

“点投影”keV 波段 X 射线吸收谱的 实验技术研究

管富义 王柳水 王笑琴 林康春 林尊琪

(中国科学院上海光机所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

提要 报道了一项高密度激光等离子体 keV 波段 X 射线吸收谱工作。实验上采用称为“点投影 (Point Projection)”的靶场光学方案, 成功地获得了高空间分辨 ($< 24 \mu\text{m}$) 的类氦铝 $1s^2-1s2p$ 及类氦锆 $2p-3d$ 共振吸收谱信号, 为 X 激光及激光核聚变研究提供了一种新的参量诊断方案。

关键词 激光靶场, 吸收光谱, X 射线, 等离子体

随着高功率激光器的发展, 激光核聚变及 X 激光的研究已成为当前科学的重要前沿课题^[1], 同时, 对靶场技术和光路的调试提出了更高的要求, 以满足实验的需要。近来我们采用了称为“点投影”的靶场光学方案, 使用两路激光平行错开对打靶的新颖实验手段, 来研究复合机制和碰撞激发机制 X 激光增益介质中的特种离子基态数密度的空间演化特性。我们成功地获得了高度空间分辨 ($\sim 24 \mu\text{m}$) 的类氦铝 $1s^2-1s2p$ 及类氦锆 $2p-3d$ 共振吸收谱信号^[2], 其中类氦铝吸收谱实验结果同英国 RAL 与美国 LLNL 的报道^[3]相类似, 而空间分辨的类氦锆 $2p-3d$ 共振吸收谱结果作者在国际上尚未见过报道。

1 实验装置

实验在中国科学院上海光机所高功率激光物理联合实验室的六路装置上进行。实验系统的几何安排如图 1 所示。使用六路激光装置上的第 I 和第 II 路两路激光, 第 I 路激光 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $E = 6 \sim 12 \text{ J}$, 准高斯脉宽 $\tau \approx 250 \text{ ps}$) 经过柱面镜 (或非共轴球面镜) 和 $f/1.5$ ($\phi = 60 \text{ mm}$, $f = 90 \text{ mm}$) 的非球面打靶透镜, 以扩展线聚焦的形式沿平面靶 T_1 ($5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 50 \mu\text{m}$ 的聚乙烯薄膜, 表面镀有 $5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 300 \text{ nm}$ 的铝 (锆), 我们称之为“副靶”, 见图 1) 的法向方向辐照在靶面上, 产生均匀的柱状“冷”等离子体 (Absorbing Plasma)。线聚焦的线宽控制在 $0.6 \text{ mm} \sim 0.7 \text{ mm}$ 之间, 使得激光辐照到副靶时, 除了可以辐照到 0.5 mm 宽的铝 (锆) 膜外, 还可以辐照到铝 (锆) 膜外围的聚乙烯薄膜。辐照聚乙烯薄膜所产生的碳氢等离子体将铝 (锆) 等离子体挤压在中间, 使铝 (锆) 等离子体不至于迅速膨胀扩散, 有利于吸收谱实验的精确测量。第 II 路激光 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $E = 6 \sim 12 \text{ J}$, 准高斯脉宽 $\tau \approx 250 \text{ ps}$) 的方向与第 I 路激光的方向相反, 经过 $f/1.5$ 的非球面打靶透镜以点聚焦的形式辐照在纤维靶 T_2 的尖端 (纤维靶靶材采用 W, 外径 $\phi \sim 20 \mu\text{m}$, 尖端部位镀有 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的铝 (锆), 我们称之为“主靶”), 产生一个

“热”的准点等离子体源(Backlighter),主靶 T_2 位于副靶 T_1 所在的平面之内。主靶发射的 X 射线从副靶的前后两侧通过,再经过限束光阑、Bragg 衍射晶体、阶梯滤光片,最后到达 X 光照相底片被探测记录下来。两等离子体之间相距 4 mm,主靶和 X 光底片之间相距:4 mm+71 mm+45 mm=120 mm,几何放大倍率为 30。副靶的前侧有冷的柱状等离子体,会吸收一部分从主靶发出的 X 射线;副靶的背侧没有等离子体,主靶发射的 X 射线可以全部通过;中间部分是 50 μm 厚的薄膜壁,X 射线完全不能通过。

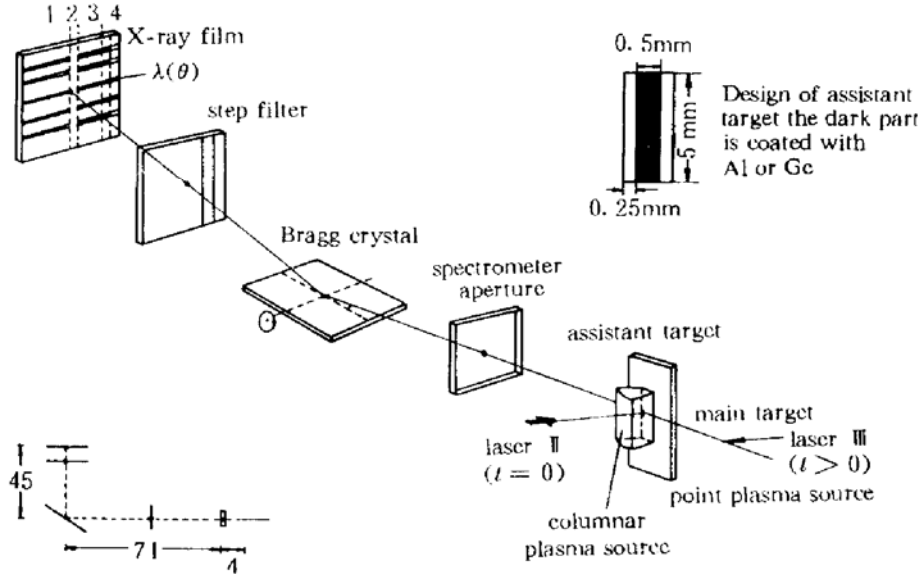


Fig. 1 Experimental arrangement

实验选用 PET(TlAP)晶体(晶格常数: TlAP : $2d = 2.578 \text{ nm}$; PET : $2d = 0.875 \text{ nm}$),晶体面积为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,相当于一 般常用晶体尺寸的三倍,并且可绕中心水平轴转动,以选择测量不同的波长范围。放置 X 光底片的暗盒也可随其两端的弧形滑槽旋转,保证经晶体衍射的 X 射线能被照相底片所接收。阶梯滤光片由相差 400 nm 厚铝膜的两级台阶构成,用于谱线相对强度的现场定标。X 光底片采用国产 Aermei X 光照相底片。最后,从副靶前侧通过的 X 射线(吸收谱信号)被记录在底片区域 1;从副靶背侧通过的 X 射线(发射谱信号)被记录在底片区域 3 和 4,其中区域 4 记录的是被阶梯滤光片的台阶衰减掉了一部分强度的 X 射线;被副靶靶壁挡住的无信号区域对应于底片区域 2。改变第 III 路激光相对于第 II 路激光的延迟时间,可以获得不同时间的吸收谱信号。

图 2 是本实验靶场光路调试时的器件排布图。

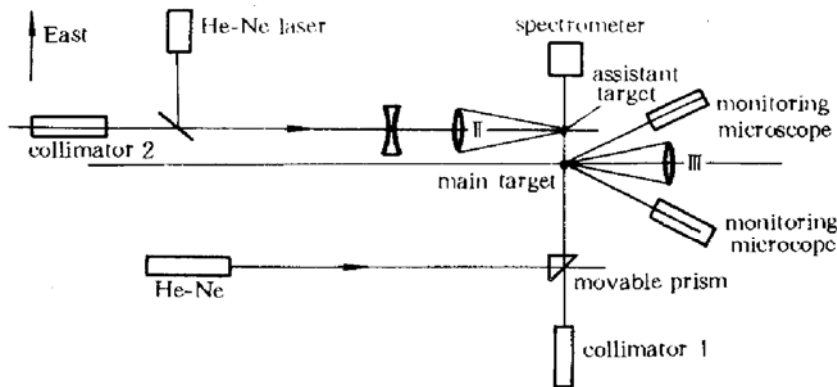


Fig. 2 Optical arrangement in the target room

调整 I 路靶镜的光轴,使它和主靶位置上的 $\phi 500 \mu\text{m}$ 的模拟钢球靶的球心像 ($5 \mu\text{m}$) 同轴,同时用两个正交的监视显微镜对钢球定位。主靶的东侧装上一副靶架 (x, y, z 三维可调),用三维调靶机构使副靶上的钢球定位于监视显微镜的中心。在 I 路窗口用平行光管将 I 路非球面靶镜上沿导轨向东平移 4 mm ,使钢球靶在步进机的控制下也向东平移 4 mm ,使之同轴后装上柱面镜。使模拟钢球靶的球心像和表面像同轴,加上正交显微镜的定位,使定位精度和重复性得到了保证。

2 实验结果

经过精心地调整靶场光路系统,主靶 ($\phi 20 \mu\text{m}$ 的 W 丝) 经激光辐照后被准确地对中劈成两半(见图 3)。副靶的调节精度控制在 $10 \pm 5 \mu\text{m}$ 之内。

图 4 是靶面功率密度 $P = 2.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 激光脉冲后 500 ps 时的类氦铝 X 射线吸收谱实验照片及 He_α 线谱的黑度轮廓。比较 He_α 原始谱与 He_α 吸收谱, He_α 吸收谱有明显的劈裂现象,说明吸收效应很显著。而 He_β 线谱的吸收不太显著,这是因为后者的振子强度比前者的小,光学厚度偏薄。用针孔成像原理可以精确标定被测位置。随着距离靶面位置的增加,吸收现象也愈来愈不明显,直至吸收现象微弱得观察不到。这些体现了类氦铝离子密度的空间分布特性。



Fig. 3 The main target ($\phi 20 \mu\text{m}$ W wire) is cut into two pieces as the laser pulse irradiates at its tip

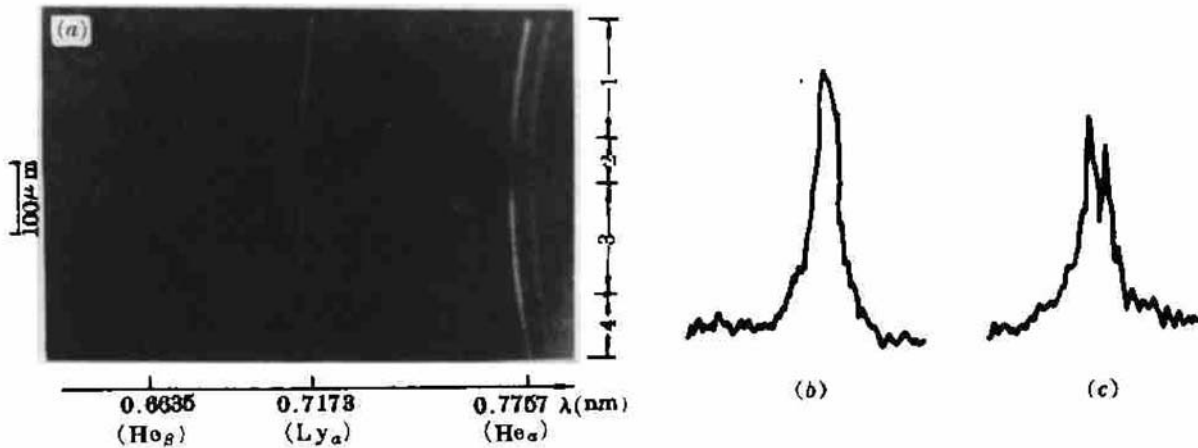


Fig. 4

(a) absorption spectra at $t = 500 \text{ ps}$ and $P \approx 2.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$. Region 1, absorption spectrum; Region 2, shadow of assistant target; Region 3, source spectrum; Region 4, source spectrum passing through the step filters. (b) density trace of the source He_α line. (c) density trace of the absorption He_α line at the distance $Z = 50 \mu\text{m}$ from the assistant target surface

图 5 是靶面功率密度 $\sim 3.2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 激光脉冲后 200 ps 时的类氦 Ge $2p-3d$ 共振吸收谱照片,同时描出了类氦 Ge $2p-3d(2s^2 2p^6 - [2p^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{5/2})], \lambda = 0.911 \text{ nm})$ 共振吸收谱的黑度轮廓。在靠近副靶靶面的位置存在较明显的吸收现象。类似于类氦铝吸收谱,当距离靶面位置的增加时,吸收现象愈来愈不明显,直至吸收现象微弱得观察不到。这体现了类氦离子密度的空间分布特性。

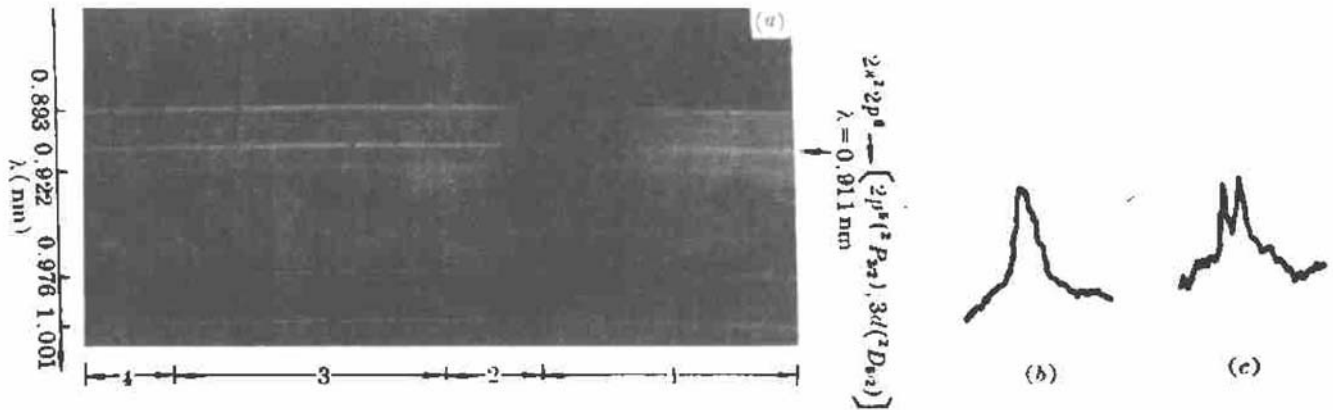


Fig. 5

(a) absorption spectra of neon-like Ge at $t = 200 \text{ ps}$ and $P = 3.2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$. Region 1, absorption spectrum; Region 2, shadow of target T_2 ; Region 3, source spectrum; Region 4, source spectrum passing through the step filters. (b) density trace of the source neon-like Ge $2p-3d$ ($\lambda = 0.911 \text{ nm}$) line. (c) density trace of the neon-like Ge $2p-3d$ ($\lambda = 0.911 \text{ nm}$) absorption spectrum at $20 \mu\text{m}$ from the assistant target surface

从图 4 和图 5 可以看出,在信号不可透过的区域 2,仍然有线谱从区域 3 向区域 2 延伸进去,这是由于主靶等离子体源的背向扩散所引起的。对于 0.757 nm 的类氦铝共振线和 0.911 nm 的类氦锗共振线,边缘延伸深度约 $20 \sim 24 \mu\text{m}$,它决定本实验系统的空间分辨本领。

通过一定程序的数据采集与处理,可以推导出激光等离子体中特种离子的基态数密度的空间演化特征^[4,5]。这是用发射谱方法不能直接探测得到的重要等离子体参量。

参 考 文 献

- 1 E. Storm, J. D. Lindl. 实验室高增益惯性约束聚变的进展与未来的展望. 国外激光, 1989, (4): 1
- 2 Wang Liushui, Lin Zunqi, Sheng Jiatian *et al.*. X-ray absorption spectroscopy in laser produced helium-like Al and neon-like Ge plasmas. in World Optical Conference, Shanghai China. 1993, 159
- 3 D. O. Neill, C. L. S. Lewis, D. Neely *et al.*. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 116, paper present at Int. Colloquium on X-ray lasers(1990), York
- 4 Wang Liushui, Lin Zunqi, Zhang Huihuang *et al.*. *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, to be published
- 5 王柳水,林尊琪,章辉煌等. 激光等离子体类氦锗 X 射线吸收谱研究. 强激光与粒子束, 1994, 8(2): 187 ~ 191

Experimental Research on "Point Projection" keV Wave-range X-ray Absorption Spectroscopy

Guan Fuyi Wang Liushui Wang Xiaoqin Lin Kangchun Lin Zunqi

(High Power Laser And Physics Lab., SIOFM, Shanghai 201800)

Abstract We have developed and successfully demonstrated a "point projection absorption spectroscopy (PPAS)" technique to record keV absorption spectra in the coronal region of laser produced germanium plasmas and aluminium plasmas which provide spatial information in the corona at a $\sim 24 \mu\text{m}$ level resolution and can freeze the motion of the expanding plasmas at a $\approx 250 \text{ ps}$ level.

Key words laser target room, absorption spectroscopy, X ray, laser plasma