epsilon \cos \beta}{\epsilon \sin \beta}, \quad (1)$$

根据 Bragg 公式:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n=0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

当 $n=1$ 时, 由式(1)和式(2)式得到:

$$\sin \theta = \frac{1 - \epsilon \cos \beta}{\sqrt{1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos \beta}}, \quad (3)$$

则波长沿探测圆的弥散度为:

$$\frac{\lambda}{2d} = \sin \theta = \frac{1 - \epsilon \cos \beta}{\sqrt{1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos \beta}}, \quad (4)$$

式中, d 是晶面间距, λ 是 X 射线的波长, θ 是 Bragg 衍射角, β 是谱线的探测角, ϵ 是椭圆的离心率。

椭圆晶体分析器离心率为 0.958 6, 波长沿探测圆的弥散度曲线如图 2。从图中可以看出, 对同一种晶体而言, 测量的波长随探测角增大而增大, 而分辨率随探测角增大而减小。

与平面晶体相比, 弯曲面晶体是一种强聚焦的色散方法。其曲率允许侧向发散的同一波长也以同样的 Bragg 角到达晶面上, 这样就有更多同一波长的谱线同时在晶体上受到衍射。而且, 这种曲率还允许受衍射的谱线会聚到一条线或一个

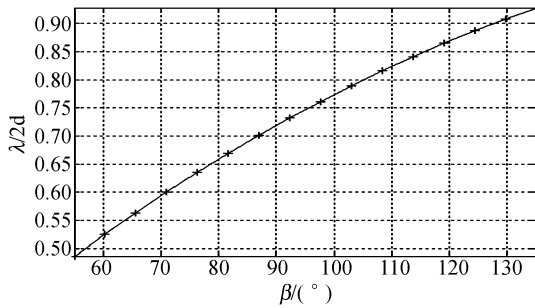


图 2 波长沿探测圆的弥散度曲线

Fig. 2 Wavelength dispersion along detection circle

点上。其结果,由它得到的衍射强度将远远大于利用平面晶体的光强,在 X 射线光学上起到强聚焦的作用^[9]。

2.2 晶体积分反射率

分光晶体是 X 射线晶体谱仪的关键部件,决定晶体性能的基本参数有:晶面间距、晶体衍射强度分布曲线的半宽高度(角秒)、峰值衍射本领、积分反射系数,这些参数与晶体的完整性和组分有关。大多数晶体由几十纳米左右、位向略有偏差的小镶嵌块组成,因此单色辐射的晶体衍射不只发生在单一的 Bragg 角度位置,而是发生在一个角度范围内,半高宽 W 由嵌块大小确定。峰值衍射系数 P 在某种程度上决定于晶体的组分, P 值表示在谱线峰值位置入射量子总数与衍射量子数之比。积分反射系数 R 等于衍射强度分布曲线所包围的面积, R 以弧度为单位。由 Bragg 公式可知,能被晶体衍射的最大波长 λ 为晶面间距的二倍。

表面磨过的氟化锂晶体,其积分反射系数 R 值比未磨时大,晶体表面的处理可使衍射强度提高,这是由于研磨造成的边缘位错促使完整晶面镶嵌块化,减弱消光效应,增大反射强度。但是,除碱金属卤素晶体外,大多数晶体都不能以这种简单的处理方法提高衍射强度,例如方解石晶体,其表面研磨后,虽然 R 值增大但 P 值却成比例地下降,结果 R 值仍无变化。在增加位错的实验中,充分利用了氟化锂晶体的这种有益的特性。把氟化锂晶体加热至 400°C 左右,使其弯曲成柱面,然后再变直,这样的弯曲使位错蔓延到整个晶体。研磨晶体表面,只能使位错扩展到表面以下大约 0.05 mm 的深度,故对于能穿过这种深度的短波辐射,必须用弯曲方式提高 R 值。由于氟化

锂晶体低吸收性和非完整性,故适用于 X 射线光谱分析。在选用分光晶体时,应尽量选择对任何波长均无二次谐波的晶面,但要注意三次谐波的贡献。氟化锂属于立方晶体,分子式是 LiF 。根据镶嵌晶体模型^[10-12],利用氟化锂的结构因子分量,可以得到的氟化锂积分反射率计算公式。

$$R_m = \frac{(r_0 \phi \lambda^2)^2}{16\pi\beta} (F_1^2 + F_2^2) \frac{1 + \cos^2(2\theta)}{\sin(2\theta)}, \quad (5)$$

式(5)中, ϕ 是单位体积内的晶胞数, λ 是软 X 射线的波长, β 是光学常数, θ 是软 X 射线的 Bragg 衍射角, r_0 是经典电子半径, F_1 和 F_2 是 KAP 的结构因子分量。利用式(1)计算出的氟化锂的积分反射率如图 3 所示。

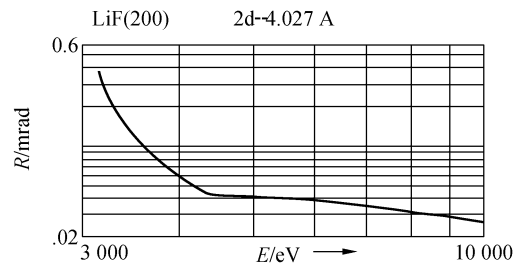


图 3 氟化锂的积分反射率

Fig. 3 Integrated reflectivity of LiF

2.3 弯晶分析器的制作

氟化锂晶体具有较好的光学特性,它可以通过加热到 600°C 左右而塑性弯曲成型,以适应晶体分析器所需要的半径。氟化锂晶体通常使用的是沿(200)晶面的剥离,精确地控制晶面指向又同时控制零点几毫米厚度在工艺上有一定难度,较好的氟化锂晶体通常使用改进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大约在 80 mm 以下。晶体本身具有一定的塑性变能力,但在 0.35° 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,利用数控铣床或者电火花加工。椭圆的弧形表面长 125 mm ,宽 8 mm 。椭圆形的表面应符合设计的理论椭圆方程曲线,借助于三维坐标仪测得椭圆曲线的最大误差为 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。不锈钢、铝、塑料被作为代表性的材料来使用。氟化锂晶体按照期望的平面分成很多层,切割成约 0.2 mm 厚的薄片,这些薄片置于 500~600℃ 温度下,在凹凸折弯机上进行塑性弯曲。氟化锂晶体片在两块凹凸钢模间进行挤压成形,分别具有凹凸的椭圆轮廓,以使晶体片具有正确的曲率。在凹面钢块表面和氟化锂晶体片之间放置了橡胶垫圈,凹面和凸面钢块精确地决定了氟化锂晶体的曲率半径。将两个凹凸钢块连接成型在一起的压力不能用螺杆直接产生,而要用螺杆和凸块之间的弹簧代替,以减少过大压力的危险,热膨胀或者调节中的偶然事故带来的尺寸的改变可能导致晶体的损坏。过大压力使其成型但可能导致晶体材料在高温下损坏,这点必须加以防止。

3 试验结果及分析

3.1 实验结果

实验在神光 II 靶室进行,厚度为 100 μm 的钛平面靶东偏南 50° 方向放置。三倍频激光由东向西入射,激光束与靶面法线夹角约为 45°,入射的激光波长为 0.35 μm ,激光功率约为 $1.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$,激光脉宽约 800 ps,焦斑直径约 250 μm 。弯晶分析器安装在靶室外面的正北方向上,狭缝宽度 1 mm,滤光片选用铍膜,粘贴在狭缝安装座的膜架上,记录系统采用美国 PI 公司的 1340×1300 面阵软 X 射线 CCD 相机,相机每个像素大小为 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。

在已进行的实验中,氟化锂晶体获得了相当好的效果,本文研究工作已经获取的谱线清晰、整齐,其强度也已经超过预期目标。氟化锂晶体获取的谱线图像如图 4 所示。

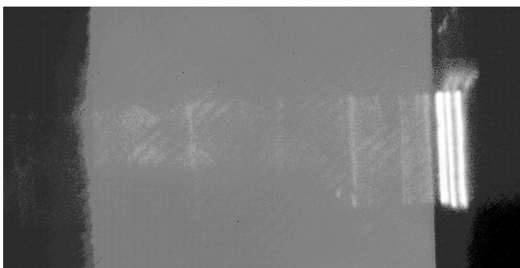


图 4 在 Ti 靶上获取的 LiF 谱线图

Fig. 4 LiF spectrum of Ti laser-plasma

谱线的强度分布如图 5 所示。

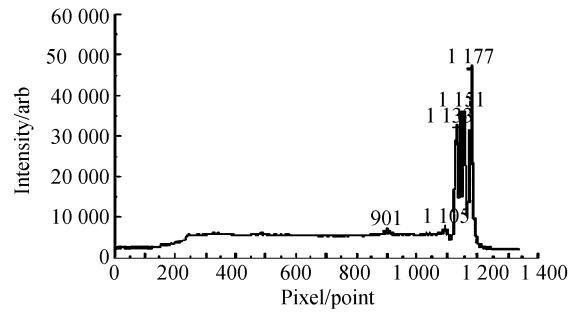


图 5 谱线强度分布图

Fig. 5 LiF spectral intensity

3.2 实验结果分析

实验结果利用 WinView32 软件对图谱进行数据处理,得到沿 X 方向的截面图,图 5 反映的是像素与光子数之间的关系,对图 5 利用 Microcal Origin 6.0 进行寻峰处理,得到谱线峰值的像素位置,最后利用 Matlab7.0 软件,并根据已知共振线的波长,计算峰值像素点对应的谱线波长,如表 1 所示。

表 1 谱线波长及分辨率

Tab. 1 Wavelength and spectral resolution

靶	晶体	象素	波长 (nm)	分辨率
Ti	LiF	1 133	0.266 0	690
		1 151	0.263 5	729
		1 177	0.261 0	925

4 结 论

目前椭圆弯晶分析器实验研究结果表明:该光谱分析仪具有光谱空间分辨率和灵敏度很高,摄谱范围宽、无像差等优点,还具有等光程而便于空间分辨测量的突出特点,对波长为 0.2~0.35 nm 的 X 射线其分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)可达 500~1000,在同样的距离条件下,收光效率比平晶分析器高一个数量级。因此,特别适用于激光等离子体 X 射线的光谱学研究。该研究工作率先在国内开展了 30~65° 宽摄谱范围 X 光光谱诊断,对激光等离子体诊断科研领域具有重要意义。

参考文献:

- [1] 孙岚, 韩中生, 徐至展, 等. 线状等离子体测量中的晶体谱仪及其在 X 射线实验中的应用[J]. 光学学报, 1994, 14(1): 62-66.
SUN L, HAN SH SH, XU ZH ZH, *et al.*. Crystal spectrometers in line-shaped plasma measurement and their application in experimental X-ray laser investigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(1): 62-66. (in Chinese)
- [2] 齐立红, 李忠芳, 尼启良, 等. 水靶激光等离子体光源 11~20 nm 波段光谱实验[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 272-275.
QI L H, LI ZH F, NI Q L, *et al.*. Experimental study of the spectrum at 11~20 nm of a laser-produced plasma source using water target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 272-275. (in Chinese)
- [3] 陈志伟, 王占山, 牛惠辉. 软 X 射线狭缝透镜光栅谱仪的研制[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 254-256.
CHEN ZH W, WANG ZH SH, NIU H H. Soft X-ray slit transmission grating spectrograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 254-256. (in Chinese)
- [4] 尼启良. 纳秒激光等离子体光源的光谱测量技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 211-218.
NI Q L. Technology for measuring spectrum from nanosecond laser plasma soft X-ray source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 211-218. (in Chinese)
- [5] ANDERSON S G, HEETER R F, BOOTH R, *et al.*. Broadband high-resolution elliptical crystal X-ray spectrometer for high energy density physics experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77, 063115-1_063115-5.
- [6] HENKE B L, YAMADA H T, TANAKA T J. Pulsed plasma source spectrometry in the 80-8000eV X-ray region [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1983, 54(10): 1311-1315.
- [7] HENKE B L, JAANIMAGI P A. Two-channel elliptical analyzer spectrograph for absolute time-resolving time-integrating spectrometry of pulsed X-ray sources in the 100-10000 eV region[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1985, 56(8): 1542-1545.
- [8] 熊先才, 钟先信, 肖沙里, 等. 用于测量激光等离子体 X 射线的椭圆弯晶谱仪[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 754-758.
XIONG X C, ZHONG X X, XIAO SH L, *et al.*. Elliptically bent crystal spectrometer for measuring laser-produced plasma x-ray[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 754-758. (in Chinese)
- [9] BIRKS L S. Convex curved crystal X-ray spectrograph [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1970, 41(8): 1129-1132.
- [10] HENKE B L, GULLIKSEN E M, DAVIS J C. X-ray interaction: photoabsorption, scattering, transmission and reflection at $E=50-30000\text{eV}$, $Z=1-92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 54(2): 181-200.
- [11] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 66-70.
JIN Ch SH, WANG ZH SH, CAO J L. Development of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 66-70. (in Chinese)
- [12] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 592-596. (in Chinese)

作者简介: 肖沙里(1953—), 男, 重庆人, 重庆大学光电工程学院教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为光学精密仪器、测试及控制等。E-mail: xiaoshali@equ.edu.cn