

# 等电子谱线法测量 Mg/Al 等离子体 电子温度空间分布

陈波, 郑志坚, 丁永坤, 李三伟, 王耀梅

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 在“星光 I”激光装置上对 Mg/Al 混合材料埋点靶进行三倍频激光打靶实验, 用空间分辨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的变化关系。在此基础上由双示踪元素等电子谱线法确定了 Mg/Al 混合材料埋点靶激光等离子体电子温度空间分布。

**关键词:** 电子温度空间分布; Mg/Al 等离子体; X 射线谱

**中图分类号:** TL651

**文献标识码:** A

电子温度是等离子体的重要状态参数之一, 其空间分布特性对于惯性约束聚变研究非常重要, 因为靶对激光能量的吸收、激光-X 光转换、辐射输运以及内爆压缩等过程都与电子温度有关。X 光波段光谱测量是激光等离子体电子温度主要诊断技术之一<sup>[1-3]</sup>。但就目前情况来看, 传统的单一示踪元素线谱强度比方法存在一些固有缺陷<sup>[4]</sup>。国外九十年代发展起来的双示踪元素等电子谱线法是诊断等离子体电子温度的一种新方法<sup>[5-7]</sup>, 它是利用原子序数相近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。与通常采用的单示踪元素线强比方法比较, 双示踪元素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, 由线强比确定电子温度的可靠性高; 第二, 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。我们选择镁、铝作为诊断示踪元素, 并设计出适当的靶型结构, 在“星光 I”激光装置上开展了对 Mg/Al 混合材料埋点靶三倍频激光打靶实验, 由双示踪元素 X 光谱确定了靶等离子体电子温度的空间分布。

## 1 实验条件

实验用靶为 Mg/Al 混合材料埋点靶, 其直径为 500 $\mu\text{m}$ , 厚度为 6.013 $\mu\text{m}$ , 其中 Mg/Al 混合材料直径为 200 $\mu\text{m}$ , Mg 与 Al 的原子数比为 38:62。在 Mg/Al 材料周围加宽度为 150 $\mu\text{m}$  的碳氢材料环形约束带, 以减小靶侧向喷射的等离子体形成的二维效应的影响。靶型结构如图 1 所示。

实验测量在“星光 I”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  $E\approx 60\text{J}$ , 焦斑直径  $\phi\approx 220\mu\text{m}$ , 激光束与靶法线夹角约为  $5^\circ$ , 靶面激光功率密度约为  $3\times 10^{14}\text{Wcm}^{-2}$ 。两台晶体谱仪(TIAP 晶体, 晶格常数  $2d=2.575\text{nm}$ ) 分别作靶前向和切向测量。前向谱仪与靶法线夹角约  $30^\circ$ , 晶体中心距靶约 110mm, 切向谱仪加宽度为 15 $\mu\text{m}$  的狭缝作空间分辨测量, 狭缝距离靶点约 8mm, 空间放大倍数为 8.5。两谱仪均用 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。实验布置如图 2 所示。

由于实验上 K 线系谱线便于分辨和识别, 特别是 K $\alpha$  线较强, 因此, 诊断谱线选择 Mg, Al 类氢离子 1s-2p 跃迁及类氦离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁谱线, 即 Ly- $\alpha$  和 He- $\alpha$  谱线, 波长范围 0.71~0.92nm。

\* 收稿日期: 2000-06-21; 修订日期: 2000-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(19875045); 高温高密度等离子体物理国家重点实验室基金(99JS77.5.1.ZS7703)

作者简介: 陈波(1958-), 男, 副研究员, 在站博士后, 主要从事原子物理及等离子体诊断研究; 绵阳 919-986 信箱。

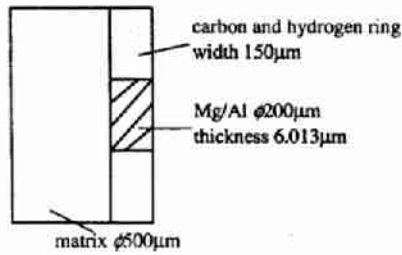


Fig. 1 Schematic of Mg/Al dotted target structure

图 1 Mg/Al 混合材料埋点靶结构示意图

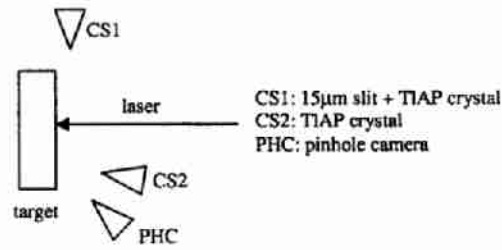


Fig. 2 Experimental setup of detectors

图 2 探测器实验布置

### 2 测量结果与讨论

对 Mg/Al 混合材料埋点靶从靶平面切向方向观测,记录沿靶平面法线方向空间分辨的喷射等离子体所发射的谱线,典型谱照片见图 3。图中谱线下

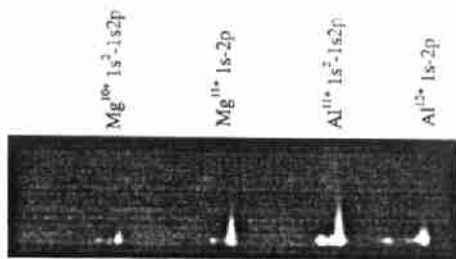


Fig. 3 Spatially resolved spectrum of Mg/Al dotted target

图 3 Mg/Al 材料埋点靶空间分辨谱照片

端为靠近靶面位置,纵向对应于靶平面法线方向,横向为谱分辨方向。用微密度计对记录胶片作二维扫描,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<sup>[9]</sup>,计算其响应曲线,并将谱仪前挡光镀膜对 X 光的吸收予以补偿,即可得到不同空间位置谱线强度分布,如图 4 所示。图中 z 值表示沿靶表面法线方向相对空间位置,以刚开始有谱峰出现的位置处为喷射等离子体底部,取此处 z=0。在计算相对谱强度时,对出现重叠峰的谱线进行了剥谱处理工作。

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。双示踪元素等电子谱线法是让原子序数略微不同(ΔZ=1 或 2)的两种示踪元素处于待测的等离子体中,由于等离子体温度较高,示踪元素不同程度离化,利用这两种示踪元素的等电子离子(即核外电子数相同的离子)同一跃迁谱线(例如,铝和镁的类氢离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁谱线)强度比来确定电子温度。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

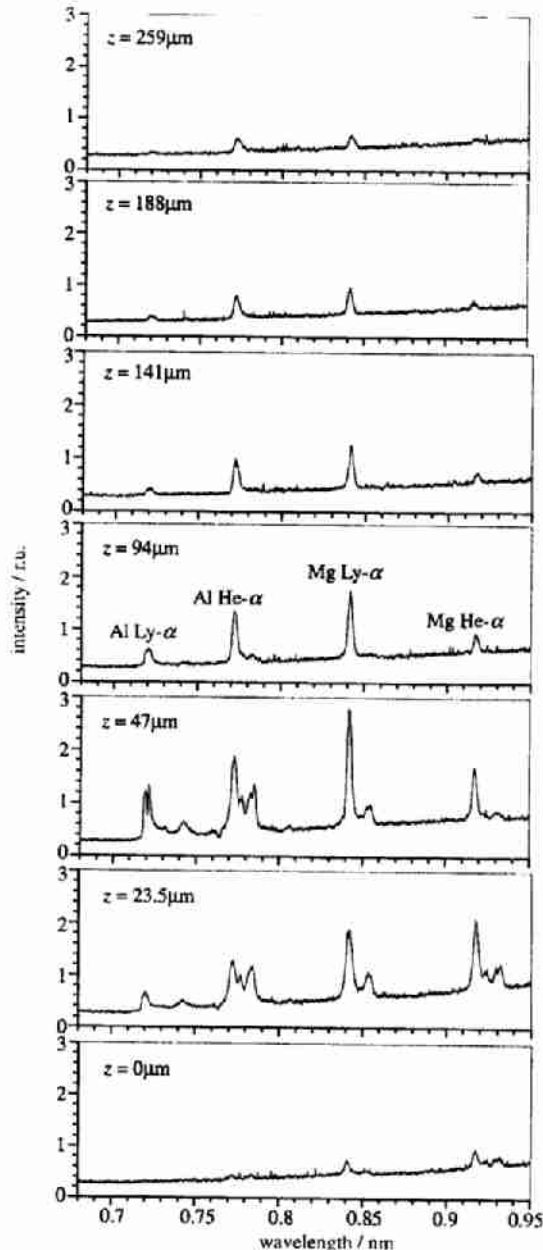


Fig. 4 Variation of spectral line intensity with distance from the target surface

图 4 Mg/Al 材料埋点靶不同空间位置谱线强度分布

离化布居和能级布居。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,即可确定线强比随电子温度的变化。本文采用相对论多组态 Dirac-Fock 方法<sup>[9]</sup>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,确定了局域热动平衡条件下双示踪元素等电子离子谱线强度比随等离子体电子温度变化的关系。

图 5 给出了 Al<sup>11+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁与 Mg<sup>10+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁谱线强度比随等离子体电子温度变化的关系曲线。我们还计算了不同电子密度情况下 Al<sup>12+</sup> 离子 1s-2p 跃迁与 Mg<sup>11+</sup> 离子 1s-2p 跃迁谱线强度比与电子温度的关系。由计算结果可知<sup>[10]</sup>,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[6]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,我们计算了 V<sup>21+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s3p 跃迁与 Ti<sup>20+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s3p 跃迁谱线强度比与电子温度的关系曲线,并同文献[4]的计算结果作了比较<sup>[10]</sup>。结果表明,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,可以确定靶等离子体空间分辨、时间积分的电子温度  $T_e$ , 结果见表 1。其中  $z$  表示沿靶表面法线方向相对空间位置,  $r$  表示 Al<sup>11+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁与 Mg<sup>10+</sup> 离子 1s<sup>2</sup>-1s2p 跃迁谱线强度比。由表 1 数据可知,靠近靶表面(较小  $z$  值)处电子温度较低,随着  $z$  值增大,电子温度快速上升,当  $z=140\mu\text{m}$  时,电子温度达到最大。随着  $z$  的进一步增加,电子温度缓慢下降。电子温度随空间位置的变化反映了激光等离子体中电子温度的空间分布情况。表 1 的数据还表明,靠近靶表面处未出现电子温度略微上升的情况<sup>[11]</sup>,说明本文工作设计的靶型结构中增加了碳氢材料环形约束带能够有效地抑制侧向喷射等离子体形成的二维效应。

表 1 Mg/Al 混合材料埋点靶时间平均电子温度的空间分布

Table 1 Variation of electron temperature with distance from Mg/Al dotted target surface

$z/\mu\text{m}$	23.5	47.0	70.5	94.0	117.5	141	164.5	188
$r$	0.84	2.00	2.40	2.90	3.25	3.50	3.35	3.00
$T_e/\text{eV}$	300	560	670	840	970	1060	990	870

### 3 结束语

我们选择镁、铝作为诊断示踪元素,开展了双示踪元素等电子谱线法测量激光等离子体电子温度空间分布的实验研究,做了一些探索性工作。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,以满足电子温度实验诊断需求。但这些工作仅仅在双示踪元素 X 光谱诊断等离子体电子温度方面做了初步尝试,这方面的研究工作还可进一步深入下去。例如,配合时间分辨探测设备,获取电子温度随时间演化的信息;开展腔靶中等电子谱线法诊断等离子体电子温度的实验研究;改进和完善等电子离子光谱与电子温度关系理论模型等,使得双示踪元素 X 光谱诊断技术进一步发展。

致 谢 感谢“星光 I”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, Mattioli M. Soft-X-ray spectroscopic diagnostics of laboratory plasmas[J]. *Nucl Fusion*, 1981, 21(6):677-754.
- [2] Kauffman R L, Lee R W, Estabrook K. Dynamics of laser-irradiated planar targets measured by X-ray spectroscopy[J]. *Phys Rev*

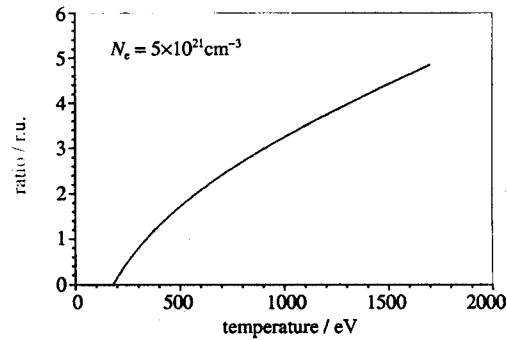


Fig. 5 Ratio of Al to Mg He- $\alpha$  isoelectronic line intensity as a function of electron temperature  
图 5 Al 与 Mg He- $\alpha$  线强度比与电子温度的关系

- A, 1987, 35(10), 4286-4294.
- [3] Young B K F, Stewart R E, Cerjan C J, et al. Time-resolved measurement of coronal temperature and line-intensity profiles in laser-produced plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 61(25):2851-2854.
- [4] Marjoribanks R S, Richardson M C, Jaanimagi P A, et al. Electron-temperature measurement in laser-produced plasmas by the ratio of isoelectronic line intensities[J]. *Phys Rev A*, 1992, 46(4):1747-1750.
- [5] Shepard T D, Back C A, Kalantar D H, et al. Te measurements in open- and closed-geometry long-scale-length laser plasmas via isoelectronic X-ray spectral line ratios[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1):749-751.
- [6] Marjoribanks R S, Budnik F, Kulcsar G, 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 X-ray spectroscopy to determine electron temperatures in long-scale-length inertial-confinement-fusion plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1996, 53(5):5291-5301.
- [8] 杨家敏, 丁耀南, 郑志坚, 等. 5F 软 X 光胶片响应特性研究[J]. *光学学报*, 1997, 17(5):599-603.
- [9] Dylla K G, Grant I P, Johnson C T, et al. GRASP: A general-purpose relativistic atomic structure program[J]. *Comput Phys Commun*, 1989, 55:425-456.
- [10] 陈 波, 郑志坚, 丁永坤, 等. 双示踪元素 X 光谱诊断激光等离子体电子温度[J]. *物理学报*, 2001, 5(4).
- [11] 李三伟, 陈 波, 丁耀南, 等. 铝靶电子温度空间分布实验诊断[J]. *原子与分子物理学报*, 1999, 16(4):467-470.

## Observation on spatial character of plasmas electron temperature for Mg/Al dotted targets by isoelectronic line ratios

CHEN Bo, ZHENG Zhi-jian, DING Yong-kun, LI San-wei, WANG Yao-mei

(National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, P.O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The experiments were performed to determine the profile of electron temperature in Mg/Al dotted target irradiated by laser beams at wavelength of 0.35 $\mu$ m from the "Xingguang I" laser facility. X-ray spectra from the target were measured by a spatially resolved 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 double tracing materials in laser-produced plasmas with electron temperature were derived according to local-thermodynamic-equilibrium model. And, the spatial character of electron temperature in plasmas was determined via isoelectronic spectral line intensity ratios.

**Key words:** electron temperature profile; laser-produced plasmas; isoelectronic X-ray spectrum