

文章编号: 100124322(2004)0921153204

Al 激光等离子体电子温度的时间分辨诊断^X

张继彦, 杨家敏, 郑志坚, 杨国洪, 丁耀南, 张文海, 王耀梅, 李 军

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 将门控分幅相机与平面晶体谱仪耦合, 构成时间分辨光谱测量系统, 对 Al 激光等离子体的 K 壳层发射谱进行测量, 获得了相对入射激光延迟约 1ns, 积累时间约 200ps 的光谱信号。利用稳态碰撞²辐射平衡 (CRE) 近似条件下的等离子体光谱辐射动力学模型, 给出了 Al 激光等离子体 Ly₂ 线与 He₂ 线强度比以及 Ly₂ 线与 He₂ 线强度比与电子温度的函数关系。在此基础上, 根据实验谱线强度比, 得到激光强度为 2.319×10^{14} , 1.937×10^{14} 和 3.946×10^{14} W/cm² 时, 等离子体冕区电子温度分别为 $1.190(1 \pm 27\%)$, $1.165(1 \pm 27\%)$ 和 $1.525(1 \pm 27\%)$ keV。

关键词: 电子温度; 时间分辨; Al 激光等离子体; X 射线光谱学

中图分类号: O536; O562.3 **文献标识码:** A

采用 X 射线光谱学方法是获得等离子体内部状态信息的一种重要途径。与光学探针诊断法相比, 它利用等离子体自身发射的 X 射线作为诊断工具, 是一种非干涉诊断方法。由于 X 射线具有很高的穿透能力, 通过它可以获得高密度等离子体的状态信息^[1~5]。不过, 利用 X 射线光谱学方法进行激光等离子体精密诊断需要解决一些问题, 如大梯度、小尺度、瞬态光源的精确测量, X 射线光谱诊断模型的完备程度, 原子物理参数的精确性以及等离子体不透明度等。

近十几年来, X 射线光谱诊断技术取得了相当大的进展。在诊断方法上, Majoribanks 等人于 1995 年提出的等电子谱线法^[6,7]在很大程度上克服了理论模型、原子参数以及不透明度方面的不确定度, 使光谱学诊断方法向精密化方面迈出了重要一步; 在测量设备方面, 主要采用狭缝、针孔与分幅相机配接实现时空分辨, 目前已可实现约 60ps 的时间分辨^[8]。国内从 20 世纪 90 年代末期开始这方面的研究工作, 主要开展理论模型和理论方法研究, 取得了很大的进展^[9]。2000 年以后, 我们开始进行 keV 能区 X 射线光谱的时间分辨测量技术研究, 主要是采用晶体谱仪与条纹相机或分幅相机耦合测量。

本文主要介绍利用晶体谱仪与分幅相机配接, 对 Al 激光等离子体冕区 X 射线发射光谱的时间分辨进行测量, 以及利用实验光谱进行等离子体电子温度诊断等方面的研究工作。

1 理论模型

1.1 离化平衡

本工作采用级间线强度比进行电子温度诊断, 其基本原理是利用同种元素的类氢和类氢离子的同类跃迁线的强度比作为诊断工具, 根据强度比对温度的函数关系推出等离子体电子温度。级间线强度比具有对辐射场不敏感, 而对电子温度非常敏感的特性, 是当前进行电子温度诊断的基本手段之一。如果等离子体满足局域热动平衡 (LTE), 其离化平衡可由 Saha 方程确定。然而, 激光等离子体冕区往往严重偏离局域热动平衡状态, 并且也非完全符合冕区平衡条件, 这时应该采用碰撞²辐射 (CR) 模型。我们认为离化平衡主要由碰撞电离、辐射复合和三体复合过程决定, 忽略其它过程的贡献, 并采用稳态近似, 因此可将碰撞²辐射平衡条件下的离化平衡方程写成

$$\frac{N(Z^3, g)}{N(Z^3 + 1, g)} = \frac{(T_e, Z^3 + 1, g) + N_e (T_e, Z^3 + 1, g)}{S(T_e, Z^3, g)} \quad (1)$$

式中: $N(Z^3, g)$ 表示电荷态为 Z^3 的离子的基态布居数密度; N_e 表示电子密度; $(T_e, Z^3 + 1, g)$, (T_e, Z^3, g) 分别表示辐射复合率系数、三体复合率系数和碰撞电离速率系数。对上式进行迭代求解, 可得各电荷态的基态布居数密度。在电子密度较低的情况下, 离子主要处于基态, 这时 $N(Z^3) \approx N(Z^3, g)$ 。

X 收稿日期: 2003210217; 修订日期: 2004205219
基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (10275056); 中国工程物理研究院基金资助课题 (20020210)
作者简介: 张继彦 (1971—), 男, 助理研究员; 绵阳 9192986 信箱; E-mail: Zhangjiyanzy@sina.com。

1.2 能级布居

对局域热动平衡(LTE)系统,离子激发能级布居由 Boltzmann 分布确定。对非 LTE 系统,激发能级布居需通过求解激发平衡方程得到。在等离子体冕区,离子主要处于基态,可将离子简化为一个两能级系统,即分别处于基态和激发态的两个能级。在该系统中,设类氢离子基态占据数为 N_H ,激发态占据数为 Y ,类氦离子基态占据数为 N_{He} ,激发态占据数为 X ,电子密度为 N_e ,类氢与类氦两种离子由基态到激发态的电子碰撞激发速率系数分别用 C_H, C_{He} 表示,两种离子由激发态到基态的辐射跃迁几率分别用 A_H, A_{He} 表示。于是,类氢离子的激发平衡方程可写成^[7]

$$N_e C_H N_H - A_H Y = 0 \tag{2}$$

类氦离子的激发平衡方程可写成

$$N_e C_{He} N_{He} - A_{He} X = 0 \tag{3}$$

求解上述方程可得类氦和类氢离子的激发态能级占据数密度,分别为

$$X = \frac{N_e C_{He} N_{He}}{A_{He}} \tag{4}$$

$$Y = \frac{N_e C_H N_H}{A_H} \tag{5}$$

1.3 谱线强度比

利用上述结果,我们可以将类氦和类氢离子的 $n - 1$ 跃迁线强度表示为

$$I_{He, n}(Z, T_e) = X_n(Z, T_e) \quad He, n(Z) A_{He, n}(Z) \tag{6}$$

$$I_{H, n}(Z, T_e) = Y_n(Z, T_e) \quad H, n(Z) A_{H, n}(Z) \tag{7}$$

而两者的线强度比,即级间线强度比可表示为

$$R = \frac{I_{He, n}}{I_{H, n}} = \frac{X_n(T_e)}{Y_n(T_e)} \frac{E_{He, n} A_{He, n}}{E_{H, n} A_{H, n}} = \frac{C_{He} N_{He}}{C_H N_H} \cdot \frac{E_{He, n}}{E_{H, n}} \tag{8}$$

对 Al 激光等离子体,由式(8)计算得到了 I_{He2} / I_{Ly2} 与 I_{He2} / I_{Ly2} 两组级间线强度比随温度的变化关系,结果如图 1 所示。图中计算结果所取等离子体密度为 $0.02g/cm^3$ 。对多个密度点的计算结果表明,在密度小于 $0.2g/cm^3$ 的低密度等离子体区域,上述线强度比对电子密度不敏感。

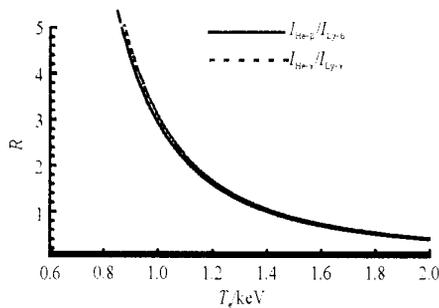


Fig. 1 Curves of interstage line ratio vs electron temperature

图 1 级间线强度比随电子温度的变化曲线

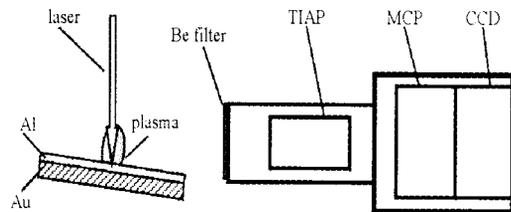


Fig. 2 Experimental arrangement for spectroscopy measurement

图 2 光谱测量实验布局

2 实 验

实验测量中,采用平面晶体作为色散元件,结合门控分幅相机构成时间分辨 X 射线测量系统,对一较短时间段的等离子体 X 射线发射光谱信息进行积分记录,从而获得等离子体发射光谱的时间分辨信息;实验中采用双层薄膜靶技术得到状态相对单一的等离子体。

实验布局如图 2 所示,在星光 激光装置上,采用三倍频激光($\lambda = 0.351\mu m$)辐照 Al($0.7\mu m$)/Au($4\mu m$)双层平面靶产生高离化激光等离子体,光束与靶面成 75° 夹角。在与激光束垂直的方向分别放置 $30\mu m$ 的 Be 滤片、TIAP 平面晶体($2d = 2.578nm$)、门控分幅管(MCP)和 X 射线 CCD 构成 X 射线光谱测量系统,从侧向对等离子体进行观测。MCP 类似于一个快门,调节分幅管触发开关相对于激光脉冲的时间延迟量,使其在激光辐

照靶面之后约 1 ns 开始记录一较短时间段(约 200 ps)内等离子体发射的 X 射线光谱信号。

实验中进行了 3 个发次的激光打靶,图 3 中给出的是经位置 2 波长校正的 X 射线发射谱,经分析辨认,上述光谱属于 Al 元素的类氦和类氢离子。

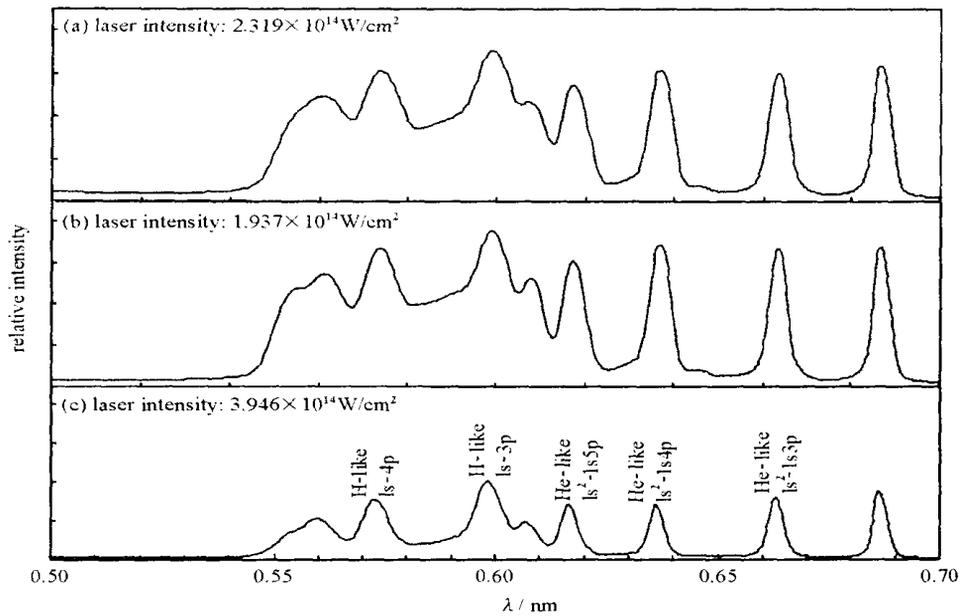


Fig. 3 K-shell spectra emitted from laser-produced aluminum plasma
图 3 Al 激光等离子体的 K 壳层发射谱

3 诊断结果

在进行温度诊断时,为减小偶然误差,一般应采用多组线强度比,并取其各自平均诊断值作为最终诊断结果。在本工作中采用了两组级间线强度比进行诊断,这两组线对分别为:He2like $1s^2 2l s 3p$ 与 H2like $1s 2 3p$, He2 like $1s^2 2l s 4p$ 与 H2like $1s 2 4p$ 。表 1 给出了实验测量的谱线强度比以及由此推断得到的等离子体电子温度数据。由于等离子体对 l 线比对 l' 线具有更小的光学厚度,因此,由其给出的诊断结果更为准确。当然,诊断结果的准确性还受到其它因素的影响,如等离子体不透明度、晶体的衍射特性以及光电耦合过程等。在本工作中,认为级间线强度比对上述因素不敏感,直接采用 CCD 记录信号的强度比近似代替其真实线强比。

表 1 Al 激光等离子体冕区电子温度的实验诊断结果

Table 1 Electron temperatures of the corona of laser-produced plasma deduced from interstage line ratios

shot	laser intensity/ ($W\ cm^{-2}$)	$\frac{I(1s^2 - 1s3p)}{I(1s - 3p)}$	T_e / keV	$\frac{I(1s^2 - 1s4p)}{I(1s - 4p)}$	T_e / keV
1st	2.319×10^{14}	1.294 5	1.280	1.717 7	1.190
2ed	1.937×10^{14}	1.318 5	1.275	1.833 2	1.165
3rd	3.946×10^{14}	0.717 7	1.580	0.825 8	1.525

在诊断中,我们考虑 3 种不确定度来源,即:(1) 诊断模型不确定度,包括原子物理模型、参数以及不透明度等方面的不确定度,参考 T.D. Shepard 等人对 Ti/Cr 等电子法诊断的研究结果^[7],初步估计由此项引入的不确定度约为 $\pm 20\%$;(2) 测量仪器不确定度,包括晶体衍射^[10]、微带响应以及 CCD 响应引入的不确定性误差,初步估计由这部分因素引入的不确定度约为 $\pm 12\%$;(3) 数据处理不确定度,为得到谱线强度比,需要对实验光谱进行最小二乘拟合,即将部分重叠的谱线分离,并计算峰面积,这一过程将引入诊断不确定度,初步估计约为 $\pm 15\%$ 。综合上述各种因素,可得到诊断结果的总体诊断不确定度约为 $\pm 27\%$ 。

4 结论

利用晶体谱仪与分幅相机耦合构成时间分辨光谱测量系统,对 Al 激光等离子体冕区发射光谱进行测量,获得了 3 种入射激光强度下的发射光谱数据。根据实验光谱中的谱线相对强度,对 Al 激光等离子体冕区电子

温度进行诊断,给出在激光强度分别为 2.319×10^{14} , 1.937×10^{14} , $3.946 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 时等离子体冕区温度分别为 $1.190(1 \pm 27\%)$, $1.165(1 \pm 27\%)$, $1.525(1 \pm 27\%) \text{ keV}$ 。本工作中建立的时间分辨电子温度诊断技术为研究等离子体冕区特性提供了有效的方法,并且,通过在该谱仪系统上配接狭缝或针孔,可构成时空同时分辨的光谱测量系统,为激光等离子体物理研究提供更为精确的诊断工具。

致谢:感谢“星光2”运行组人员在打靶实验中的大力配合。

参考文献:

- [1] Keane C J, Hammel B A, Kania D R, et al. X2ray spectroscopy of high2energy density inertial confinement fusion plasmas[J]. *Phys Fluids*, 1993, **B5**(9): 3328—3336.
- [2] Nishimura H, Kiso T, Shiraga H, et al. Study of indirectly driven implosion by X2ray spectroscopic measurements[J]. *Phys Plasmas*, 1995, **2**(6): 2063—2074.
- [3] Back C A, Kauffman R L, Bell P M, et al. Characterization of Nova plasmas using an X2ray spectrometer with temporal and spatial resolution[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 764—766.
- [4] Eidmann K, Andiel U, Pisani F, et al. K2shell spectra from hot dense aluminum layers buried in carbon and heated by ultrashot laser pulses[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, **81**: 133—146.
- [5] Ling Q Z, Shen S H, Zhi Z X, et al. Space2resolved electron density and temperature measurements of line2shaped laser plasmas[J]. *Phys Rev*, 1995, **E51**(6): 6059—6062.
- [6] Marjoribanks R S, Fredric B, Gabor K, et al. Isoelectronic line intensity ratios for plasma electron temperature measurement[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 683—688.
- [7] Shepard T D, Back C A, Kalantar D H, et al. Isoelectronic X2ray spectroscopy to determine electron temperatures in long2scale2length inertial2con2finement2fusion plasmas[J]. *Phys Rev*, 1996, **E53**(5): 5291—5301.
- [8] Young B K F, Stewart R E, Cerjan C J, et al. Time2resolved measurement of coronal temperature and line2intensity profiles in laser2produced plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **61**(25): 2851—2854.
- [9] 杨家敏, 丁耀南, 陈波, 等. 等电子法测量小能量激光打靶等离子体电子温度[J]. *物理学报*, 2003, **52**(2): 411—414. (Yang J M, Ding Y N, Chen B, et al. Electron temperature measurement of low2energy laser produced plasma using iso2electronic X2ray spectroscopy. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(2): 411—414)
- [10] Gilfrich J V, Brown D B, Burkhalter P G. Integral reflection coefficient of X2ray spectrometer crystals[J]. *Applied Spectroscopy*, 1975, **29**(4): 322—326.

Time2resolved diagnosis of the electron temperature of laser2produced aluminum plasma

ZHANG Ji2yan, YANG Jia2min, ZHENG Zhi2jian, YANG Guo2hong,

DING Yao2nan, ZHANG Wen2hai, WANG Yao2mei, LI Jun

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 9192986, Mianyang 621900, China)

Abstract: Time2resolved measurement system of X2ray spectroscopy was constructed by coupling a gated MCP with a flat crystal spectrometer, and the K2shell emission spectra from the corona of laser2irradiated aluminum plasma, were measured with a time delay of about 1ns and with an exposure time of about 200ps. Using the approximation of steady collisional2radiative equilibrium model, the in2terstage line intensity ratios of the K2shell lines of aluminum were given as a function of electron temperature and density. The electron temperatures were deduced from the line intensity ratios. The diagnosed electron temperatures of the plasmas were $1.190(1 \pm 27\%)$, $1.165(1 \pm 27\%)$, and $1.525(1 \pm 27\%) \text{ keV}$ respectively at laser intensity of 2.319×10^{14} , 1.937×10^{14} , and $3.946 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.

Key words: Electron temperature; Temporal resolution; Laser2produced aluminum plasma; X2ray spectroscopy