

文章编号: 0253-2239(2008)06-1220-05

高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用

王瑞荣^{1,2} 陈伟民¹ 董佳钦² 熊俊² 傅思祖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 对椭圆型聚焦晶体谱仪配 X 射线 CCD 相机的 X 射线谱测量系统进行了优化设计。优化设计后的椭圆型聚焦晶体谱仪系统的工作距离 981.56 mm 和摄谱范围 0.133~0.756 nm, 并具有很好的谱分辨本领($\lambda/\Delta\lambda \geq 1000$)和信噪比。新设计的椭圆型聚焦晶体谱仪首次在“神光 II”X 光激光靶室上成功地获得了激光等离子体谱线信息并辨认和归类了一些离子的谱线, 同时还给出了实验测定的谱仪能量分辨率。其中一些离子谱线诸如类离子共振线、伴线、互组合线和 Ly- α 线谱可为下一步诊断激光等离子体的电子温度和离子密度的空间分布轮廓打下了坚实基础。

关键词 X 射线光学; 椭圆型晶体; 诊断技术; 谱分辨本领; 激光等离子体

中图分类号 O434.1 文献标识码 A

High-Resolution X-Ray Crystal Spectrometer and Its Application in Laser Plasmas

Wang Ruirong^{1,2} Chen Weimin¹ Dong Jiaqin² Xiong Jun² Fu Sizu²

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

² State Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract The elliptical bent crystal spectrometer (EBCS) is coupled to X-ray CCD, and a set of system called focusing spectrometer has been developed. Optimization calculation indicates that the EBCS will allow a large measuring spectral range (0.133~0.756 nm) with crystals of practical dimensions and for a working distance of 981.56 mm to the source and have a spectral resolving power ($\lambda/\Delta\lambda$) better than 1000 as well as high signal-noise-ratio. X-ray spectrum from the laser-produced plasma has first been measured by the EBCS in the “ShenGuang II” Facility. Some ion-like spectral lines were identified and classified. The measured energy resolution of spectrograph was also given. Such emission of resonance line, satellite line inter-combination line of like ions, and Lyman alpha line is useful for establishing the spatial distribution of electron temperature and ions density maps.

Key words X-ray optics; elliptical crystal; diagnostic technology; spectral resolving power; laser plasma

1 引言

对于激光等离子体^[1~4]谱线的测量, 大多数还是采用平面晶体谱仪^[5]。在利用 X 射线谱进行激光等离子体的参量诊断中, 由于灵敏度低和发光源尺寸引起的谱加宽等影响, 使一些对诊断十分重要的伴线、互组合线、共振线及其谱线形状不易分辨,

给等离子体的参量诊断工作带来了很大的困难, 影响了对其中物理过程的深入了解和研究, 还使得平面接收的探测器诸如电荷耦合器件 (CCD)、微通道板、条纹相机等无法与平晶谱仪很好地耦合。随着我国“神光”装置不断地升级和激光技术上的重大突破, 激光能量、功率密度开始变得越来越强, 激光等

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2007-12-18

基金项目: 国家 863 计划(2006AA804312)资助课题。

作者简介: 王瑞荣(1964—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事 X 射线的诊断及谱线等方面的研究。

E-mail: wangrr59@citiz.net

导师简介: 陈伟民(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

离子体发射的 X 射线谱变得复杂,平晶谱仪的应用更受到限制。解决方法是利用弯曲晶体谱仪代替平晶谱仪。聚焦晶体谱仪等^[6~9]的应用也佐证了其可行性,比传统的平晶谱仪有好的分辨率外,也提高了收集光子的效率。缺点是在同一发次中,摄谱范围窄。最近,基于椭圆型分光晶体并具有空间分辨的聚焦谱仪首次在“神光 II”X 光激光靶室上开展激光等离子体 X 射线谱测量,获得了清晰的 X 射线信息。由于分光晶体采用了椭圆型构形,大大地增加了 X 射线的接收立体角,减少了衍射后的像散,使得谱仪有好的信噪比和光强度,还具有工作距离长、摄谱范围宽和高分辨率等特点。这种形状的晶体还可以把色散后的 X 射线聚焦,解决了与平面探测器的耦合问题^[5]。此种谱仪可以拍摄激光等离子体介质的 2 维单色像,配以 CCD 相机,可以直接与计算机配接,能用计算机在线处理 X 射线谱,及时得到实验结果,从而可对后续的打靶条件立即做出判断。若配以条纹相机,即可同时对其中一线谱进行时空

演化过程的实验研究。因此,椭圆型聚焦晶体谱仪在激光与物质相互作用、X 射线激光、惯性约束核聚变(ICF)以及原子过程和凝聚态物理研究的诊断中有着重要作用。

2 椭圆型聚焦晶体谱仪

2.1 谱仪基本结构和原理

如图 1 所示,谱仪主要由入射狭缝、椭圆型晶体、出射狭缝、X 射线 CCD 以及相应的真空系统组成。激光等离子体源(位于椭圆第一焦点上)发出的 X 射线通过椭圆型晶体收集后反射成像于椭圆第二焦点处(出射狭缝),透过这个焦点,再色散于 CCD 阴极面上,实现谱分辨。在垂直谱分辨方向,等离子体源辐射的 X 射线经入射狭缝、衍射晶体和出射狭缝后成像于 CCD 阴极面上。这样的 X 射线谱仪系统,在 CCD 阴极面上可以获得 X 射线的谱分辨,同时也实现了空间分辨。

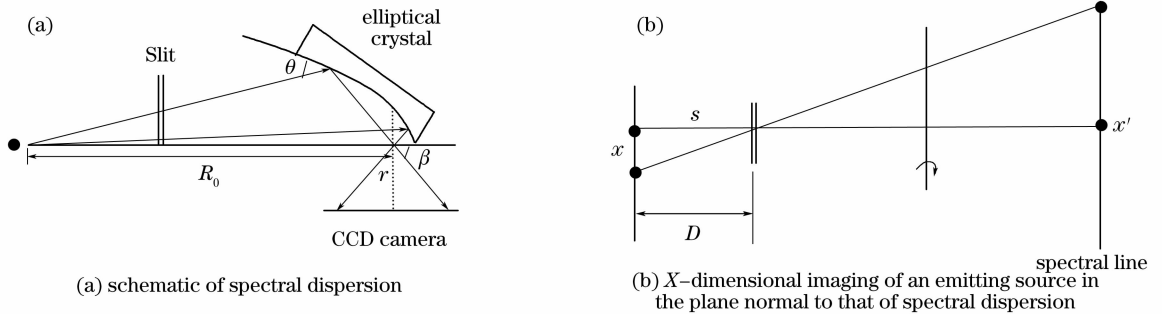


图 1 椭圆型晶体谱仪原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of an elliptical crystal spectrograph

图 1 中的各个参量需满足(1)式~(4)式的关系。

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

$$L = \sqrt{R_0^2 + h^2} + h = \rho' + \rho = \text{定值}, \quad (2)$$

$$M = \frac{x'}{x} = \frac{L + l - s}{s} \approx \frac{L + r - D}{D}, \quad (3)$$

$$\beta = \theta + \arccos(\cos\theta/e), \quad (4)$$

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

其中(1)式 X 射线通过晶体时必须满足布拉格衍射条件,(2)式是椭圆方程的定长关系,(3)式是小孔成像放大关系,(4)式为衍射角 θ 与谱线探测角 β 的关系。

将(4)式代入(1)式,并取 $k=1$,化简后可得

$$\frac{\lambda}{2d} = \frac{1 - e\cos\beta}{\sqrt{1 - 2e\cos\beta + e^2}}, \quad (5)$$

式中 λ 为入射光波长; θ 为布拉格角; d 为晶面间距; k

为晶体衍射级次; R_0 为椭圆两焦点间的长度; r 是椭圆第二焦点到 CCD 面的垂直距离; L 为椭圆定长; M 为放大倍数; D 为发光源到狭缝间的距离; h 为椭圆形状参量; β 是谱线探测角; e 是椭圆的离心率。

2.2 谱仪系统的优化设计

为了得到足够高的谱分辨率,必须使工作状态的晶格分布接近理想情况的椭圆轮廓,才能实现光线的自聚焦,除了要求晶体粘贴平整外,谱仪制作的关键过程,椭圆型晶体基底的参量设计及探测器(CCD)的位置选择也显得非常重要。

由(1)式,晶体能够衍射的长波极限等于 2 倍晶面间距 d 值。被分析的波长越长,则要求晶体的晶格常数就越大。但实际上 θ 角不可能取 90° ,因为当 θ 较大时,衍射峰宽度增大,峰值强度减弱,所以晶体的最大 θ 角最好不大于 70° ;另一方面晶体的 θ 值

也不能太小,否则本底信号较大且分辨率也低了。因此,探测谱线角的最好工作范围 $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$ 。

椭圆型聚焦晶体谱仪测试精度中人们最为关心的波长(或能量)分辨率,影响该系统波长分辨率的因素主要包括:椭圆柱面不理想、射线源不在椭圆焦点上、射线源几何尺寸不能忽略、晶体的漫反射和荧光辐射的杂散光、晶体固有衍射分布的因素(即晶格缺陷的影响)和探测器位置分辨的因素等。探测器位置的因素所形成的分辨本领

$$\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right)_D = \frac{er \tan^3 \theta}{\Delta x \sin^2 \theta} \frac{1}{e - \cos[\theta + \arccos(\cos \theta / e)]},$$

Δx 是探测器最小位置分辨像元的几何宽度。可改变晶体的几何参量可以改变谱仪分辨率。然而晶体的固有属性是不可改变的,晶体谱仪的极限波长分辨率将主要由谱仪的聚焦能力来决定。

椭圆型聚焦晶体谱仪系统的线传递函数^[7]

$$T_l = F(E)R(E)(d\chi/d\theta), \quad (6)$$

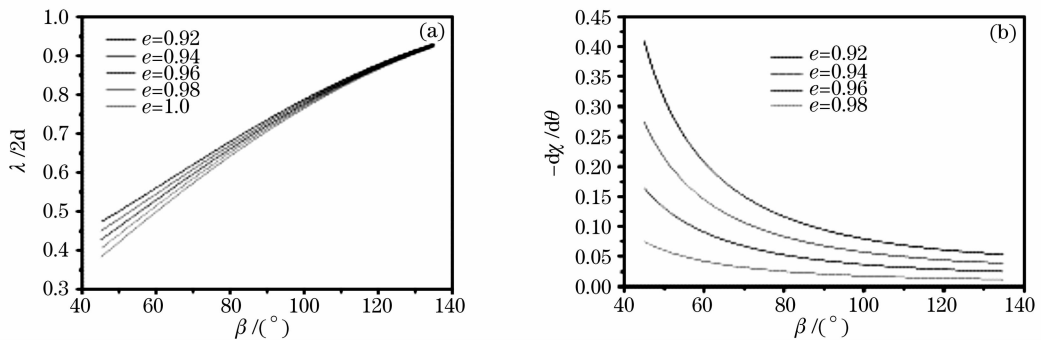


图 2 椭圆型聚焦晶体谱仪的特性。(a) 波长与 β 关系, (b) 椭圆型晶体聚光度 $d\chi/d\theta$ 与 β 关系

Fig. 2 Dispersion character for an elliptical crystal spectrometer. (a) Wavelength dispersion, (b) photometric parameter $d\chi/d\theta$ for elliptical crystal

图 3(a) 是季戊四醇(PET)晶体的积分反射率(R),对低能 X 射线段有较好的衍射效率。图 3(b)

其中 $\frac{d\chi}{d\theta} = \frac{e^2 - 1}{e(e - \cos \beta)}$ 为椭圆型晶体聚光度, E 是光子能量; $F(E)$ 是滤光材料透射率; $R(E)$ 是椭圆型晶体的积分反射率。

数值模拟了谱仪的聚焦能力的典型参量椭圆离心率(e),图 2 所示。在一定的情况下, e 增大,谱分辨率增大,椭圆型晶体聚光度($d\chi/d\theta$)减小; e 大晶体的弯曲程度大,晶体加工难度也随之加大;还有真空靶室及探测器尺寸,以及不同晶体的特性、价格和加工制造工艺,对谱仪参量的选择均有一定影响;晶体的弯曲程度和长度的选择对谱仪的一些特性也起着举足轻重的作用。由此可见,谱仪的设计必须考虑到上述诸多因素,方能在实验中获得清晰可靠满足实验要求干净的光谱线。优化设计好的椭圆型聚焦晶体谱仪的几何参量 $R_0 = 970 \text{ mm}$, $h = 55 \text{ mm}$, $e = 0.945$, $r = 55 \text{ mm}$ 和布拉格角范围: $28^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 。

是不同厚度铝膜的透射率,改变膜材料厚度能实现截断低能 X 射线的目的。图 3(c) 是优化后的椭圆

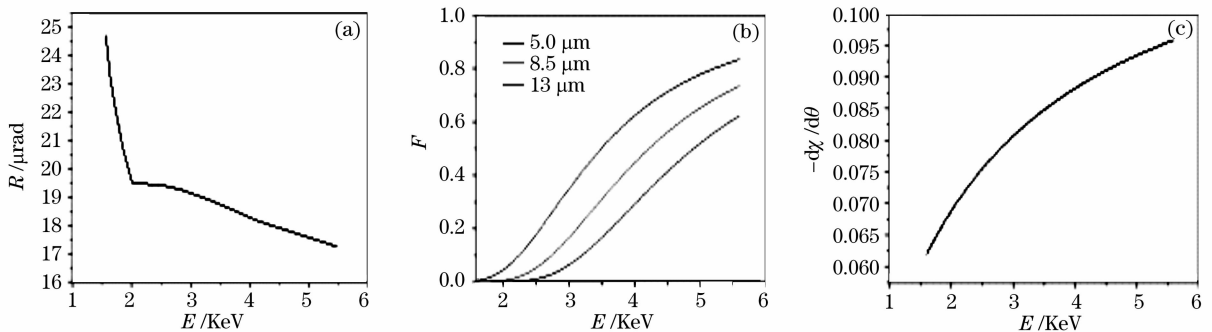


图 3 椭圆型晶体谱仪线形传递函数中的传递因子。(a) PET 晶体积分反射率, (b) 不同厚度铝的透射率, (c) 优化后椭圆型聚焦晶体线聚光度

Fig. 3 Transmission factors in profile transmission function for an elliptical crystal spectrometer. (a) Integrated reflectivity for PET, (b) filter transmissivity of aluminum with different thickness, (c) photometric parameter $d\chi/d\theta$ for elliptical crystal after optimization

型聚焦晶体线聚光度($d\chi/d\theta$)随光子能量的关系,光子能量越高,椭圆型聚焦晶体的聚光效果越好,但极易引发杂散的高能 X 射线光,这对诊断来说十分不利。

3 晶体谱仪在激光等离子体中的应用

3.1 实验条件

倍频($\lambda=0.532\ \mu\text{m}$)激光能量 15~1200 J 不等,脉宽大约 2.1 ns,聚焦阵列透镜可实现焦斑直径 $\phi=230\ \mu\text{m}$ 或 $\phi=1\ \text{mm}$ 。分光晶体为 LiF(220)和 PET(002),靶为铝、铁、钛和金等多种金属材料,采用金属膜(如铝、铁和钛等)来实现衍射谱线选通,并聚焦成像于 1024 pixel \times 1024 pixel、24 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 尺寸的面阵软 X 射线 CCD 相机上。谱仪的轴线与入射激光轴线(靶面法线)成 45°角。

3.2 谱仪调节

激光等离子体源偏离设计位置是会影响系统的分辨、光通量和像差。因此,实验前必须把衍射晶体与等离子体源和 CCD 相机的位置耦合好,才能实现谱仪对谱线精细结构的识别。第一步,利用椭圆方程的定长、衍射晶体特征点到焦点的距离及靶场的基准视物镜,实现确定晶体上的特征点在空间位置;第二步,靶点创建发散强点光源,由于可见光和 X 射线衍射两者间存在一些相似,用可见的点光源模拟 X 光光源发光;第三步,在第二焦点处观察模拟光源的线像,当晶体调整好时,在椭圆的第二焦点处可见精细又清晰的线像。

3.3 实验结果

用椭圆型聚焦晶体谱仪测得了多发 X 射线能谱原始记录。图 4 所示是对原始记录沿空间分辨方向积分并取平均后得到的椭圆型聚焦晶体谱仪测得的铝激光等离子体 X 射线能谱的原始谱曲线,相应的驱动条件倍频能量(18.6 J),焦斑直径($\phi=230\ \mu\text{m}$),

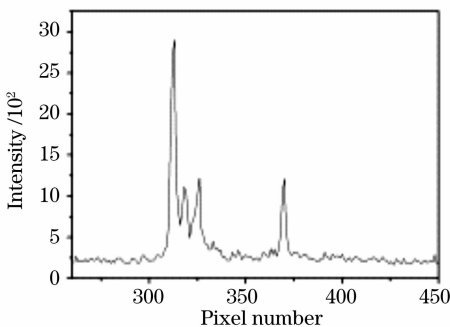


图 4 X 射线 CCD 原始记录

Fig. 4 Original record of X-ray with CCD camera

铝膜(8.5 μm)。为了进一步得到真实的 X 射线能谱,还需要对原始谱曲线解谱处理。

根据探测器的几何位置和最小位置分辨像元尺寸及(5)式,可把激光等离子体 X 射线能谱的原始谱曲线中的像数数转化成 X 射线波长(λ_i)与 CCD 阴极面上的位置(x_i)关系:

$$\frac{\lambda_i}{2d} = \frac{1 - e \frac{x_i}{\sqrt{r^2 + (x_i - x_0)^2}}}{\sqrt{1 + e^2 - 2e \frac{x_i}{\sqrt{r^2 + (x_i - x_0)^2}}}}, \quad (7)$$

式中 x_0 是位置起始值(任意选定)。

在测谱方向单位立体角单位时间激光等离子体源发射的谱线强度 i_0 ,参照(6)式,可以推出

$$i_0 = \frac{NL'}{F(E)R(E)\eta(E)W(d\chi/d\theta)}, \quad (8)$$

式中 W 为谱线长度; N 是 W 内光子总量; $L' \approx L + r$ 是发光源到线谱的光程; η 为 X 射线 CCD 的量子效率。

实验中谱仪和光源的几何位置很难保证精确,跃迁波长还不能绝对定标。实验光谱的辨认是采用已知的参考谱线和(5)式对原始谱曲线进行辨认和标识,再与(8)式结合得到铝等离子体源发出的真实 X 射线能谱分布(图 5)。采用光谱中最窄的能谱线半宽度来估算,图 5 中同时给出了椭圆型聚焦晶体谱仪的实验能量分辨本领近似为 1100。

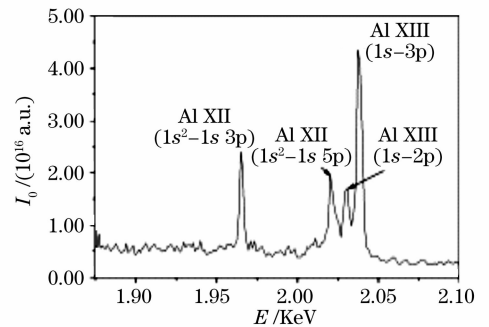


图 5 激光等离子体源发射的能谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of a laser-produced plasma source

4 结 论

通过对椭圆型聚焦晶体谱仪的设计内容进行理论计算与分析,获得了充分的数据资料,优化设计了谱仪参量。利用引进的 X 射线 CCD 配上椭圆型聚焦晶体,建立了椭圆型聚焦晶体谱仪诊断技术,测量了 0.532 μm 激光辐照多种金属(金、钛、铁和铝等)固体靶产生的 X 射线能谱,可实现很好的信噪比和

能量分辨能力($E/\Delta E \approx 1100$);与以往平晶谱仪实验数据相比,激光等离子体 X 射线谱强度提高了 3~6 倍不等。辨认和归类了激光等离子体中的离子谱线,可为下一步诊断激光等离子体的电子温度和离子密度的空间分布轮廓打下坚实基础。

由于椭圆型晶体衍射效率还是相对标定结果,本文未能给出绝对强度的 X 射线能谱测量结果,进一步的工作将是开展椭圆型晶体衍射效率和 X 射线 CCD 响应的绝对标定,以使用该椭圆型聚焦晶体谱仪测量得到绝对强度的 X 射线能谱。

参 考 文 献

- 1 D. L. Robbins, A. Ya Faenov *et al.*. Measurement of the polarization of the K-shell resonance line emission of S^{13+} and S^{14+} at relativistic electron beam energies[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**: 022715-1~022715-8
- 2 F. Girard, J. P. Jadaud, M. NaudyKyrala *et al.*. Multi-keV X-ray conversion efficiencies of laser-pre-exploded titanium foils[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, **12**: 092705-1~092705-3
- 3 Zhu Tuo, Zhang Jiyan, Zhang Baohan *et al.*. Study of X-ray emission from plasma generated by laser irradiated krypton puff target[J]. *Atom Molec. Phys.*, 2007, **24**(3): 513~517
朱 托,张继彦,张保汉等. 氩激光等离子体 X 射线谱研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2007, **24**(3): 513~517
- 4 Yang Boqian, Zhang Jiyan, Han Shensheng *et al.*. Space-resolved diagnosis for the electron density of laser-produced aluminum plasma[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 703~706
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
- 5 Wang Ruirong, Wang Wei, Wang Chen *et al.*. Spectral characterization of double-driven X-ray laser plasmas[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 556~560
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**(3): 556~560
- 6 D. L. Robbins, H. Chen, A. Ya Faenov *et al.*. High-resolution compact Johann crystal spectrometer with the Livermore electron beam ion trap[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3717~3719
- 7 Wang Yan, Yang Guohong, Yang Jiamin *et al.*. Transmission crystal spectrometer and related theoretical calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1507~1511
汪 艳,杨国洪,杨家敏等. 透射晶体谱仪及其理论计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1507~1511
- 8 Wen Shenglin, Su Jinrong, Yang Chunlin *et al.*. Long-focal-depth lens for laser plasma diagnostic system [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1260~1262
温圣林,粟敬钦,杨春林等. 用于激光等离子体诊断系统的长焦透镜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1260~1262
- 9 Yang Yannan, Zhu Jinrong, Yang Bo *et al.*. Method of impulse measurement for laser-ablated target[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 418~421
杨雁南,朱金荣,杨 波等. 用于测量激光烧蚀下靶材获得冲量的方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 418~421
- 10 B. L. Henke, H. T. Yamada, T. J. Tanaka. Pulsed plasma source spectrometry in the 80~8000 eV X-ray region[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**(10): 1311~1315