

* 博士后研究 *

等电子谱线法诊断等离子体电子温度实验研究*

陈 波 郑志坚 丁永坤 李三伟 王耀梅

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室, 绵阳 621900

摘要 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 光光谱, 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 射线谱

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 光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). 国外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线强比方法比较, 等电子谱线法有两个显著的优点: 第 1, 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, 由线强比确定电子温度的可靠性高; 第 2, 在一定范围内线强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.

本文选择镁、铝作为诊断示踪元素, 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.

1 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/

2000-08-23 收稿, 2000-12-07 收修改稿

* 国家高技术研究发展计划基金(863-416-3-2.2)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(99JS77.5.1.ZS7703)资助

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 混合材料按 $\text{Mg}:\text{Al} = 38:62$ 沉积于金基底上, 沉积厚度为 $206\ \text{nm}$, 再在其上覆盖厚度为 $17.8\ \text{nm}$ 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 $E_L \approx 6\ \text{OJ}$, 焦斑直径 $\varphi \approx 250\ \mu\text{m}$, 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 $5.3 \times 10^{13}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $2.6 \times 10^{14}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. 晶体谱仪 (TiAP 晶体, 晶格常数 $2d = 2.575\ \text{nm}$) 作靶前向测量, 谱仪与靶法线夹角约 30° , 晶体中心距靶约 $110\ \text{mm}$, 并在谱仪前用 $30\ \mu\text{m}$ 厚的铍膜挡掉可见光. 激光焦斑大小用针孔相机监测. 采用已标定过的 5F 软 X 光胶片记录测量谱线.

由于实验上 K 线系谱线便于分辨和识别, 特别是 K_α 和 K_β 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 $1s^2-1s^3p$ 跃迁, 即 $\text{Ly-}\alpha$, $\text{Ly-}\beta$, $\text{He-}\alpha$, $\text{He-}\beta$ 谱线, 波长范围 $0.66 \sim 0.92\ \text{nm}$.

2 结果与讨论

Mg/Al 混合材料平面靶典型谱照片见图 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 光胶片的响应特性^[8], 计算其响应曲线, 并将谱仪前挡光铍膜对 X 光的吸收予以补偿, 即可得到所测谱线的强度分布, 如图 2 所示. 由于铍膜对长波长 X 光吸收较强, 因此, 把黑密度换算为相对强度时, 长波部分的强度增加更为明显.

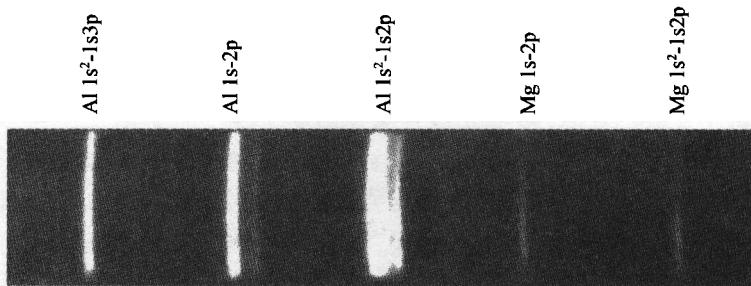


图 1 Mg/Al 混合材料平面靶谱照片

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, 由于金的连续辐射, 使得谱线强度本底有所抬高. 但由于镁、铝的 K_α 和 K_β 线波长处于金的 M 带与 N 带间的“窗口”波段, 因此金的带谱对镁、铝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镁、铝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铍膜, 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.

为了由测量的谱线强度确定等离子体电子温度, 需要建立线强比随电子温度变化的关系. 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

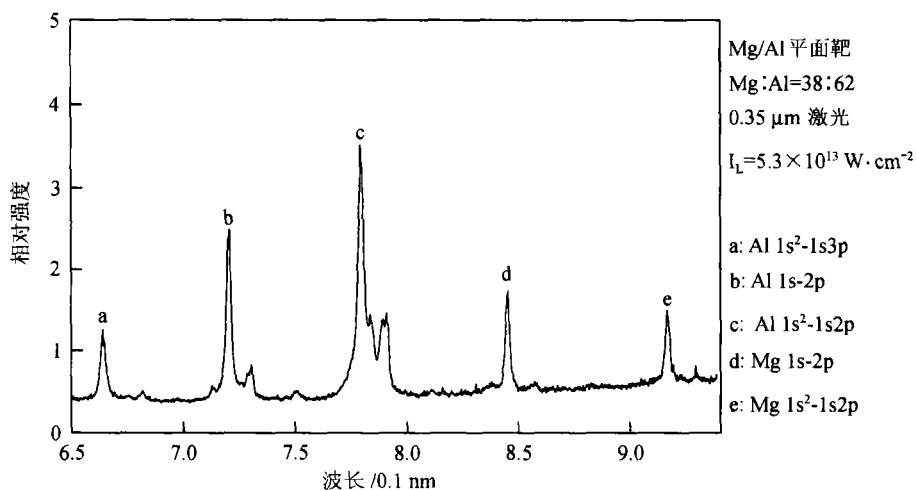


图2 Mg/Al 混合材料平面靶谱线强度分布

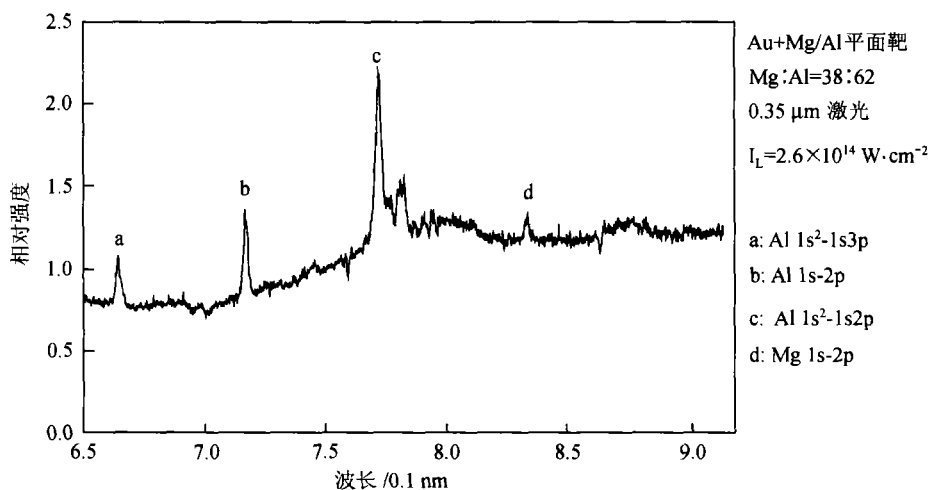


图3 Mg/Al 示踪层金盘靶谱线强度分布

程的系数,它决定着离子布居和能级布居.通过求解速率方程,找出示踪离子分布和能级分布与电子温度的关系,即可确定谱线强度比随电子温度的变化.在局域热动平衡(LTE)条件下,离子激发态能级满足 Boltzmann 分布.采用相对论多组态 Dirac-Fock 方法计算所需原子参数,并通过求解 Saha 方程,可得到不同电离态离子分布,从而可以确定 LTE 条件下双示踪元素等电子离子谱线强度比随电子温度变化的函数关系.

本文分别计算了 Al He- α 与 Mg He- α 谱线强度比随等离子体电子温度的变化关系和 Al Ly- α 与 Mg Ly- α 线强比与电子温度的关系.从我们的计算结果可知,在一定范围内,等离子体电子密度的变化对线强比与电子温度的关系影响很小.这与文献[5]中对钛、钒等电子离子计算所得的结论一致.

为了检验线强比与电子温度关系理论计算的可靠性,我们还给出了 V He- β 与 Ti He- β 线

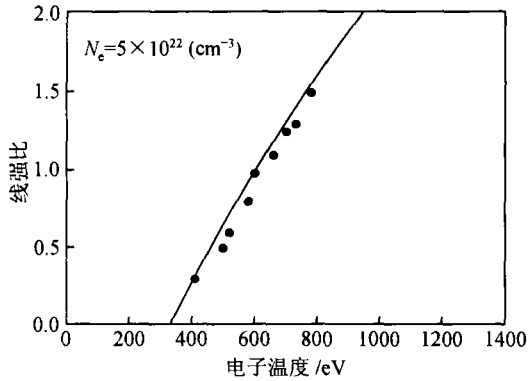


图 4 V 与 Ti He- β 线强比与电子温度的关系

●引自文献[9]

强比与电子温度的关系曲线,并同文献[9]的计算结果作了比较,结果见图 4. 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变化关系是可靠的.

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 表示 Al Ly- α 与 Mg Ly- α 谱线强度比, R_2 表示 Al He- α 与 Mg He- α 线强比, 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^[10]

$$T_e(\text{keV}) = 2.31 I_L^{0.45} \lambda_{\mu\text{m}}^{0.85}.$$

从表 1 数据可以看到,对于 Mg/Al 混合材料平面靶,由不同的谱线强度比得到的电子温度的最大相对偏差约为 17%. 这种偏差主要是由谱线强度测量误差和线强比与电子温度关系理论模型本身的适用性带来的偏差所引起的,其中影响谱强度测量不确定度的因素主要有软 X 光胶片响应曲线标定误差和黑密度测量误差,对此,还需开展进一步的工作.

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 |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| $R_1 = 1.97, T_e = 598(\text{eV})$ | $R_1 = 3.96, T_e = 1348(\text{eV})$ |
| $R_2 = 2.39, T_e = 702(\text{eV})$ | 定标关系: $T_e = 1.448(\text{keV})$ |

3 结束语

本工作针对目前国内激光器功率不高、靶等离子体温度较低的情况,选择出镁、铝作为金等电子离子诊断示踪元素,在国内首先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和理论研究,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电子离子温度,本工作尚属首次. 从实验结果来看,本工作的探索是成功的,其方法是可行的. 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,还需对示踪材料掺杂方式、混合比例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. 目前国外文献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,并且大部分是针对他们的实验条件计算的(国外腔靶诊断温度约 3~5 keV),因此,在国内开展这方面的理论研究工作也是很有必要的. 这些工作还可进一步深入下去,以改进和完善双示踪元素等电子离子光谱与电子温度关系理论模型. 例如,采用更符合等离子体中原子(离子)实际状况的含温有界原子 Thomas-Fermi 理论计算谱线辐射强度;用逃逸概率因子处理非光性薄等离子体的不透明度效应;考虑外

加辐射场的影响和非 Maxwell 分布自由电子的修正等.

致谢 感谢“星光 II”激光器运行人员和制靶人员对本工作的支持.

参 考 文 献

- 1 DeMichelis C, et al. Soft-X-ray spectroscopic diagnostics of laboratory plasmas. *Nucl Fusion*, 1981, 21(6): 677
- 2 Kauffman R L, et al. Dynamics of laser-irradiated planar targets measured by X-ray spectroscopy. *Phys Rev A*, 1987, 35(10): 4286
- 3 Young B K F, et al. Time-resolved measurement of coronal temperature and line-intensity profiles in laser-produced plasmas. *Phys Rev Lett*, 1988, 61(25): 2851
- 4 Shepard T D, et al. T_e measurements in open- and closed-geometry long-scale-length laser plasmas via isoelectronic X-ray spectral line ratios. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1): 749
- 5 Marjoribanks R S, et al. Isoelectronic line intensity ratios for plasma electron temperature measurement. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1): 683
- 6 Shepard T D, et al. Isoelectronic X-ray spectroscopy to determine electron temperatures in long-scale-length inertial-confinement-fusion plasmas. *Phys Rev E*, 1996, 53(5): 5291
- 7 李三伟, 等. 铝靶三倍频激光烧蚀参数实验研究. *光学学报*, 1998, 18(7): 895
- 8 杨家敏, 等. 5F 软 X 光胶片响应特性研究. *光学学报*, 1997, 17(5): 599
- 9 Marjoribanks R S, et al. Electron-temperature measurement in laser-produced plasmas by the ratio of isoelectronic line intensities. *Phys Rev A*, 1992, 46(4): R1747
- 10 Gabl E F, et al. Plasma evolution from laser-driven gold disks. I. Experiments and results. *Phys Fluids B*, 1990, 2(10): 2437