

文章编号:1000-582X(2008)08-0864-05

用于激光等离子体 X 射线诊断的谱仪

王洪建^{1,3}, 肖沙里¹, 施 军¹, 唐昶环², 刘慎业², 钱家渝¹

(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;

3. 重庆工商大学 重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067)

摘 要:为了诊断波长为 0.5~0.8 nm 的激光等离子体 X 射线, 研制了一种新型的高空间和光谱分辨率的晶体谱仪。采用 2 个不同分光计材料、不同形状且相互垂直分布的通道可以同时获得谱线的空间和光谱分辨率。利用成像板接收光谱信号, 其有效接收面积为 30 mm×80 mm。讨论晶体基本参数和给出了谱仪设计参数。在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 20 J 激光器装置进行实验, 两个方向的成像板同时获取得到了 Al 激光等离子体 X 射线光谱, 其中水平通道的 PET 平面晶体获取的空间分辨率为 1.73~6.88 mm, 而垂直通道的 Mica 球面弯晶得到的光谱分辨率达到 1 000~1 500。实验结果表明该谱仪适合于激光等离子体 X 射线的光谱学研究。

关键词:光谱仪; 激光等离子体; 球面晶体; 光谱学; X 射线诊断

中图分类号: O434.1

文献标志码: A

X-ray diagnosis spectroscopy of laser-produced plasma

WANG Hong-jian^{1,3}, XIAO Sha-li¹, SHI Jun¹, TANG Chang-huan², LIU Shen-ye², QIAN Jia-yu¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, P. R. China; 3. Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in

Development, Chongqing Business and Technology University, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract: A new crystal spectrometer with high spatial and spectral resolution was designed to measure very low emissive X-ray spectra of laser-produced plasma in the 0.5 nm to 0.8 nm range. Twin channels collocated perpendicularly with two different crystal materials and forms were utilized for simultaneous measurement of spectral and spatial resolution. The imaging plate was employed to obtain high spatial resolution with effective area of 30 mm×80 mm. The basic parameters of crystals were analyzed and the design parameters of the spectrometer are presented herein. The first experiment was carried out at the 20 J energy laser facility of Research Center of Laser Fusion, CAEP. X-ray spectra were obtained from Al laser-produced plasmas with a spectral resolution of 1 000 to 1 500 for the spherically bent mica crystal spectrometer and spatial resolutions of 1.73 mm to 6.88 mm for the flat PET crystal in the same condition. It is suggested that the device be used in high-density plasma diagnostics of a single laser shot.

Key words: spectrum spectrometer; laser-produced plasma; spherically bent crystal; spectroscopy; X-ray diagnostics

收稿日期:2008-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10576041)

作者简介:王洪建(1976-),男,重庆大学博士研究生,主要从事信息获取与处理、光学精密仪器等的研究。

肖沙里(联系人),男,重庆大学教授,博士,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>

在激光产生的等离子体领域中,获得激光等离子体的空间和时间分辨光谱是非常重要的^[1]。聚焦激光束的高功率密度可以很容易把物质加热到 KeV 温度产生强 X 射线辐射。X 射线可以广泛地用于诊断稠密激光的沉积和激光产生等离子体的输运区。因为 X 射线很容易从等离子体内部逃逸而且不受等离子体中产生的大电场和磁场的影响,X 射线也是研究高密度聚爆的热稠密芯子的有用诊断工具^[2]。高温等离子体中的电子温度与离子温度大于 108 K,压力大于 1.01×10^{16} Pa,辐射温度大于 3.5×10^6 K。

由于 X 射线测量使用了快速探测器,则可提供关于 ps 时间尺度在爆聚小丸中测量迅速演变的等离子体条件的一种手段。在间接驱动的内爆试验中可以使用 X 射线谱学,因为从 X 射线能谱和 X 射线成像的测量数据中可以提供关于等离子体的电子温度、电子密度、温度梯度与密度梯度以及等离子体的不透明度等物理参数^[3]。借助于点火具有高 Z 气体的氙燃料,可以推论与时间相关的燃料密度(根据斯塔克 stark 增宽发射轮廓测量^[4])和电子温度(根据 X 射线能谱的斜率或谱线强度比^[5])。

因此,激光等离子体 X 射线探测研究对核聚变研究具有重要而深远的影响。Kim 等人^[6]在研究 Al 激光等离子体极化实验中,采用方解石作为色散元件测得了电子密度和温度。杨柏谦等人^[4]用 PET 平晶在“星光”装置上测量了 Al 等离子体光谱,光谱分辨率约为 800。实验设计的谱仪利用平面色散方法和晶体间距,采用相互垂直布置的 PET 平晶和 Mica 球面弯晶为分析器材料,X 射线到达成像板的光路长为 980 mm,实验获取了 Al 等离子体光谱,其中 PET 平面晶体获取的空间分辨率为 1.73~6.88 mm,而 Mica(002)球面弯晶得到的光谱分辨率为 1 000~1 500。实验表明该谱仪适合于激光等离子体 X 射线的光谱学研究。

1 晶体谱仪的原理

分光晶体是 X 射线晶体谱仪的关键设备,决定晶体性能的有四个基本参数:晶体间距 d 、晶体衍射强度分布曲线的半高宽度 W (角秒)、峰值衍射本领(%)和积分反射系数 R (rad)。这些参数与晶体的完整性和组分有关^[7]。峰值衍射系数 P 在某种程度上决定于晶体的组分(通过原子散射因子和空间群), 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。X 射线入射

到晶体上之后,在晶面上发生反射。但是,只有沿镜式反射方向反射的射线强度最大,发生衍射必须满足 Bragg 条件^[8]为

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

其中: θ 是 Bragg 衍射角, m 是衍射级次, λ 是 X 射线的波长。

因为 $\sin\theta > 1$,所以能被晶体衍射的最大波长 λ_{\max} 为晶面间距的二倍,即 $\lambda_{\max} = 2d$ 。 d 还影响晶体的色散本领 $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$,表示为

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{2d\cos\theta} \quad (2)$$

一般情况,谱仪对 X 射线的角色散率越大,其谱分辨能力就越强。实际工作中,通常用晶面间距尽可能与待测的最大波长相接近的晶体作为分光晶体。根据镶嵌晶体模型^[9],利用立方晶体的结构因子分量,可以得到该晶体的积分反射率计算公式

$$R = \frac{(r_0\phi\lambda^2)^2}{16\pi\beta} (F_1^2 + F_2^2) \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta} \quad (3)$$

其中: ϕ 是单位体积内的晶胞数; β 是光学常数; r_0 是经典电子半径; F_1 和 F_2 是晶体的结构因子分量。

由于此次实验的激光装置设备的特点,以打 Al 的类氢(Al XIII)线为主要目的,对于 H-like,则 $nnp \rightarrow 1snp$ (内层电子跃迁)是主要的跃迁通道。铝的类氢类氦类锂的自由离能级和跃迁下态能级都具有类氢的特点,即能量与 $1/n^2$ (n 是主量子数)有近似直线的关系。

表 1 两种晶体测量的波长范围

晶体	hkl	晶格/nm	级次	测量范围/nm
PET	002	0.874	1	0.44~0.71
Mica	002	1.984	2	0.49~0.92

2 晶体谱仪结构

谱仪采用 PET 和 Mica2 种晶体作分光元件,当 X 射线入射到晶体上时,晶体点阵中的原子(或离子)就成为子波的波源,向各个方向发出散射波,两列散射波经相互干涉后发生衍射。根据式(1)和 Al 类氢波长,计算出两种晶体测量的 X 射线波长范围,如表 1。其中云母晶体材料具有良好的热稳定性^[10]和 1~10 级的多级反射率^[11],此处 m 取 2,满足测量范围。

晶体谱仪的光学原理结构如图 1 所示。由于 Mica 球面晶体与 PET 平面晶体相互垂直安装,二维图中未标明垂直方向的 Mica 球面晶体光路。激

光谱信号强度较弱,且存在一条明显的谱线,如图 4 所示。

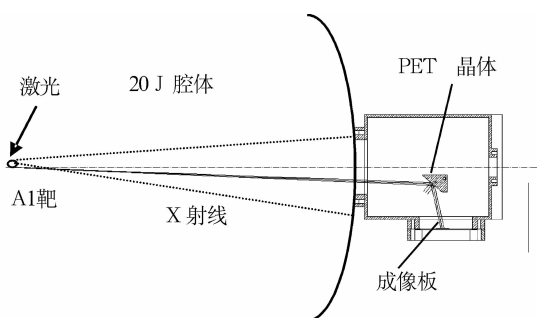


图 1 晶体谱仪示意图

光打靶产生的 X 射线源位于真空靶室的球心上,然后点光源发生散射光,在满足 Bragg 条件下,经过晶体反射光线。Mica 球面晶体与 PET 平晶相邻安装,其中 Mica 球面弯晶半径为 380 mm,满足 Johann 几何原理^[8]。记录光谱信号采用成像板进行接收(位于 Mica 球面弯晶的罗兰圆上),其有效面积为 30 mm×80 mm。从 X 射线光源到成像板的光路较长,达 980 mm。根据几何光学原理,制成了等离子体射线光谱仪,并将谱仪接在真空靶源腔中,如图 2 所示。

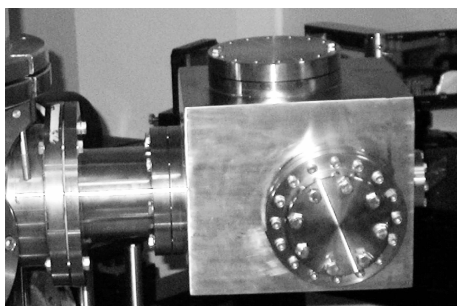


图 2 晶体谱仪实物

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

在中国工程物理研究院激光聚变研究中心 20 J 激光装置上,聚焦三倍频激光束(波长为 0.35 μm)于真空靶室内的固体平面微点靶表面,产生了激光等离子体,形成了高剥离态热等离子体光源^[12]。靶直径小于 0.6 mm,靶的纯度为 99.99%,单支激光能量为 5~10 J,焦斑直径为 200~250 μm,激光脉宽为 600~800 ps。晶体分析器安装在靶室外面与入射激光呈 90°的方向上。

实验激光的能量为 6.78 J,具有高积分率的 PET 平晶得到铝等离子体 X 射线的光谱,存在明显的 4 条谱线,如图 3 所示。而 Mica 球面弯晶获取的

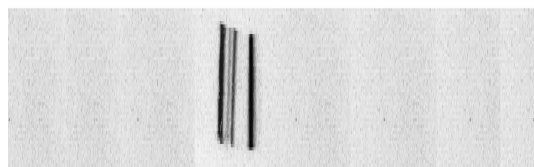


图 3 在 Al 靶上获取的 PET 平晶谱线图

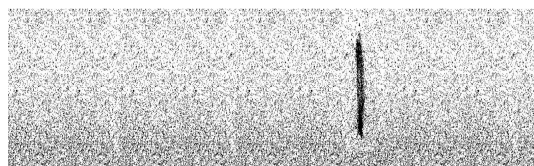


图 4 在 Al 靶上获取的 Mica 球面弯晶谱线图

3.2 实验结果分析

在等离子体诊断中,识谱是实现等离子体的诊断最基本的条件^[13]。实验结果利用 WinView32 软件对图谱进行数据处理,得到沿横坐标的截面图。图 5 反映的是 PET 平面晶体获取的谱线光子能量与光强的关系,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。类氢共振线 w 强度最强,最高峰值为 1623。但半最大值全波(FWHM)较大,光谱分辨率^[14]较低($\lambda/\Delta\lambda = 59.1$),信噪比差,光谱中还存在磁四极线 x、互组合线 y 和禁戒线 z,强度分别为 372、174 和 669。利用三点外推法原理和 Matlab 软件,将像素与强度之间的关系转换为波长与强度之间的关系,PET 平晶获取主要谱线间的空间分辨率^[15]为 1.73~6.88 mm。而在相近的位置放置的 Mica(002)球面晶体(谱线如图 6),用同样的软件方法处理,得到最高谱线峰值只有 153,但半最大值全波(FWHM)较小,信噪比高,最高光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda = 1389$)较高,但是其余谱线强度很低。2 种晶体分光计比较,PET 平晶获取的光子数比 Mica 球面弯晶高一个数量级,而且得到了空间分辨率,但光谱分辨率低。

4 结 论

研制的光谱分析仪是一种新型、价廉、适用的激光等离子体实验诊断仪器,具有摄谱范围宽、无像差等优点,光路设计简单。在低能量激光实验中得到了光谱信号,测量了波长范围为 0.5~0.8 nm 的软 X 射线,其中 PET 平晶获得的空间分辨率为 1.73~6.88 mm,Mica 球面弯晶获取的光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)

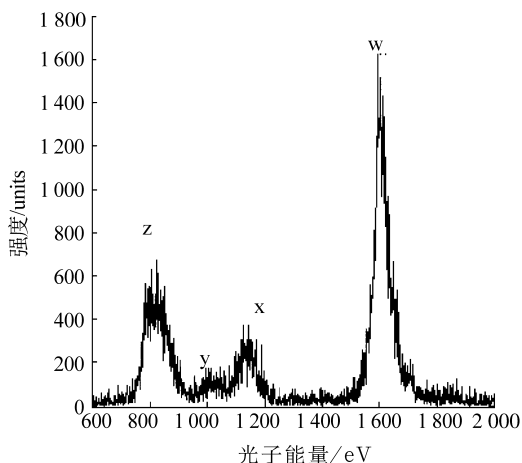


图 5 PET 平晶谱线强度分布图

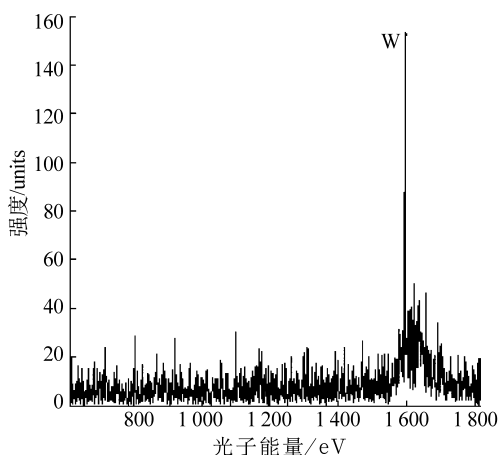


图 6 球面弯晶 Mica 晶体谱线强度分布图

为 1 000~1 500。实验结果表明该谱仪适合激光等离子体 X 射线的诊断。

PET 平晶记录光子能力强,获取的光子总数比 Mica 球面弯晶高了一个数量级,但光谱分辨率比球面晶体低 20 倍。因此如果将 PET 晶体材料设计做成球面,X 射线在空间上展开得更宽,就可以获得信号强、空间和光谱分辨率更高的 X 射线光谱。此外,由于成像板随时间放电,获得的光谱信号随时间衰减,如果不及时从真空谱仪中取出成像板进行谱分析,将影响光谱信号的强度。故下一步工作重点是对晶体材料、形状和接收信号材料设计修改,以便更好适合激光等离子体 X 射线的光谱学研究。

参考文献:

[1] 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 软 X 射线椭圆晶体谱仪的研制[J]. 仪器仪表学报,2005,26(12):1219-1222.

XIONG XIAN-CAI, ZHONG XIAN-XIN, XIAO SHA-LI, et al. Design of soft X-ray elliptical crystal spectromete [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(12): 1219-1222.

[2] BLASCO F, STENZ C, SALIN F, et al. Portable, tunable, high-luminosity spherical crystal spectrometer with an X-ray charge coupled device, for high-resolution X-ray spectromicroscopy of clusters heated by femtosecond laser pulses [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4): 1956-1962.

[3] 杨国洪,张继彦,张保汉,等. 金激光等离子体 X 射线精细结构谱研究[J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2389-2389.

YANG GUO-HONG, ZHANG JI-YAN, ZHANG BAO-HAN, et al. Analysis of fine structure of X-ray spectra from laser-irradiated gold dot[J]. Acta Physica Sinica, 2000,49(12): 2389-2389.

[4] 杨柏谦,张继彦,韩申生,等. Al 激光等离子体电子密度的空间分辨诊断[J]. 强激光与粒子束,2005,17(5): 703-706.

YANG BO-QIAN, ZHANG JI-YAN, HAN SHEN-SHENG, et al. Space-resolved diagnosis for the electron density of laser-produced aluminum plasma [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2005, 17(5):703-706.

[5] 张继彦,杨家敏,郑志坚,等. Al 激光等离子体电子温度的时间分辨诊断[J]. 强激光与粒子束,2004,16(9): 1153-1156.

ZHANG JI-YAN, YANG JIA-MIN, ZHENG ZHI-JIA, et al. Time-resolved diagnosis of the electron temperature of laser-produced aluminum plasma [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2004, 16(9): 1153-1156.

[6] KIM J H, KIM D E. Measurement of the degree of polarization of the spectra from laser produced recombining Al plasmas[J]. Physical Review E ,2002, 66: 17401.

[7] 肖沙里,施军,雷小明,等. 氟化锂椭圆弯晶分析器的特性及应用[J]. 光学精密工程, 2007,15(6): 824-828.

XIAO SHA-LI, SHI JUN, LEI XIAO-MING, et al. Characteristic and application of elliptical curved LiF crystal analyzer[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 824-828.

[8] TURNER D C, KNIGHT L V. Focusing crystal von hamos spectroments for XRF aplications[J]. Advances in X-Ray Analysis, 2001,44: 329-335.

[9] 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 镶嵌晶体模型在计算 KAP 积分反射率中的应用[J]. 压电与声光, 2005, 27(3): 306-308.

XIONG XIAN-CAI, ZHONG XIAN-XIN, XIAO

- SHA-LI, et al. Application of mosaic crystal model in calculation of integrated reflectivity for KAP [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(3): 306-308.
- [10] IMAZONO T, ISHINO M, KOIKE M, et al. Performance of a reflection-type polarizer by use of muscovite mica crystal in the soft X-ray region of 1 keV [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76: 23104.
- [11] PIKUZ T A, YA A. Bragg X-ray optics for imaging spectroscopy of plasma microsources[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 1995, 5: 323-340.
- [12] NUBUSHI Y, NISHIMURA H, OCHIAI M. X-ray polarization spectroscopy for measurement of anisotropy of hot electrons generated with ultraintense laser pulse [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3699-3671.
- [13] 程新路, 刘小红, 杨向东, 等. 激光金等离子体谱中 3d-5f, 3p-5s 跃迁子阵计算[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(1): 83-87.
- CHENG XIN-LU, LIU XIAO-HONG, YANG XIANG-DONG, et al. Calculation of the 3d-5f, 3p-5s subarrays in the spectrum of a laser produced plasmas of gold [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 1999, 11(1): 83-87.
- [14] WEINHEIMER J, AHMAD I, HERZOG O, et al. High-resolution X-ray crystal spectrometer/polarimeter at torus experiment for technology oriented research-94[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(6): 2566-2574.
- [15] PIKUZ S A, SHELKOVENKO T A, ROMANOVA V M, et al. High-luminosity monochromatic X-ray backlighting using an incoherent plasma source to study extremely dense plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 740-744.

(编辑 赵 静)

(上接第 863 页)

- [4] PAPEGAY Y A, MERLET J P, DANEY D. Exact kinematics analysis of car's suspension mechanisms using symbolic computation and interval analysis [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(4): 395-493.
- [5] 陈立平, 张云清, 任卫群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 沈庆云, 沈自林. 基于 UG 的四连杆机构的运动分析仿真[J]. *轻工机械*, 2006, 24(4), 74-75.
- SHEN QING-YUN, SHEN ZI-LIN. The analysis simulation for movement of four-link-lever mechanism based on UG[J]. *Light Industry Machinery*, 2006, 24(4), 74-75.
- [7] WEI H X, LIU M Z, WANG S Y, et al. Analysis of kinematics of humanoid running robot [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(13): 1321-1324.
- [8] 陆凤仪, 徐格宁. 平面连杆机构运动误差及可靠性分析[J]. *起重运输机械*, 2003, 4: 25-27.
- LU FENG-YI, XU GE-NING. Analysis of reliability and motion error of planar linkage[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2003, 4: 25-27.
- [9] SLOCUM A, MATTOON R L. Precision machine design [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1993, 46(3): B42.
- [10] 祁富燕, 张文辉, 晏丽琴. 机器零件的精度设计[J]. *甘肃科技纵横*, 2007, 35(6): 34-35.
- QI FU-YAN, ZHANG WEN-HUI, YAN LI-QIN. Precision design of machinery parts [J]. *Scientific & Technical Information of Gansu*, 2007, 35(6): 34-35.
- [11] 闫群, 袁夫彩, 王晓霞. 机械系统精度分配与评价方法的研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2002, 30(8): 21-23.
- YAN QUN, YUAN FU-CAI, WANG XIAO-XIA. Research on the accuracy theory of mechanical system [J]. *Machinery & Woodworking Equipment*, 2002, 30(8): 21-23.
- [12] PRESCOTT B. Accuracy measurements for modern dispensing [J]. *SMT Surface Mount Technology Magazine*, 2006, 20(6): 36-38.
- [13] 葛正浩, 蔡小霞, 杨芙莲. 凸轮连杆机构的精度分析与综合[J]. *中国制造业信息化*, 2003, 32(2): 112-113.
- GE ZHENG-HAO, CAI XIAO-XIA, YANG FU-LIAN. Precision analysis and synthesis of cam-linkage mechanisms [J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2003, 32(2): 112-113.
- [14] BRIZARD M, MEGHARFI M, MAHE E. Design of a high precision falling-ball viscometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(2): 025109-1-025109-6.
- [15] 李军, 邢俊文, 覃文洁, 等. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

(编辑 赵 静)