

高分辨椭圆弯晶谱仪在激光等离子体实验中的应用*

王瑞荣^{1,2}, 肖沙里¹, 钱家渝¹, 董佳钦²,
熊俊², 傅思祖², 陈伟民¹

(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 上海激光等离子体研究所 高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 描述了用于激光等离子体 X 射线光谱研究的椭圆弯曲晶体谱仪系统。在“神光 II”第九路激光上对该谱仪进行标定实验, 利用 CCD 相机成功地获得了激光等离子体铝和钛离子的 K 壳层和金离子 M 壳层谱; 通过研究和辨认谱线, 得到了 X 射线光谱, 同时还给出了实验测定的谱仪分辨率。椭圆弯曲晶体谱仪除有高的收集光子效率外, 还有更好的谱分辨和空间分辨率。分析了椭圆弯曲晶体谱仪在前沿科学技术和高技术实验中的应用。

关键词: X 射线光谱学; 椭圆分光晶体; 激光等离子体; 谱分辨率

中图分类号: O536 **文献标识码:** A

等离子体的应用研究已经发展成为当前一个重要而又活跃的研究领域, 20 世纪 90 年代以来, 随着激光技术的重大突破, 激光能量、功率开始变得越来越强, 通过更好地控制激光等离子体的状态, 使得在实验室里进行水窗波段 X 射线激光的研究成为可能^[1-2]。到目前为止电子碰撞激发机制已被认为是最可靠产生饱和及高能输出的方法, 人们对它的工作机制已有了全面的了解, 其中类镍系列 X 射线激光是目前唯一进入水窗区的 X 射线激光。理论分析和设计 X 射线激光主要依靠复杂的 1 维和 2 维流体力学及原子动力学的数值模拟。对于模拟激光等离子体相互作用和 X 射线激光的产生, 应该考虑多个因素, 其中激发能级的原子数据必须完整和正确。对类镍机制来说, 由于其具有比类氦机制更为复杂得多的能级结构和原子数据, 因此对类镍 X 射线激光的模拟研究就更为困难。多电荷离子的 X 射线谱包含了等离子体的丰富信息和特征, 因此 X 射线谱是研究高功率激光产生的高密度等离子体的动力学量及辐射特性的重要工具^[3-4]。但高电离态离子 X 射线谱复杂, 给实验诊断工作带来了不少的困难, 影响了对其中物理过程的深入了解和研究, 而实验中采用高收集效率和高分辨的谱仪是一种有效的解决方法。

实验中, 人们用平面晶体或约翰逊(Johnson)聚焦晶体谱仪已经获得了十分丰富的激光等离子体高价离子光谱^[5-6], 约翰逊聚焦晶体谱仪设计比传统的平晶谱仪除有好的分辨率外, 提高了收集效率, 缺点是在同一发次中, 获得的谱范围变窄。为了测量更广范围的等离子体辐射的 X 射线的光谱, 以获取更多激光等离子体状态的特性, 基于椭圆柱面弯曲晶体的分光原理, 提出了椭圆柱面弯曲晶体谱仪。本文叙述了 X 射线椭圆柱面弯曲晶体谱仪获得的 X 射线光谱以及实验测定的谱仪光谱分辨率。

1 椭圆柱面弯曲晶体谱仪

该谱仪的结构如图 1 所示。晶体位于椭圆柱面上, 光源在椭圆一焦点, 诊断系统 CCD 放在另一焦点(汇聚点或出射孔)的正下方。焦点上的光源发出的光线经椭圆凹柱面衍射到另一焦点, 且光程为一定值。这一特点

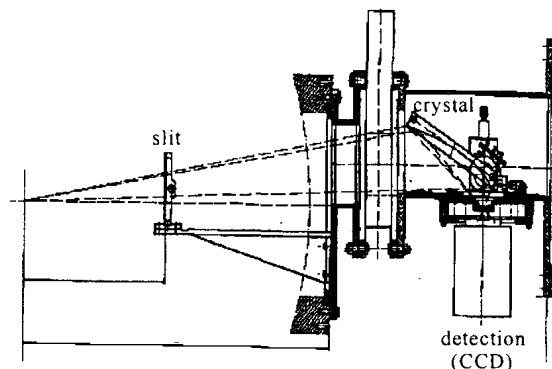


Fig. 1 Structure of spectrometer

图 1 谱仪结构图

* 收稿日期: 2007-03-05; 修订日期: 2007-06-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 王瑞荣(1964—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事 X 射线的诊断及谱线研究; Wangrr59@citiz.net.

对谱线标识、谱仪与光源间的准直带来了不少方便。入射窗为双向可调式狭缝,缝宽可变(从 0 到 14 mm,狭缝中心可左右移动 7 mm),缝长 80 mm。分光晶体分别为 LiF(220)和 PET(002)两种晶体,挡可见光的滤光片藏在汇聚点处,其支架与窗口之间有很大的通道,以利于谱仪内部的抽空,减少对薄滤片的冲击破坏。

2 椭圆弯晶谱仪的几何模拟

对于椭圆弯曲晶体谱仪,有布拉格衍射公式

$$k\lambda = 2d\sin\theta \tag{1}$$

式中: λ 为入射波长; θ 为布拉格衍射角; d 为晶格常数; k 为衍射级次。

在图 2 中,可得出 β 与 θ 之间的关系为

$$\beta = \theta + \arccos\left(\frac{\cos\theta}{e}\right) \tag{2}$$

式中: e 是椭圆的离心率。

在 CCD 面上建立 1 维笛卡儿坐标系,如图 3(a) 所示。如果仅考虑 X 射线在晶体上的一级布拉格衍射,则可得 CCD 探测到谱线的线色散率为

$$\frac{d\lambda}{d\lambda} = \frac{r(1 - 2e\cos\beta + e^2)^{3/2}}{2de^2(e - \cos\beta)\sin^2\beta} \tag{3}$$

任一谱线波长 λ 与其在 CCD 阴极面上的 x 坐标的关系为

$$\frac{\lambda}{2d} = \frac{1 - e \times \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}}{\sqrt{1 + e^2 - 2e \times \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}}} \tag{4}$$

式中: r 为汇聚点到 CCD 面的距离。图 3 为 CCD 阴极面上的谱特性模拟的结果。

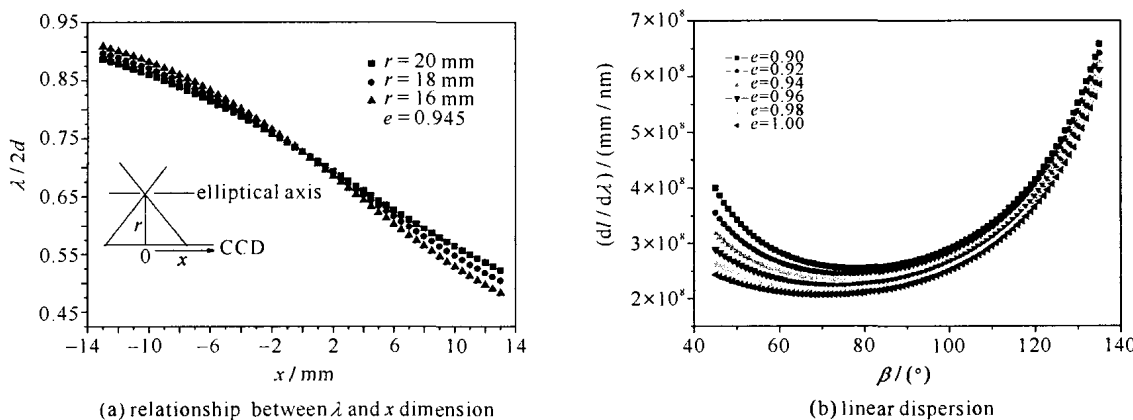


Fig. 3 Simulated spectral characterization on cathode plane of X-ray CCD

图 3 CCD 阴极面上的谱特性模拟

图 3 结果表明:波长在 CCD 探测面的线色散是随光谱探测角增大,线色散率先减小后增大;在一定的区域条件下,光谱探测角大,光谱分辨率就越高;椭圆离心率小,有利于提高光谱分辨率,但在同样的谱区内,大大增加了椭圆形晶体的长度,降低了谱仪的性价比,同时增加了晶体加工的难度,图 3(a)表明, r 的增大有利于谱分辨率的提高。

激光产生的 X 射线源尺度与靶材料有关,一般低 Z 靶产生大的源尺寸,高 Z 靶形成小的源尺寸。但对椭圆弯曲晶体谱仪来说,谱仪的固有特性,可以不考虑源对谱分辨率的影响。以椭圆长轴 $a=513.28$ mm,椭圆短轴 $b=168.02$ mm,椭圆离心率 $e=0.945$ 为主要特征参数的椭圆弯曲晶体谱仪,可推出谱仪的理论谱分辨率(PET 晶体)为 1 461.9。

3 实验及其实验结果

实验在“神光 II”高功率钷玻璃激光器第九路 X 激光靶室上进行。打靶方式分两种:一种是点焦方式,光

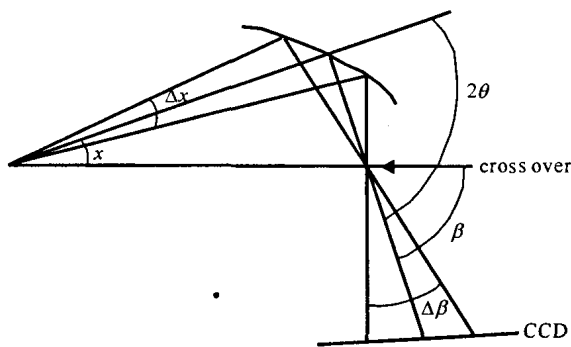


Fig. 2 Defining the basic geometrical parameters for elliptical crystal spectroscopy

图 2 定义椭圆晶体谱仪的基本几何参量

斑 $\phi=230 \mu\text{m}$, 基频($\lambda=1.053 \mu\text{m}$)能量大约 2 kJ, 倍频($\lambda=0.532 \mu\text{m}$)能量大约 600 J, 脉宽为 2.1 ns; 另一种是大光斑, 光斑 $\phi=1 \text{mm}$, 基频($\lambda=1.053 \mu\text{m}$)能量大约 2.8 kJ, 倍频($\lambda=0.532 \mu\text{m}$)能量大约 1.2 kJ, 脉宽为 2.1 ns, 靶面功率密度可达到约 $1.014 \text{W}/\text{cm}^2$ 。靶材料为铝(Al)、钛(Ti)和金(Au); 衍射晶体分别为 LiF 和 PET; 滤片是 $8.5 \mu\text{m}$ 铝、 $12.3 \mu\text{m}$ 铁或 $8.5 \mu\text{m}$ 钛膜。

谱仪观察方向与入射激光轴(即靶面法线方向)正下方成 42° 。诊断系统采用美国 PI 公司的 1024×1024 面阵软 X 射线 CCD 相机记录, 像素的大小为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 。图 4 是实验中用新研制的椭圆弯曲晶体谱仪(PET 作为衍射晶体)测得的某一发的光谱图像, 滤片是 $8.5 \mu\text{m}$ 铝膜。图 5 是利用(4)式对图 4 进行谱线的辨认和标识, 辨认后准确地给出了光谱线的值, 所获得的铝 $\text{Al}^{+11}(1s^2-1s4p)$, $\text{Al}^{+11}(1s^2-1s5p)$, $\text{Al}^{+12}(1s-2p)$ 和 $\text{Al}^{+12}(1s-3p)$ 等几条共振光谱线。椭圆弯晶谱仪的分辨率采用光谱中最窄谱线半宽度来估算。在图 5 铝(Al)的 X 射线线谱中, 在 0.609nm 附近发现一条最狭窄的谱线, 对应的 $\Delta\lambda=0.0007 \text{nm}$, $\lambda/\Delta\lambda=870$, 但图 5 中并没有考虑滤片的影响, 如果考虑滤片的影响, 谱仪的实验谱分辨大约为 1000。由此可得到该椭圆弯晶谱仪的实验谱分辨率近似为 1000。

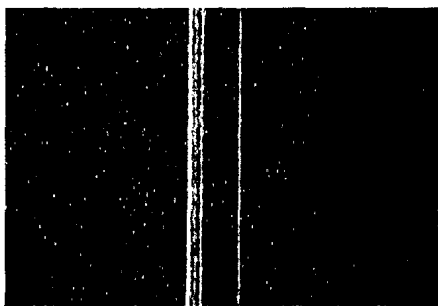


Fig. 4 CCD photograph of X-ray spectrum
图 4 CCD 摄到的 X 射线图像

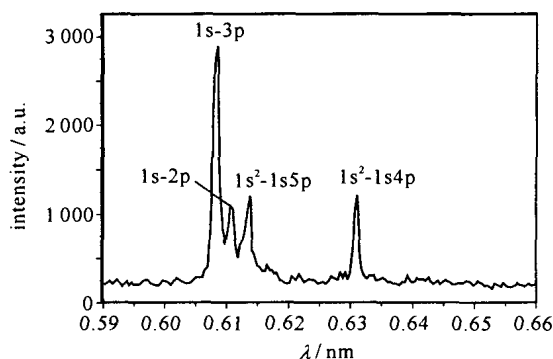


Fig. 5 X-ray line spectra from Fig. 4
图 5 辨认后 X 射线线谱图

4 结 论

采用椭圆弯曲晶体分析器、可调狭缝和 X 射线 CCD 相机等主要部分组成的 X 射线测量系统的实验应用, 可获得具有光谱分辨和空间分辨信息的 X 射线发射光谱。谱仪具有宽的布拉格衍射角, 即 $27^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 、高的光谱分辨率、好的空间分辨率和高的收集光子效率等特点, 适合于高功率激光产生的等离子体 X 光谱实验研究, 也可用于国家高技术和前沿科学技术项目的实验和应用研究中, 如 X 射线激光, 惯性约束聚变(ICF)辐射温度测量, 高次谐波等。椭圆弯曲晶体谱仪还可以着眼于激光等离子体的 2 维成像实验, 研究 X 射线激光增益区域的等离子体均匀性。与条纹相机连接, 还可以实现同时对某一谱线进行时空演化过程的实验研究。

参考文献:

- [1] MacGwan B J, Maxon S, Hagelstein P H, et al. Demonstration of soft-X-ray amplification in Nickel-like ions[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**: 2157-2160.
- [2] MacGwan B J, Maxon S, Da Silva L B, et al. Demonstration of X-ray amplifiers near the carbon K edge[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **65**:420-423.
- [3] 杨家敏, 丁耀南, 孙可照, 等. $1.053 \mu\text{m}$ 激光辐照金箔靶发射 X 射线能谱的实验研究[J]. 物理学报, 2000, **49**:2408-2413. (Yang J M, Ding Y N, Sun K X, et al. Experimental study on X-ray spectra from gold foil target irradiated by $1.053 \mu\text{m}$ laser. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**:2408-2413)
- [4] Zigler A, Jacobs V L, Newman D A, et al. Observation of density-enhanced dielectronic satellite spectra produced during subpicosecond laser-matter interactions[J]. *Phys Rev A*, 1992, **45**:1569-1574.
- [5] Kyrala G A, Fulton R D, Wahlin E K, et al. X-ray generation by high irradiance subpicosecond lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**:2195-2197.
- [6] 王瑞荣, 王伟, 王琛, 等. 双驱动 X 射线激光等离子体能谱特性研究[J]. 物理学报, 2003, **52**:556-560. (Wang R R, Wang W, Wang C, et al. Spectral characterization of double-driven X-ray laser plasmas. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**:556-560)

Application of high-resolution elliptical crystal X-ray spectrometer to laser-produced plasma experiment

WANG Rui-rong^{1,2}, XIAO Sha-li¹, QIAN Jia-yu¹, DONG Jia-qin²,
XIONG Jun², FU Si-zu², CHEN Wei-min¹

(1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

2. *State Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China)*

Abstract: This paper describes the elliptical crystal spectrograph(ECS) which is used to investigate X-ray spectroscopy of laser-produced plasmas. The spectrometer was calibrated for experiments on "Shengguang II" X laser target chamber. The K-shell and M-shell emission lines of laser-produced plasma were measured by the space-resolved spectrometer. Some X-ray spectral lines were obtained through studying and classifying photographs of spectra recorded by X-ray CCD camera. The measured spectral resolution of spectrograph was given. The focusing spectrometer based on the ECS provides high spectral resolution and spatial resolution as well as high luminosity(high collection efficiency). Possible applications of the ECS are demonstrated.

Key words: X-ray spectroscopy; Elliptical analysis crystal; Laser-produced plasma; Spectral resolution