

双示踪元素 X 射线能谱诊断激光等 离子体电子温度*

陈 波 郑志坚 丁永坤 李三伟 王耀梅

(中国工程物理研究院等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

(2000 年 6 月 17 日收到, 2000 年 11 月 7 日收到修改稿)

在“星光 II”激光装置上对 Mg/Al 混合材料平面靶和 Mg/Al 示踪层金盘靶进行三倍频激光打靶实验, 用平面晶体谱仪测量靶材料发射的 X 射线能谱, 获取了示踪离子谱线实验数据. 采用多组态 Dirac-Fock 方法计算所需原子参数, 并在局域热动平衡条件下建立了双示踪离子谱线强度比随电子温度变化关系. 在此基础上由双示踪元素等电子谱线法确定了 Mg/Al 混合材料平面靶及金盘靶激光等离子体的电子温度.

关键词: 电子温度, 激光等离子体, X 射线能谱

PACC: 5225, 5270, 3220R

1 引 言

电子温度是等离子体的基本状态参量, 它的准确测量对于惯性约束聚变、X 射线激光、辐射不透明度研究等都有十分重要的意义. 对激光等离子体而言, X 射线波段光谱测量是电子温度主要诊断技术之一^[1-3]. 但就目前情况来看, 传统的单一示踪元素谱线强度比方法存在一些固有缺陷(例如: 伴线较弱、实验误差往往较大、线强比与电子温度关系对占优平衡条件相当敏感等). 近年发展起来的双示踪元素等电子谱线(isoelectronic line)法是诊断等离子体电子温度的一种新方法^[4-6], 它是利用原子序数略微不同($\Delta Z = 1$ 或 2)的两种示踪元素的等电子离子同一跃迁谱线强度比来确定电子温度. 与通常采用的单一示踪元素谱线强度比方法比较, 等电子谱线法有两个显著的优点: 第一, 谱线强度比随电子温度的变化关系对在确认离子占据机理及进行定量化处理时产生的偏差不甚敏感, 由谱线强度比确定电子温度的可靠性高; 第二, 在一定范围内谱线强度比几乎与等离子体电子密度无关, 而主要依赖于电子温度, 并且, 用于确定电子温度所比较的谱线通常是两条较强的共振线, 实验测量误差较小. 因此, 采用等电子谱线法测量等离子体电子温度有利于提高诊断

准确性.

本文选择 Mg, Al 作为诊断示踪元素, 并设计出适当的靶型结构, 在“星光 II”激光装置上开展了双示踪元素等电子谱线法诊断激光等离子体电子温度的实验研究, 同时也进行了相关的理论研究工作.

2 实验条件

实验用靶为 Mg/Al 混合材料平面靶和 Mg/Al 示踪层金盘靶, 其实际结构参数如下: Mg/Al 混合材料平面靶直径为 $500\mu\text{m}$, 厚度为 $6.85\mu\text{m}$, Mg 与 Al 的原子数比为 $\text{Mg}:\text{Al} = 38:62$, Mg/Al 示踪层金盘靶直径为 $500\mu\text{m}$, Mg/Al 均匀混合材料按 $\text{Mg}:\text{Al} = 38:62$ 沉积于金基底上, 沉积厚度为 206nm , 再在其上覆盖厚度为 17.8nm 的金表层. 示踪材料 Mg, Al 是根据电子温度诊断范围、“星光 II”装置激光参数以及 Mg 和 Al 的不同离化度离子丰度分布选择确定的. 示踪层厚度根据靶材料激光烧蚀速率^[7]确定.

实验测量在“星光 II”激光装置上进行. 入射激光波长 $\lambda = 0.35\mu\text{m}$ ($3\omega_0$), 脉宽 $\tau \approx 0.6\text{ns}$, 激光能量 $E_L \approx 60\text{J}$, 焦斑直径 $\phi \approx 250\mu\text{m}$, 激光束与靶法线夹角约为 5° . Mg/Al 混合材料平面靶和 Mg/Al 示踪层金盘靶的靶面激光功率密度分别为 5.3×10^{13} 和 $2.6 \times 10^{14}\text{Wcm}^{-2}$. 晶体谱仪(TIAP 晶体, 晶格常数

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-416-3-2.2)等离子体物理国家重点实验室基金(批准号: 99JS77.5.1.ZS7703)资助的课题.

$2d = 2.575\text{nm}$)作靶前向测量,谱仪与靶法线夹角约为 30° ,晶体中心距靶约为 110mm ,并在谱仪前用 $30\mu\text{m}$ 厚的镀膜挡掉可见光.激光焦斑大小用针孔相机监测.采用已标定过的 5F 软 X 射线胶片记录测量谱线.

由于实验上 K 线系谱线便于分辨和识别,特别是 $K\alpha$ 和 $K\beta$ 线较强,因此,诊断谱线选择 Mg,Al 类氢离子 $1s-2p$ 或 $1s-3p$ 跃迁及类氢离子 $1s^2-1s2p$ 或 $1s^2-1s3p$ 跃迁,即 Ly- α , Ly- β , He- α , He- β 谱线,波长范围为 $0.66-0.92\text{nm}$.

3 测量结果

Mg/Al 混合材料平面靶典型谱见图 1.用黑密度计对记录胶片扫描,给出所测谱线的黑密度值.然后考虑 5F 软 X 射线胶片的响应特性^[8],计算其响应曲线,并将谱仪前挡光镀膜对 X 射线的吸收予以补偿,即可得到所测谱线的强度分布,如图 2 所示.由于镀膜对长波长 X 射线吸收较强,因此,把黑度换算为相对强度时,长波部分的强度增加更为明显.

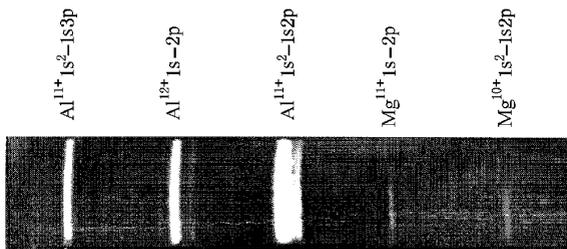


图 1 Mg/Al 混合材料平面靶谱图

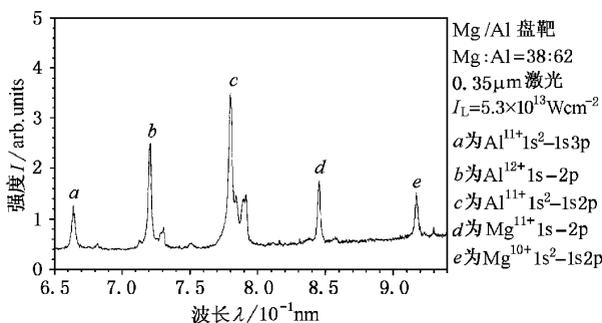


图 2 Mg/Al 混合材料平面靶谱线强度分布

图 3 是 Mg/Al 示踪层金盘靶的谱强度分布.与 Mg/Al 混合材料平面靶的强度分布(图 2)比较可以看到,由于 Au 的连续辐射,使得谱线强度本底有所

抬高.但由于 Mg,Al 的 $K\alpha$ 和 $K\beta$ 线波长处于 Au 的 M 带与 N 带间的“窗口”波段,因此 Au 的带谱对 Mg,Al 示踪诊断谱线的干扰很小,这表明在“星光 II”装置激光打靶条件下选择 Mg,Al 作为测量金等离子体电子温度的诊断示踪元素是合适的.另外,在这次实验测量中,将过去晶体谱仪采用的挡光铝膜换成镀膜,并把胶片暗盒改为带插板快门的无滤膜暗盒,这也增强了谱仪测量弱信号的能力.

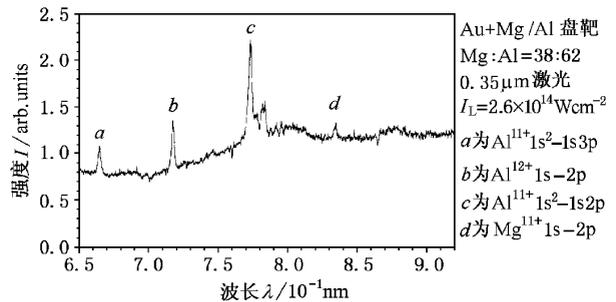


图 3 Mg/Al 示踪层金盘靶谱线强度分布

为了由测量的谱线强度确定等离子体电子温度,需要建立谱线强度比随电子温度变化的关系.设核电荷为 Z_1 , r 度电离的离子从 m 能级到 n 能级自发辐射跃迁谱线强度为 $I(m, n)$,核电荷为 Z_2 , s 度电离的离子从 p 能级到 q 能级自发辐射跃迁谱线强度为 $I(p, q)$.在等离子体光性薄条件下,两条谱线强度比为

$$R = \frac{I(m, n)}{I(p, q)} = \frac{\lambda^{\lambda}(p, q)A^{\lambda}(m, n)N^{\lambda}(m)}{\lambda^{\lambda}(m, n)A^{\lambda}(p, q)N^{\lambda}(p)}$$

式中 λ 为跃迁波长, A 为跃迁速率, $N^{\lambda}(m)$ 和 $N^{\lambda}(p)$ 分别为 m 和 p 激发能级上的离子数密度.等离子体中与电子碰撞过程相关的原子动力学参数是电子温度的函数,这些参数也是速率方程的系数,它决定着离子布居和能级布居.若跃迁上能态 m, p 的离子分布为

$$\frac{N^{\lambda}(m)}{N^{\lambda}} = f_1(T_e), \quad \frac{N^{\lambda}(p)}{N^{\lambda}} = f_2(T_e),$$

不同电离态离子的分布为

$$\frac{N^r}{N_1} = F_1(T_e), \quad N_1 = \sum_{r=0}^{Z_1} N^r,$$

$$\frac{N^s}{N_2} = F_2(T_e), \quad N_2 = \sum_{s=0}^{Z_2} N^s,$$

式中 N^r 为 r 度电离离子的数密度, N^s 为 s 度电离离子的数密度,于是,有

$$R(T_e) = \frac{\lambda^{\lambda}(p, q)A^{\lambda}(m, n)N_1 f_1(T_e) F_1(T_e)}{\lambda^{\lambda}(m, n)A^{\lambda}(p, q)N_2 f_2(T_e) F_2(T_e)}$$

通过求解速率方程,找出能级分布与电子温度的关系 $f_1(T_e)$ 和 $f_2(T_e)$ 以及离化分布与电子温度的关系 $F_1(T_e)$ 和 $F_2(T_e)$,即可确定谱线强度比随电子温度的变化关系 $R(T_e)$ 。这样,如果实验上测出两条谱线的相对强度比 R ,就可以由谱线强度比与电子温度关系 $R(T_e)$ 推出等离子体电子温度 T_e 。本文采用相对论多组态 Dirac-Fock 方法^[9]计算所需原子参数,并在局域热动平衡条件下,通过求解 Saha 方程,得到不同电离态离子分布。在此基础上,根据离子能级分布遵从的 Boltzmann 关系,可以确定 LTE 条件下双示踪元素等电子离子谱线强度比随电子温度的变化。

图 4 和图 5 分别给出 AlHe- α 与 MgHe- α 谱线强度比随等离子体电子温度的变化关系和 AlLy- α 与 MgLy- α 谱线强度比与电子温度的关系。从图 5 的计算结果还可看到,在一定范围内等离子体电子密度的变化对谱线强度比与电子温度的关系影响很小。这与文献 [5] 中对 Ti, V 等电子离子计算所得的结论一致。

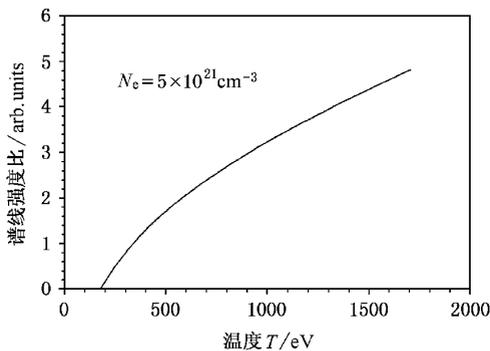


图 4 Al 与 MgHe- α 谱线强度比与电子温度 T 的关系

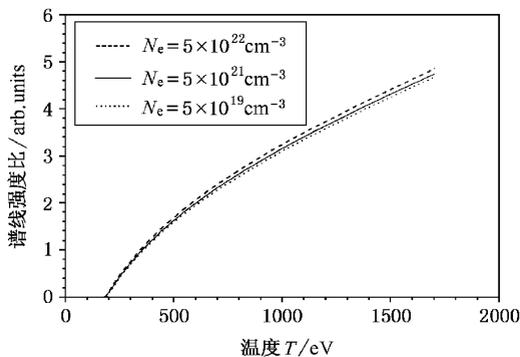


图 5 Al 与 MgLy- α 谱线强度比与电子温度 T 的关系

为了检验谱线强度比与电子温度关系理论计算的可靠性,本文还给出 VHe- β 与 TiHe- β 谱线强度比

与电子温度关系曲线,并与文献 [10] 的计算结果作了比较,结果见图 6。可以看出,本文建立的双示踪离子等电子谱线强度比随等离子体电子温度的变化关系是可靠的。

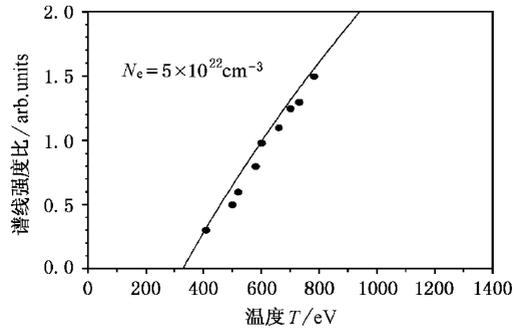


图 6 V 与 TiHe- β 谱线强度比与电子温度 T 的关系 ● 为文献 [10] 的计算结果

根据前述双示踪材料谱强度实验测量数据以及等电子谱线强度比与电子温度关系理论计算结果,可以确定靶等离子体时间平均电子温度 T_e ,结果见表 1。其中 I_L 为靶面激光功率密度, R_1 为 AlLy- α 与 MgLy- α 谱线强度比, R_2 为 AlHe- α 与 MgHe- α 谱线强度比,金平面靶电子温度与靶面激光功率密度的近似定标关系为^[11]

$$T_e(\text{keV}) = 2.3 I_L^{0.45} \lambda_{\mu\text{m}}^{0.85}$$

表 1 Mg/Al 混合材料平面靶和 Mg/Al 示踪层金盘靶平均电子温度

Mg/Al 混合材料平面靶		Mg/Al 示踪层金盘靶	
$I_L(3\omega_0) = 5.3 \times 10^{13} \text{Wcm}^{-2}$		$I_L(3\omega_0) = 2.6 \times 10^{14} \text{Wcm}^{-2}$	
$R_1 = 1.97$	$T_e = 598 \text{eV}$	$R_1 = 3.96$	$T_e = 1348 \text{eV}$
$R_2 = 2.39$	$T_e = 702 \text{eV}$	定标关系	$T_e = 1.448 \text{keV}$

4 结 语

本工作选择 Mg, Al 作为金等离子体诊断示踪元素,开展了双示踪元素等电子谱线法诊断激光等离子体电子温度的理论和实验研究,做了有益的探索性工作。国外学者有关等电子谱线法诊断电子温度的研究工作,由于他们所使用的激光器能量较高,因此主要选取中 Z 元素(如 Ti, V, Cr 等)作为诊断示踪材料。采用等电子谱线法并选择 Mg/Al 混合双示踪材料测量金等离子体电子温度,本工作尚属首次。为了能在实验上测得示踪离子谱线信号,又不致于使示踪材料对待测靶等离子体真实状态扰动过

大,还需对 Mg/Al 材料混合比例、掺杂方式以及最佳掺杂量等进行进一步探索。

本工作还建立了自己的示踪元素等电子离子谱线强度与电子温度关系理论数据,特别是向低温拓展,以满足激光等离子体电子温度实验诊断需求。目前已发表的有关示踪元素等电子离子光谱与电子温

度关系的理论数据很少,并且是针对他们的实验条件计算的(国外腔腔诊断温度约 3—5keV),因此,在国内开展这方面的理论研究工作也是很有必要的。

感谢“星光 II”激光器运行人员和制靶人员对本工作的支持。

- [1] C. DeMichelis, M. Mattioli, *Nucl. Fusion* **21**(1981) 677.
- [2] R. L. Kauffman, R. W. Lee, K. Estabrook, *Phys. Rev.*, **A35** (1987) 4286.
- [3] B. K. F. Young, R. E. Stewart, C. J. Cerjan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**(1988) 2851.
- [4] T. D. Shepard, C. A. Back, D. H. Kalantar *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**(1995) 749.
- [5] R. S. Marjoribanks, F. Budnik, G. Kulcsar *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66**(1995) 683.
- [6] T. D. Shepard, C. A. Back, D. H. Kalantar *et al.*, *Phys. Rev.*, **E53**(1996) 5291.
- [7] S. W. Li *et al.*, *Acta Opt. Sin.*, **18**(1998) 895 (in Chinese) [李三伟等, *光学学报*, **18**(1998) 895].
- [8] J. M. Yang *et al.*, *Acta Opt. Sin.* **17**(1997) 599 (in Chinese) [杨家敏等, *光学学报*, **17**(1997) 599].
- [9] K. G. Dylla, J. P. Grant, C. T. Johnson *et al.*, *Comput. Phys. Commun.* **55**(1989) 425.
- [10] R. S. Marjoribanks, M. C. Richardson, P. A. Jaanimagi *et al.*, *Phys. Rev.*, **A46**(1992) R1747.
- [11] E. F. Gabl, B. H. Failor, G. E. Busch *et al.*, *Phys. Fluids*, **B2** (1990) 2437.

DETERMINATION OF ELECTRON TEMPERATURE IN LASER-PRODUCED PLASMAS BY ISOELECTRONIC X-RAY SPECTROSCOPY*

CHEN BO ZHENG ZHI-JIAN DING YONG-KUN LI SAN-WEI WANG YAO-MEI

(State Key Laboratory of Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 17 June 2000; revised manuscript received 7 November 2000)

ABSTRACT

Experiments were performed to determine the electron temperatures of Mg/Al disk target and gold disk target mixed with tracing Mg/Al materials irradiated by laser beams at a wavelength of $0.35\mu\text{m}$ from the “Xing Guang II” high-power laser facility. X-ray spectra from the targets were measured by a crystal spectrometer. The technique of multi-configuration Dirac-Fock was used to calculate relevant atomic parameters. Variations of relative intensity of isoelectronic lines from the two tracing ions in laser-produced plasmas with the electron temperature were derived according to local-thermodynamic-equilibrium model. Based on the above-mentioned experiment the electron temperatures of the plasmas generated by focusing laser pulse on the targets were determined via isoelectronic line ratios.

Keywords : electron temperature, laser-produced plasmas, isoelectronic X-ray spectrum

PACC : 5225, 5270, 3220R

* Project supported by the Foundation of High Technology Research and Development Plan of China (Grant No. 863-416-3-2.2) and by the Foundation of State Key Laboratory of Laser Fusion, China (Grant No. 99JS77.5.1. ZS7703).