

文章编号: 1001-4322(2005)05-0703-04

# Al 激光等离子体电子密度的空间分辨诊断\*

杨柏谦<sup>1,2</sup>, 张继彦<sup>2</sup>, 韩申生<sup>1</sup>, 郑志坚<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 采用 20  $\mu\text{m}$  的狭缝配平面晶体谱仪构成空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。利用 Al 的 Ly- $\alpha$  线谱的翼部 Stark 展宽效应推得电子密度空间分布轮廓, 建立了翼部 Stark 展宽法测量高密度等离子体电子密度的诊断技术。

**关键词:** 激光等离子体; 翼部 Stark 展宽; 电子密度; X 射线光谱学

**中图分类号:** O536; O433.1 **文献标识码:** A

对高功率激光与固体靶相互作用产生的高温、高密度的激光等离子体进行诊断的最有效方法之一就是对其靶物质中所含元素的多电荷离子态所发射的光谱进行研究, 即 X 射线光谱学方法。电子密度是等离子体的基本参数之一, 其诊断技术的发展对激光惯性约束核聚变、辐射不透明度及 X 射线激光等的研究都有非常重要的实际意义。

目前, 基于 X 射线光谱学, 国际上对低密度等离子体的诊断已有较清楚的认识, 而对高密度等离子体热传导区的诊断还不明朗<sup>[1~7]</sup>。Smith 和 Peacock(1978 年) 在他们的工作中首次提出利用类 H 离子线谱的翼部 Stark 展宽效应测量电子密度<sup>[8]</sup>, 并采用半绝对标定的方法获得了点状 C 等离子体  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  的电子密度。我们组曾经发展了该种测量方法, 不需要谱线强度的绝对测量, 仅利用 Ly- $\alpha$  翼部 Stark 线型轮廓, 通过对实验谱线的拟合, 就可以获得传导区电子密度  $N_e$ <sup>[9]</sup>, 进而对激光等离子体传导区的性质进行了研究<sup>[10,11]</sup>。该方法的优点是不受光厚的影响, 翼部强度仅对等离子体中最高的  $N_e$  敏感, 与等离子体模型的选择无关, 是电子密度诊断方法中最精密和有效的方法之一。

本文以中 Z 的 Al 为样品靶, 在星光 II 强激光装置上以点聚焦打靶情况下, 采用上述的类 H 离子线谱的翼部 Stark 展宽测量电子密度的方法, 探索了对传导区电子密度诊断的技术, 为下一步弄清激光烧蚀驱动能量输运过程中电子热传导的性质, 特别是反常热传导的机理研究打下基础。

## 1 实验布置

实验采用 Al 膜作为样品靶, 在星光强激光装置上, 三倍频激光( $\lambda=0.351 \mu\text{m}$ ) 辐照样品靶产生等离子体。实验测量布置如图 1 所示, 激光束与靶面法线成  $10^\circ$  夹角, 在靶前向侧面与靶面法线成  $70^\circ$  角处分别放置 20  $\mu\text{m}$  的狭缝、20  $\mu\text{m}$  的 Be 滤片、PET 平面晶体( $2d=0.8742 \text{ nm}$ ) 构成空间分辨的 X 光谱测量系统, 空间分辨率约 20  $\mu\text{m}$ , 谱分辨  $\lambda/\Delta\lambda \approx 800$ , 从侧向对等离子体进行观测, 采用成像板记录信号, 同时在靶前向采用针孔相机测激光焦斑。实验中激光聚焦打靶的实际参数, 能量 42.4 J, 脉宽约 700 ps, 激光焦斑约  $\phi 200 \mu\text{m}$ , 相应的靶面功率密度约  $1.51 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。

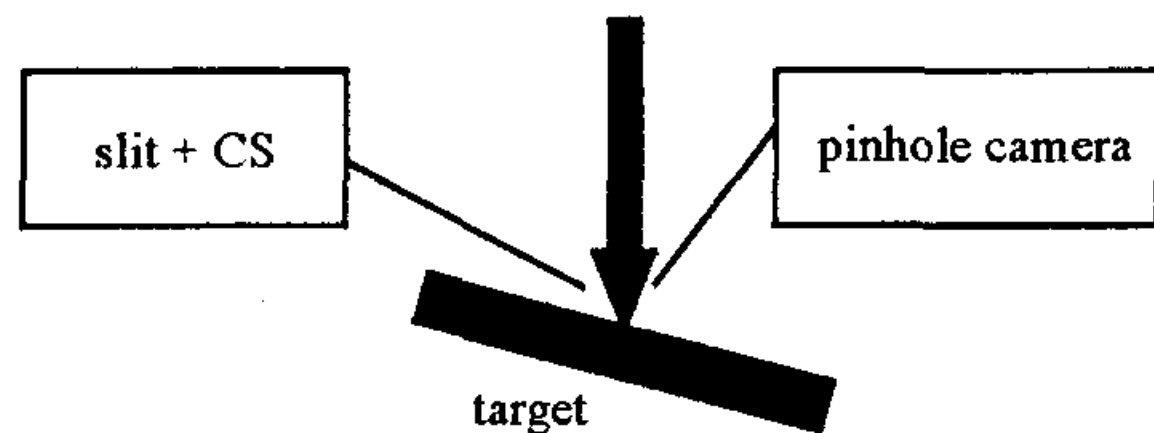


Fig. 1 Experimental arrangement for spectroscopy measurement

图 1 实验测量布置示意图

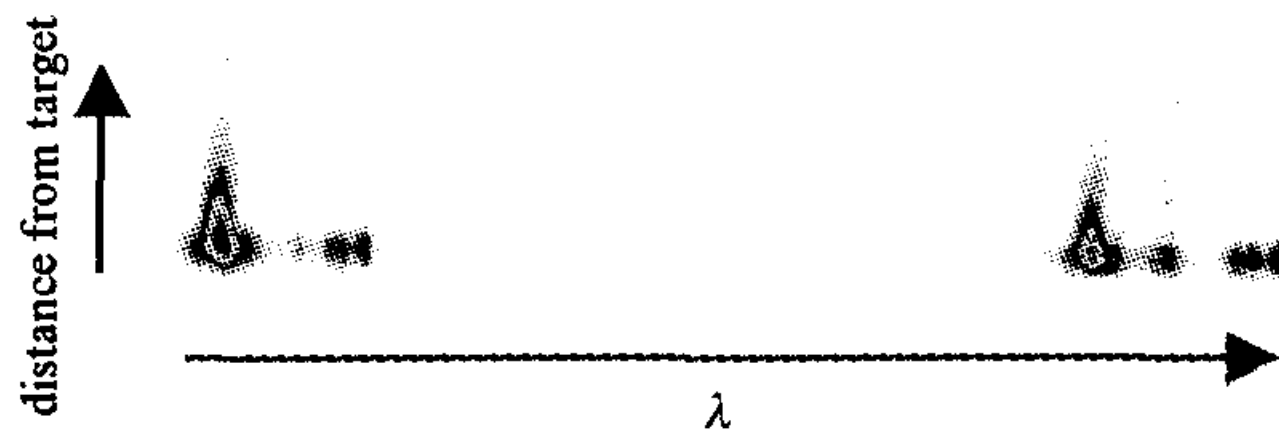


Fig. 2 Signal recorded by Imaging Plate

图 2 成像板记录的 Al 激光等离子体发射谱

## 2 实验结果

利用狭缝配晶体谱仪测量, 得到的激光辐照样品靶等离子体的发射谱线 X 射线成像板记录如图 2 所示。

\* 收稿日期: 2005-01-01; 修订日期: 2005-03-18

基金项目: 中国工程物理研究院国防重点实验室基金资助课题; 国家自然科学基金资助课题(10275056)

作者简介: 杨柏谦(1980—), 男, 硕士生, 主要从事强激光与物质相互作用理论研究; 上海 800-211 信箱; E-mail: bqyang@siom.ac.cn.

利用 WinView 软件处理,获得谱线黑度与位置的曲线关系(在我们所测 X 射线强度范围内,成像板对 X 光强度成线性响应关系),再根据晶体谱仪结构及布拉格方程编程计算处理,得到 Al 等离子体的 X 射线发射谱线结果,如图 3 所示。从图 3 可以容易地辨认出 Al 离子 He- $\alpha$ , Ly- $\alpha$  线及它们的伴线。

### 3 电子密度的空间轮廓

电子密度通过拟合类 H 离子 Ly- $\alpha$  线翼部 Stark 展宽获得<sup>[7]</sup>。类 H 离子共振线翼部的光性厚度薄,可避免辐射输运过程对测量结果的影响,并且该区域任意频率处的辐射强度只取决于该频率处离子微电场的几率分布( $\lambda_0$  为谱线中心波长),使得对翼部的线型分析只需考虑离子密度而与其它等离子体参数无关。

该方法的关键是构造出合适的翼部线型拟合函数。由文献[8]中的(7),(8)式,并计及  $\Delta\lambda = CE$ ,则有

$$D(\Delta\lambda) = C \frac{\Delta\lambda}{CE_0} W\left(\frac{\Delta\lambda}{CE_0}\right) \quad (1)$$

式中:  $C = N_n A_{n1} G(\Delta\lambda) h k / 4\pi$  可看作拟合待定常数;  $E_0$  为未考虑电子屏蔽效应的离子微电场;  $C$  是与  $Z$  有关的常数,其值由渐近 Holtsmark 系数给出<sup>[12]</sup>;  $W(\beta)$  为离子微电场强度的几率分布

$$W(\beta) = 3x^4 \exp\left\{-\frac{(Z-1)a'^2}{3x} \exp[-(1+Z_p)^{1/2} a'x]\right\} \left\{a' \left[2 + \frac{2}{ax} + a'x\right] \exp(-a'x)\right\}^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{x^2} [1 + a'x] \exp(-a'x) \quad (3)$$

式中:  $a'$  为屏蔽参数。再根据定义  $E_0 = Z_p e / r_p^2$ ,  $r_p = \left[\frac{1}{\frac{4}{3}\pi N_p}\right]^{1/3}$  及电荷守恒条件得

$$E_0 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)^{2/3} e \left(\sum Z_p^{3/2} N_p\right)^{2/3} \quad (4)$$

$$N_e = \sum Z_p N_p \quad (5)$$

令各离化态离子的密度  $N_p = \alpha_p N_e$ ,  $p$  表示不同的离化态,  $\alpha_p$  为离化态离子的密度系数,  $N_e$  为电子密度。

$$E_0 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)^{2/3} e \left(\sum Z_p^{3/2} \alpha_p\right)^{2/3} N_e^{2/3} \quad (6)$$

$$\sum Z_p \alpha_p = 1 \quad (7)$$

然后,由等离子体的离化态分布结合(6)、(7)式求得电子密度与离子微电场的关系。进而依据(1)式,同时利用(2)、(3)式,借助非线性最小二乘法通过和实验获得的谱线轮廓翼部轮廓的拟合,获得电子密度  $N_e$ 。

我们就上面的推导为依据,利用自己编写的 FITD 程序,对实验获得的图 4 中 Al X III Ly- $\alpha$  线的翼部展宽进行数据处理,求得 Al 激光等离子体电子密度的空间分布,如图 5 所示。所得结果与文献[6]中利用 MEDUSA 模拟和 FLY 程序计算得到的轮廓大致吻合。

在数据处理中,误差主要来自以下方面:拟合区间两端的选取、噪声对谱线翼部的影响,及对谱线中心波长的标定<sup>[9]</sup>。为减少噪声的影响,拟合前则对谱线采取平滑处理。对拟合区间两端的选取,由于谱线中心附近主要受电子加宽机制的影响,在选取靠近谱线中心一端时,使偏离谱线中心为零级 Stark 展宽宽度(FWHM)的 1~2 倍<sup>[5]</sup>,则拟合区间内谱线的加宽机制就主要受离子电场的影响;同时,随着靠近靶面附近,选取的拟合区间远端应距中心波长远一些,以保证空间分辨谱中每条曲线的拟合在理论上有一致的误差,估计对拟合区间两端的选取引起的误差约 20%。最后,还得考虑在对谱线中心波长定标时可能引起的误差,通过把共振线 2p-1s 的半高半宽度作为不确定性加入到拟合区间中,我们得到了电子密度沿靶面分布的最可几点和取值范围,保证了数据处理的可靠性(如图 5(b)所示)。

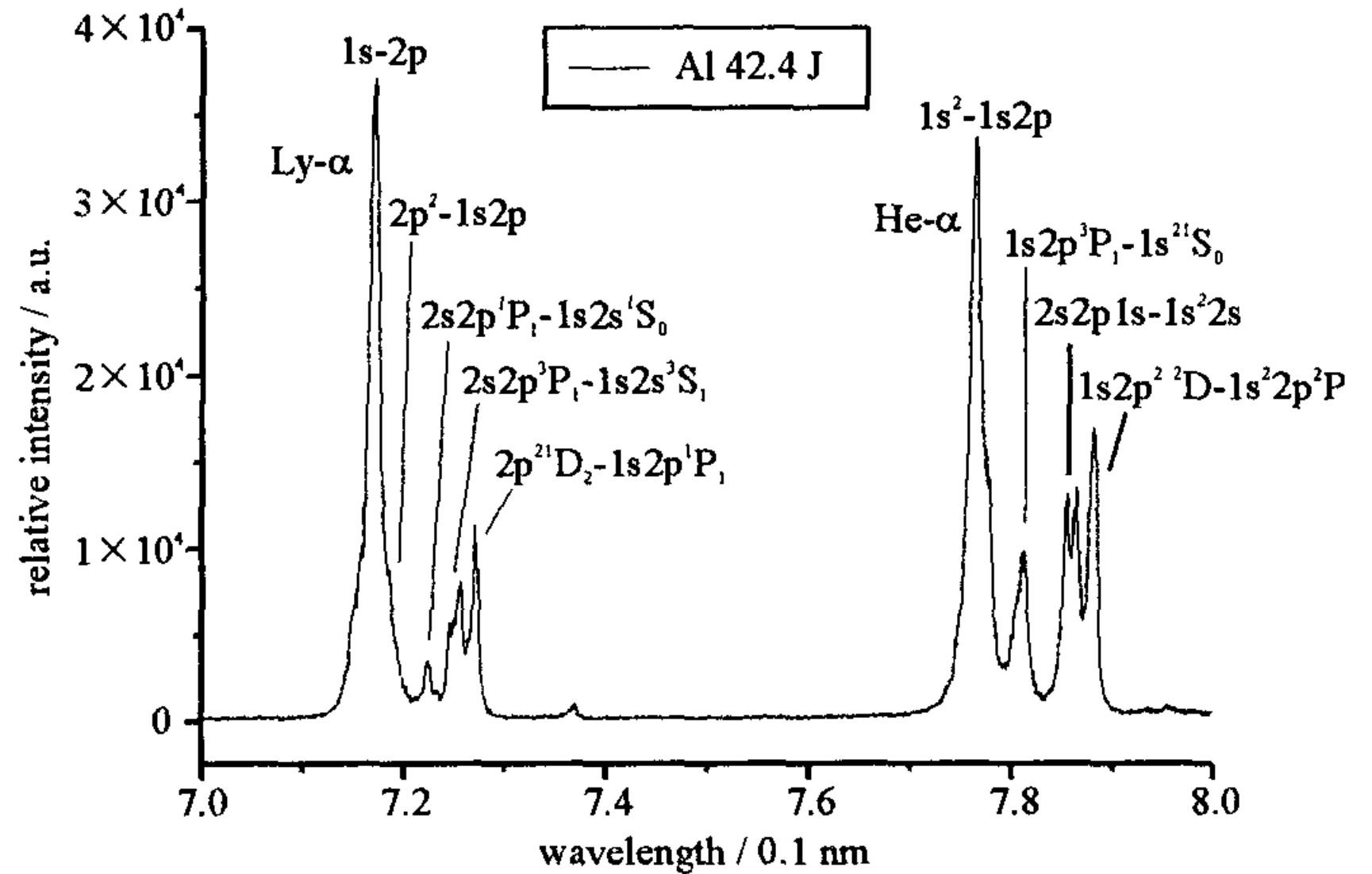


Fig. 3 Spectra emitted from laser-produced aluminum plasma

图 3 Al 激光等离子体发射谱测量结果

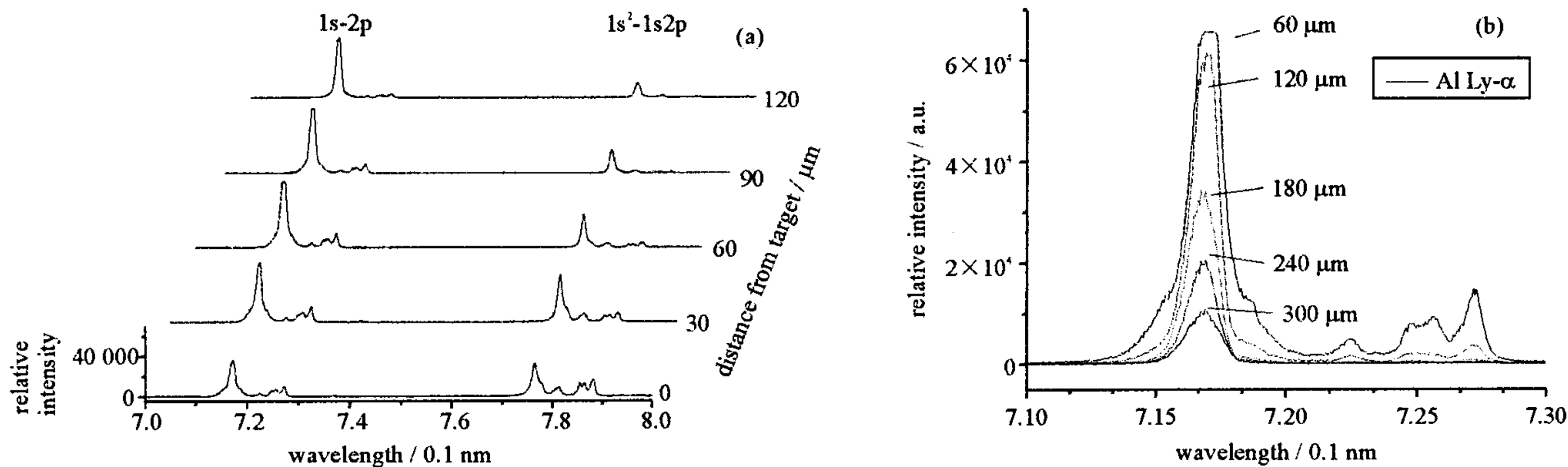


Fig. 4 Spectra emitted by different position along the target normal(a) and profiles of the spectral lines Al Ly-α recorded at distances 30~300 μm(b)

图 4 距靶面不同位置处的 Al 激光等离子体光谱(a)和 Ly-α 线(b)

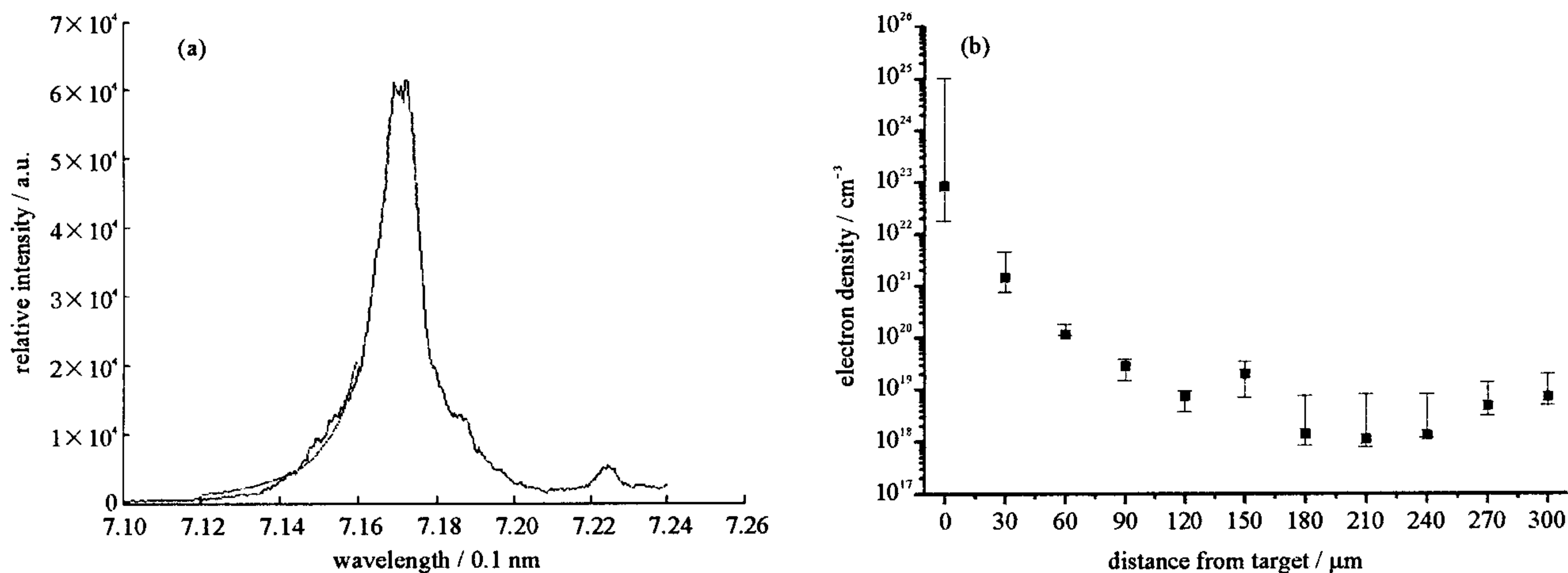


Fig. 5 Line wings of Al Ly-α and its fitting curves(a) and electron density profile perpendicular to the target surface(b)

图 5 Al 的 Ly-α 线的翼部及其拟合曲线(a)和 Al 激光等离子体电子密度的靶面法向空间分布(b)

另外, 还得计及诊断中测量仪器的误差, 包括晶体衍射和胶片记录响应引入的不确定性, 初步估计这部分因素的不确定度约为 12%<sup>[13]</sup>。由上述误差可以看出, 我们还需要更精密的数据处理手段, 以便更准确地得到等离子体的参数信息。

#### 4 结 论

采用 20 μm 的狭缝配平面晶体谱仪构成空间分辨光谱测量系统, 对 Al 激光等离子体的 K 壳层发射谱进行了测量。并通过对翼部 Stark 展宽效应的分析, 借助非线性最小二乘法, 用 Al 离子的 Ly-α 线翼部理论轮廓拟合实验获得的数据, 得到 Al 激光等离子体电子密度的空间轮廓。最后, 对利用该诊断技术得到的电子密度进行了误差估计。下一步将采用新设计的晶体谱仪(分辨小于等于 0.001 nm)配门控分幅相机构成时空分辨的记录系统进行测量, 同时开展更为准确的强耦合等离子体线谱翼部 Stark 展宽的理论计算工作, 对激光等离子体电子热传导区的性质进行更加可靠的研究。

致 谢: 作者对实验期间星光激光装置运行组给予的配合及聚变研究中心辐射不透明度研究组人员给予的帮助, 一并表示感谢。

#### 参考文献:

[1] Boiko V A, Pikuz S A, Faenoy A Ya. The determination of laser plasma electron density by K spectra of multicharged ions[J]. *J Phys B: Atom Molec Phys*, 1979, 12(11):1889—1909.

[2] Aglitskii E V, Boiko V A, Vinogradov A V, et al. Diagnostic of dense laser plasmas based on the spectra of hydrogen-like and helium-like multiply charged ions[J]. *Sov J Quant Electron*, 1974, 4(3):322—328.

[3] Ilyukhin A A, Kramida A E, Peregudov G V, et al. On the question of measurements of the plasma electron density from relative intensities of resonance and intercombination lines of helium-like ions[J]. *Sov J Quant Electron*, 1981, 11(1):34—39.

[4] Dalta R U, Griem H R. Electron density measurement using the Stark profiles of Al lines[J]. *Phys Fluids*, 1979, 22(7):1415—1416.

- [5] De Michelis C, Mattioli M. Soft-X-ray spectroscopic diagnostics of laboratory plasmas[J]. *Nuclear Fusion*, 1981, **21**(6):677—754.
- [6] Chambers D M, Pinto P A, Hawreliak J, et al. K-shell spectroscopy of an independently diagnosed uniaxially expanding laser-produced aluminum plasma[J]. *Phys Rev E*, 2002, **66**(2), 026410.
- [7] Renner O, Limpouch J, Krousky E, et al. Spectroscopic characterization of plasma densities of laser-irradiated Al foils[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2003, **81**:385—394.
- [8] Smith C C, Peacock N J. Electron density measurements using the Stark-broadened line wings of hydrogenic ions in laser-produced plasmas [J]. *J Phys B*, 1978, **11**(15):2749—2763.
- [9] Zhang L Q, Han S S, Xu Z Z, et al. Space-resolved electron density and temperature measurements of line-shaped laser plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1995, **51**(6):6059—6062.
- [10] Han S S, Zhang L Q, Xu Z Z, et al. An experimental study on the conduction region of nonlocalized absorption laser plasmas[J]. *Phys Lett A*, 1996, **214**:180—183.
- [11] Gregori G, Glenzer S H, Knight J, et al. Effect of nonlocal transport on heat-wave propagation[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(20), 205006.
- [12] Griem H R. Spectral line broadening by plasma[M]. New York: Academic Press, 1974. 313.
- [13] Gilfrich J V, Brown D B, Burkhalter P G. Integral reflection coefficient of X-ray spectrometer crystals[J]. *Applied Spectroscopy*, 1975, **29**(4), 322—326.

## Space-resolved diagnosis for the electron density of laser-produced aluminum plasma

YANG Bo-qian<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-yan<sup>2</sup>, HAN Shen-sheng<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-jian<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China Academy of Sciences,

P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The K-shell emission lines of laser-produced aluminum plasma were measured by the space-resolved spectrometer, which was constructed by a flat crystal spectrometer with a 20  $\mu\text{m}$ -wide slit. The electron density profile beyond the critical density is obtained by fitting the Stark-broadened line wings of hydrogenic ions, then the diagnostics on high electron density has been developed tentatively.

**Key words:** Laser-produced plasma; Stark-broadened wings; Electron density; X-ray spectroscopy