

# 激光等离子体 X 射线极化光谱诊断

王洪建<sup>1,2</sup> 肖沙里<sup>1</sup> 施 军<sup>1</sup> 唐昶环<sup>3</sup> 刘慎业<sup>3</sup> 钱家渝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030  
<sup>2</sup>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  
<sup>3</sup>中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 针对波长为 0.5~0.8 nm 的激光等离子体 X 射线极化度的诊断, 研制了一种新型适用的基于空间分辨的极化谱仪。在极化谱仪内的垂直和水平通道上分别布置正交的季戊四醇(PET)晶体色散元件。信号采用成像板进行接收, 有效接收面积为 30 mm×80 mm, 从等离子体光源经晶体到成像板的光程长为 240 mm。通过实验成像板获得了铝激光等离子体 X 射线的光谱空间分辨信号, 分析了获得的类氦谱线和类锂伴线并计算其极化度, 并分析了负极化的原因。实验结果表明该谱仪获得的 X 射线极化度测量值与理论值相符, 适合激光等离子体 X 射线极化光谱的诊断。

**关键词** 激光等离子体; 极化谱仪; 光谱测量; X 射线诊断; 电子速度分布函数

中图分类号 TH744.15 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092906.1710

## X-ray Polarization Spectrum Diagnosis of Laser-Produced Plasmas

Wang Hongjian<sup>1,2</sup> Xiao Shali<sup>1</sup> Shi Jun<sup>1</sup> Tang Changhuan<sup>3</sup>

Liu Shenye<sup>3</sup> Qian Jiayu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

<sup>2</sup>Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

<sup>3</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** According to the diagnosis of X-ray polarization spectrum in laser-produced plasmas with wavelength of 0.5~0.8 nm, a new practical polarized spectrometer is designed and manufactured based on spatial resolution. Two pentaerythritol (PET) flat crystals are taken as dispersive elements, one is set in the parallel channel and another is installed in the perpendicular channel. The imaging plate with effective area of 30 mm×80 mm, is employed to receive the signal, and the optical path is about 240 mm from the source to the detector via the crystals. The X-ray spectrum emitted from the aluminum plasmas was recorded with imaging plates. The helium-like spectral line and lithium-like satellite line and their polarizations were calculated. The reason causing negative polarization is analyzed. These experimental results show that the measured value of the X-ray polarization spectrum matches the theoretical value well, and the polarization spectrometer is good for X-ray diagnosis of polarization spectrum in laser-produced plasma.

**Key words** laser-produced plasma; polarization spectrometer; spectral measurement; X-ray diagnosis; electron velocity distribution function

收稿日期: 2008-09-24; 收到修改稿日期: 2008-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(10576041)资助课题。

作者简介: 王洪建(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等方面的研究。

E-mail: whj\_cqu@163.com

导师简介: 肖沙里(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

## 1 引言

极化光谱仪是直接测量电子速度分布函数(EDF)的有用诊断仪器<sup>[1]</sup>,在超强激光等离子体中,定向电子的激发产生极化辐射,因此,在高温等离子体中电子束的存在可通过分析辐射极化度确定。在快电子点火等离子体研究中,高荷离子 X 射线极化谱仪尤其重要。由于电子 EDF 的各向异性产生极化 X 射线,因此在低密等离子体诊断中,极化光谱仪因弹性电子碰撞破坏的影响小而非常有用<sup>[2]</sup>,而在高密等离子体中极化消失。X 射线的极化度提供了电子能量分布的非麦克斯韦信息,如它在通过电子回旋波辅助加热的等离子体。通过光谱测量不仅可确定中心离子温度、电子温度、电子密度<sup>[3]</sup>、中心超环行的回转、高荷态分布,还可与其他诊断方法结合起来研究杂质传输。因此,通过直接测量 EDF 确定能量沉积处理就显得非常重要。

极化现象已在 tokamak<sup>[4]</sup>,真空放电<sup>[5]</sup>和激光等离子体<sup>[6]</sup>中观察到。在激光等离子体 EDF 的研究中,辐射谱线的极化研究是关注的重点,通过不同方法研究已得到了验证。高能激光等离子体是碰撞极化和自离过程占主导的高温等离子体。电子的各向异性碰撞常常伴随极化辐射现象,如在电子束离子阱(EBIT),高荷离子被单电子束激发,成功得到类氦  $\text{Fe}^{24+}$  和类锂  $\text{Fe}^{23+}$  K 壳辐射线,并分析了极化度。这些测试已验证基于相对论失真波计算的预测,P. Beiersdorfer<sup>[7]</sup>和 M. K. Inal<sup>[8]</sup>等已报道过。

实验在中国工程物理研究院激光聚变研究中心 20 J 激光装置上进行,将一路三倍频激光聚焦在铝平面靶上,利用成像板(Imaging plate)获取了铝激光等离子体 X 射线的光谱,分析并计算了类氦谱线和类锂伴线的极化度,与理论值相符。

## 2 测量原理

当等离子体具有电磁场的各向异性<sup>[9]</sup>,发出了符合磁量子数的极化 X 射线。依据在电子束离子阱(EBIT)中的极化谱仪,设计本实验的极化谱仪几何关系图如 1 所示。

$E_\pi, E_\sigma$  分别代表极化 X 射线的电场, $\pi$  光强度  $I_\pi$ (正比于  $E_\pi^2$ )是 X 射线平行于电子运动方向的分量,它起源于原子转换试验  $1s2p^1P_1 \rightarrow 1s2^1S_0 + h\nu, \Delta M = 0$ 。 $\sigma$  光强度  $I_\sigma$ (正比于  $E_\sigma^2$ )是垂直于电子运动的分量<sup>[10]</sup>, $\Delta M = \pm 1$ 。极化度  $P$  定义为<sup>[1]</sup>

$$P = \frac{I_\pi - I_\sigma}{I_\pi + I_\sigma} \quad (1)$$

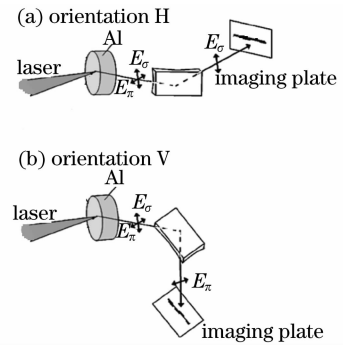


图 1 线性极化 X 射线实验方案(a)垂直方向测量  $\sigma$  光分量(b)水平方向测量  $\pi$  光分量

Fig. 1 Experimental analysis of a linear polarization for X-ray line profiles. (a) Experimental setup for measurements of  $\sigma$  component; (b) experimental setup for measurements of  $\pi$  component

因为量化轴平行于电子运动方向,在快电子中,  $I_\pi$  和  $I_\sigma$  相似,在这个值范围内,假设大量电子温度足够低而不能在 K 壳层原子跃迁起主要作用,所观测到的通过 EDF 结合计算的  $I_\pi$  和  $I_\sigma$  值大约相等。因此,在电子各向同性的 EDF 分布中,极化消失。

与目标表面相互正交的散射面定义为“H”,即与目标表面垂直,测量 X 射线的  $\sigma$  分量;与它垂直的方向为“V”,即与表面平行,测量 X 射线  $\pi$  分量。假定 EDF 为圆柱型,轴线与目标表面垂直。 $I_\pi$  和  $I_\sigma$  可以用 V 和 H 方向的成像板测量表示

$$I_\pi = \frac{I_V - I_H \cos 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta}, I_\sigma = \frac{I_H - I_V \cos 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta} \quad (2)$$

其中  $I_V$  和  $I_H$  为 V 和 H 方向的测量强度值, $\theta$  为 X 射线满足衍射条件的布拉格角。

## 3 实验

### 3.1 实验结果

实验装置由两束激光器组成,单束激光最大能量为 10 J,能够单独使用。通过法兰口<sup>[11]</sup>,三倍频激光束聚焦于真空靶室内的固体平面靶表面,产生高温、高密、高压的激光等离子体,形成高剥离态热等离子体光源。靶的纯度为 99.99%,焦斑直径为 200  $\mu\text{m}$ ,激光脉宽为 800 ps<sup>[12]</sup>。

在水平和垂直方向同时安装正交的季戊四醇(PET)平面晶体作为光谱散射材料,其化学名为  $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ ,具有良好的化学稳定性,其晶格  $2d = 0.876 \text{ nm}$ 。当靶材料为 Al 时,类氦 X 射线波长约为  $\lambda = 0.776 \text{ nm}$ 。由光谱发生衍射的 Bragg 条件  $\lambda = 2d \sin \theta$  计算出 Bragg 角  $\theta = 62^\circ$ 。双通道晶体分光计安装距离相同,相互正交,Bragg 角相同,实物原

型如图 2 所示。等离子体源经平面晶体到成像板的光程长为 240 mm。记录光谱信号采用成像板进行接收,其有效面积为 30 mm×80 mm。实验激光的驱动能量为 3.76 J,得到铝等离子体 X 射线的光谱。根据三点外推法原理,利用 WinView32 和 Matlab 等软件对其解谱,谱线如图 3 所示。

### 3.2 实验数据分析

从图 3(a)和 3(b)分别表示  $H$  和  $V$  分量的光谱强度,水平方向测量值大于垂直方向测量值,即  $I_H > I_V$ 。考虑到测量不确定度影响,根据(1)式和(2)式,计算出类氦谱线的极化度,其中电偶极(E1)跃迁( $1s^2 - 1s2p^1P_1$ )共振线  $w$  的极化度  $P_w = -0.544^{+0.19}_{-0.15}$ ,磁四极(M2)谱线  $x(1s^2 - 1s2p^3P_2)$  的极化度  $P_x = -0.515^{+0.15}_{-0.29}$ 、互组合线  $y(1s^2 - 1s2p^3P_1)$  的极化度  $P_y = -0.152^{+0.10}_{-0.18}$  和禁戒(M1)谱线  $z(1s^2 - 1s2p^3S_1)$  的极化度  $P_z = -0.064^{+0.17}_{-0.24}$ 。此外也测得类锂伴线  $q[1s^22s - 1s2p(^1P)2s^2_1P_{3/2}]$  的

极化度  $P_q = -0.333^{+0.27}_{-0.17}$ 。 $w, q$  谱线的极化度与 P. Beiersdorfer<sup>[13]</sup> 的类氦  $w$  谱线、M. K. Inal<sup>[14]</sup> 的类锂  $q$  伴线的极化度符号相反,绝对值大小相似。而  $x, y, z$  谱线极化度测量值与理论值误差较小。主要谱线极化度与 M. K. Inal<sup>[14]</sup> 的计算值相比只有 0.04 的误差,计算结果如表 1 所示。

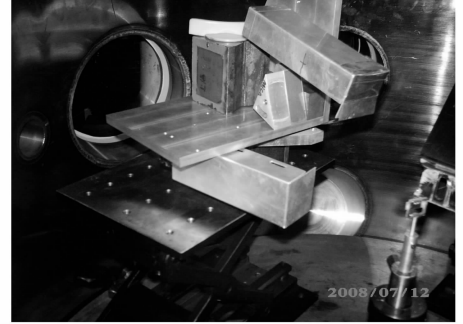


图 2 极化谱仪在激光器靶室内的安装图  
Fig. 2 Photo of polarization spectrometer on 20 J laser facility

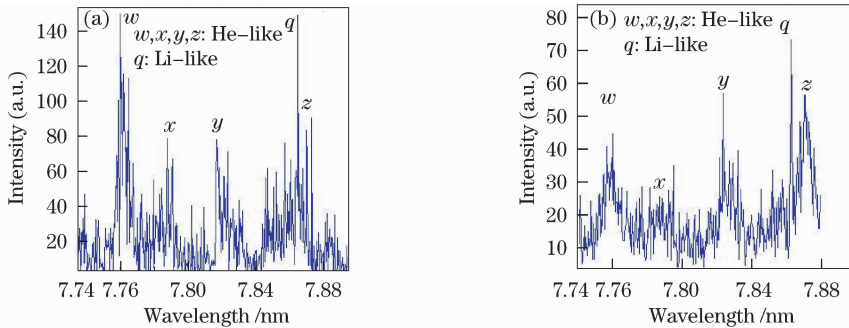


图 3 Al 类氦类锂谱线强度分布图,(a)  $H$  方向,(b)  $V$  方向

Fig. 3 He-like and Li-like spectral line in intensity of Al in  $H$  (a) and  $V$  (b) direction

表 1 0.5~0.8 nm 范围内 Al 离子类氦谱线和类锂伴线的极化度计算测量值与理论值比较

Table 1 Comparison of calculated and measured values of the spectrum polarization in the range of 0.5~0.8 nm

Line polarization	Theory <sup>[8,12]</sup>	Theory <sup>[11]</sup>	Measurement <sup>[11]</sup>	Present measurement
$P_w$	+0.584	+0.599	$+0.56^{+0.17}_{-0.08}$	$-0.544^{+0.19}_{-0.15}$
$P_x$	-0.518	-0.515	$-0.53^{+0.05}_{-0.02}$	$-0.515^{+0.15}_{-0.29}$
$P_y$	-0.196	-0.192	$-0.22^{+0.05}_{-0.02}$	$-0.152^{+0.10}_{-0.18}$
$P_z$	-0.078	-0.074	$-0.076^{+0.007}_{-0.007}$	$-0.064^{+0.17}_{-0.24}$
$P_q$	+0.349	-	-	$-0.333^{+0.27}_{-0.17}$

X 射线的极化度与激发能量密切相关,激发激光能量越低,激发的等离子体晕区密度低,谱线极化度越高。本实验最主要的 X 射线谱线的极化度  $P$  值高到  $-0.544^{+0.19}_{-0.15}$ ,表明激光能量较低,实验中驱动能量小于 4 J。在靶表面激发的光谱辐射,一般为负极化,而靶内层区域激发的辐射所需能量高,易产生正极化,Yuichi 等<sup>[1]</sup>通过涂 0.05  $\mu\text{m}$  的 CH 膜和不涂膜的 Ti 靶实验已验证。电子的大量加热,使电子能量分布的各向异性产生了电磁辐射的极化<sup>[15]</sup>,

正极化表明辐射为 p 极化,负极化为 s 极化<sup>[2,16]</sup>。而本实验激光未击穿 0.2 mm 厚的 Al 靶,靶表面的等离子体产生的主要谱线极化度数据为负值,表明该激光能量较低,辐射属于 s 极化,故出现了  $w, q$  线的极化度与文献<sup>[13]</sup>的理论值绝对值误差小、符号相反的现象。此外,X 辐射中电子-电子碰撞持续时间仅有几皮秒<sup>[17]</sup>,离子-离子碰撞时间为几百皮秒,因此在 EDF 计算电子密度和温度时,可以不用考虑碰撞时间对各向异性的影响<sup>[18]</sup>。

## 4 结 论

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,在快速点火研究中,在高密等离子体中的有效能量传输是一个关键问题。一种新型的时空积分分光计方法的发展可以提供更好的定量分析能量传输,通过少量测量就可达到。X 射线极化光谱学目前在国内还处于起步研究阶段,作为 X 射线极化分析的光谱仪是非常关键的设备。该极化光谱仪在国内率先设计制作并在低能激光源实验,测得 Al 激光等离子体类氦共振线  $\omega$  的极化度为  $-0.544^{+0.19}_{-0.15}$ , 磁四极线  $x$  的极化度为  $-0.515^{+0.15}_{-0.29}$ , 互组合线  $y$  极化度为  $-0.152^{+0.10}_{-0.18}$ , 禁戒线  $z$  极化度为  $-0.064^{+0.17}_{-0.24}$ , 以及类锂伴线  $q$  的极化度为  $-0.333^{+0.27}_{-0.17}$ , 与理论值相符合。实验表明该极化谱仪适合激光等离子体 X 射线极化光谱的诊断。但由于该激光装置能量较低,得到的谱线强度低,以及成像板噪声本底大,干扰了光谱信号,为研究等离子体的温度、密度等参数还需对其晶体材料<sup>[19]</sup>、信号收集等修正,进一步提高信噪比,更好地应用于等离子体 X 射线极化光谱学研究。

## 参 考 文 献

- 1 Yuichi Inubushi, Hiroaki Nishimura, Masayuki Ochiai *et al.*. X-ray polarization spectroscopy for measurement of anisotropy of hot electrons generated with ultraintense laser pulse[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3699~3701
- 2 Hitoki Yoneda, Noboru Hasegawa, Shu-ichi Kawana *et al.*. Large anisotropy of the electron distribution function in the high-density plasma produced by an ultrashort-pulse UV laser[J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **56**(1): 988~991
- 3 A. J. Kemp, Y. Sentoku, V. Sotnikov *et al.*. Collisional relaxation of super thermal electrons generated by relativistic laser pulses in dense plasma[J]. *Rev. Lett.*, 2006, **97**: 235001
- 4 T. Fujimoto, H. Sahara, T. Kawachi *et al.*. Polarization of impurity emission lines from a tokamak plasma[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**: R2240~R2243
- 5 F. Walden, H. J. Kunze, A. Petoyan *et al.*. Polarization measurements of the Al xii resonance line emitted from micropinch plasmas of a vacuum spark discharge[J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**: 3562~3570
- 6 J. C. Kieffer, J. P. Matte, M. Chaker *et al.*. X-ray-line polarization spectroscopy in laser-produced plasmas[J]. *Phys. Rev. E*, 1993, **48**(6): 4648~4658

- 7 P. Beiersdorfer, J. Crespo Lo'pez-Urrutia, V. Decaux *et al.*. Polarization spectroscopy of X-ray transitions from beam-excited highly charged ions[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(1): 1073-1077
- 8 M. K. Inal, J. Dubau. Polarization of Fe xxv 1s2-1s2l lines: Collisional resonances and radiative cascade contributions to 1s2l magnetic-sublevel excitation rates[J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**: 4794~4806
- 9 Bin Tang, Yi Jing, Meiping Jiang *et al.*. Diffraction properties of four-petal Gaussian beams in uniaxially anisotropic crystal[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(10): 779~801
- 10 Tohru Kawamura, Takeshi Kai, Fumihiko Koike *et al.*. Polarization of Hea Radiation due to Anisotropy of Fast-Electron Transport in Ultraintense-Laser-Produced Plasmas [J]. *Rev. Lett.*, 2007, **99**: 115003-1~115003.4
- 11 Wang Guangchang, Zheng Zhijian. Transition Radiation from the Surface in Femtosecond Laser Interaction with Solid Targets [J]. *Chin. J. Laser*, 2008, **35**(4): 524~528  
王光昶, 郑志坚. 飞秒激光与固体靶相互作用中背表面的渡越辐射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 524~528
- 12 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. X-ray polarization spectroscopy in laser-produced plasmas[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(5): 822~826  
王洪建, 肖沙里, 施 军等. 激光等离子体 X 射线极化光谱研究 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(5): 822~826
- 13 P. Beiersdorfer, D. A. Vogel, K. J. Reed *et al.*. Measurement and interpretation of the polarization of the X-ray line emission of heliumlike Fe xxv excited by an electron beam[J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **53**: 3974~3981
- 14 M. K. Inal, J. Dubau. Theory of excitation of He-like and Li-like atomic sublevels by directive electrons: application to X-ray line polarization[J]. *J. Phys. B*, 1987, **20**: 4221~4239
- 15 J. Weinheimer, I. Ahmad, O. Herzog *et al.*. High-resolution X-ray crystal spectrometer/polarimeter at torus experiment for technology oriented research-94[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(6): 2566~2574
- 16 Takashi Imazono, Masahiko Ishino, Masato Koike *et al.*. Performance of a reflection-type polarizer by use of muscovite mica crystal in the soft X-ray region of 1 keV[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**: 023104.1~4
- 17 Liu Guodong, Wang Guibing, Fu Bo *et al.*. Ultrafast pump-probe reflectivity study of carrier dynamics in silicon surface [J]. *Chin. J. Laser*, 2008, **35**(9): 1365~1369  
刘国栋, 王贵兵, 付 博等. 单晶硅表面载流子动力学的超快抽运探测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1365~1369
- 18 Jaehoon Kim, Dong-Eon Kim. Measurement of the degree of polarization of the spectra from laser produced recombining Al plasmas[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**: 017401~017405
- 19 Wang Ruirong, Chen Weiming, Dong Jiaqing *et al.*. High-resolution X-ray crystal spectrometer and its application in laser plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1220~1224  
王瑞荣, 陈伟民, 董佳钦等. 高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1220~1224