

# 用共振线强度比作激光等离子体诊断

沈百飞<sup>a</sup> 张 杰<sup>b</sup> 韩申生<sup>a</sup> 张正泉<sup>a</sup> 徐至展<sup>a</sup>

(a. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(b. Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0XQ, UK)

**摘 要** 用流体和原子物理模型, 计算了类 Li、类 Be 离子共振线强度比随功率密度的变化, 并讨论了共振线强度比和实现复合机制 X 射线激光所需的初始条件之间的联系。同时共振线强度比还可用于激光等离子体的诊断。

**关键词** X 射线激光, 激光等离子体诊断, 共振线强度比。

作者之一<sup>[1]</sup>曾经针对类氢机制, 用类 H 离子和类 He 离子共振线强度比的方法, 诊断复合机制 X 射线激光所需的泵浦功率, 并研究了和增益系数的关系。本文则采用类似的方法, 针对类 Li 机制, 进行了有关研究。

## 1 数值模拟

在激光加热期间和膨胀冷却的早期, X 光辐射主要为共振谱。由于电子密度很高, 可以认为高激发态和高阶离子基态到 Saha-Boltzmann 平衡, 从而从共振线强度可直接得到高阶离子丰度的信息, 例如, 类 Li 离子  $1s^2 4d - 1s^2 2p$  跃迁的线强度可写为

$$I^{Li} = h\nu^{Li} A^{Li} \left( \frac{g_{He}^{Li}}{g_{He}^{He}} \right) \cdot N_e N_{He}^{He} \left( \frac{h^2}{2\pi m_e K T_e} \right)^{3/2} \cdot \exp \left( \frac{x_4^{He}}{K T_e} \right)$$

其中,  $g_{He}^{Li}$  和  $g_{He}^{He}$  分别为类 Li 离子  $1s^2 4d$  能级和类 He 离子基态的统计权重。  $x_4^{He}$  为类 Li 离子  $1s^2 4d$  能级的电离能,  $N_e$ ,  $N_{He}^{He}$ ,  $K T_e$  分别为电子密度, 类 He 基态离子密度, 电子温度,  $h\nu^{Li}$ ,  $A^{Li}$  分别为类 Li 离子  $1s^2 4d - 1s^2 2p$  跃迁的跃迁能量和跃迁几率。从中可以看出, 线强度和高阶离子基态丰度有着直接的联系。类似地, 还可以得到类 Be 离子  $(2s^2 2p_{3/2})_1 - (2p_{3/2} 4p_{3/2})_2$  跃迁共振线强度和类 Li 离子基态丰度的关系, 根据这两条共振线的强度比, 就可以得到等离子体中电离态分布的信息, 这里选用这两条共振线是基于下面的考虑: 1) 没有选用 3-2 跃迁, 而用 4-2 跃迁是因为 3-2 跃迁光厚比较严重, 而用 4-2 跃迁则可避开这一问题; 2) 这两条谱线振子强度都比较大, 也即谱线比较强; 3) 这两条线能比较容易和其他谱线分开, 并且这两条线之间间隔较近, 从而有利于实验测量。

本文利用耦合进原子动力学过程的 CASTOR2 程序<sup>[2]</sup>进行计算, 程序可以计算等离子体参数, 如电子温度、电子密度和电离态丰度随时间、空间的变化, 也可计算类 Li, 类 Be 离子

共振线强度的时空变化, 还可以得到共振线强度的时间、空间积分值。

## 2 结 果

计算是针对 20 ps 泵浦激光进行的, 波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 靶的形状为平板靶, 靶上的激光功率密度在  $3 \times 10^{12} \sim 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  之间变化, 靶材料为 Al。在计算中取

$$\bar{I}(t) = \int_0^{\infty} I(t, x) dx$$

得到线强度的空间积分, 同时取

$$\bar{I}(t) = \int_0^t \bar{I}(t) dt$$

可以得到时间累积线强度随时间的变化。

图 1 为泵浦激光功率密度为  $9 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时, 类 Li 离子  $4d - 2p$  跃迁  $\bar{I}^{\text{Li}}(t)$  随时间的变化, 一段时间后, 随着时间的增大, 线强度不再继续增大, 表明此时该共振线已停止发射。图 2 为类 Li 离子  $4d - 2p$  跃迁线强度  $\bar{I}^{\text{Li}}(t)$  和类 Be 离子  $(2s2p_{3/2})_1 - (2p_{3/2}4p_{3/2})_2$  跃迁线强  $\bar{I}^{\text{Be}}(t)$  的比值随时间的变化, 可以看到线强先迅速达到一个最大值, 然后开始变小, 表明此时类 Li 离子基态丰度变大, 从而导致类 Be 离子共振线发射增强。最后线强比达到一个稳态值, 表明此时两条共振线都不再发射。

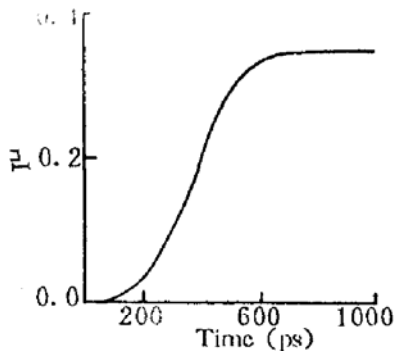


Fig. 1 Time-integrated intensity of Li-like Al ions as a function of time at laser intensity  $9 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$

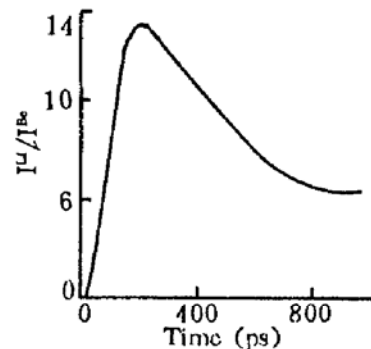


Fig. 2 Ratio of time-integrated intensity of transition  $4d - 2p$  of Li-like Al ions and  $(2s2p_{3/2})_1 - (2p_{3/2}4p_{3/2})_2$  of Be-like ions as a function of time at  $9 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$

通过大量计算, 还可以得到共振线强度比和吸收能量之间的关系, 这里的共振线强度为对所有空间、时间的积分值, 结果如图 3 所示, 在功率密度较低时, 随着功率密度变大, 共振线强度比迅速变大, 这是由于类 He 离子初始丰度的迅速变大造成的, 在功率密度较大时, 由于类 He 离子是满壳层结构, 电离能较大, 不易继续电离, 因此类 He 离子丰度不再有多大变化, 从而也导致共振线强度比的变化较为平坦。从而看到了共振线强度比随功率密度的变化, 反过来, 由图 3 还可以知道, 只要由实验测到了共振线强度比, 就可推知靶吸收的能量, 并可以推知在这种情况下, 等离子体参数的时间演化过程。比如实验测得共振线强度比为 5.91, 由

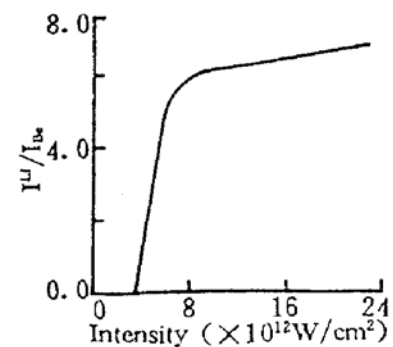


Fig. 3 Ratio of integrated intensity of transition  $4d - 2p$  of Li-like Al ions and  $(2s2p_{3/2})_1 - (2p_{3/2}4p_{3/2})_2$  of Be-like Al ions as a function of laser intensity

图 3 可以推知靶吸收能量为  $7.35 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ , 从而由 CASTOR2 计算得到等离子体参数的时空变化, 其结果: 图 4 为电子温度的时空变化, 图 5 为离子密度的时空变化。利用这些数据甚至还可以进一步计算类 Li 离子激光增益系数的时空变化。图 4 中电子温度在远靶面处有些不光滑, 这是由于等离子体还没有流到那里, 故容易引起一定的数值误差。

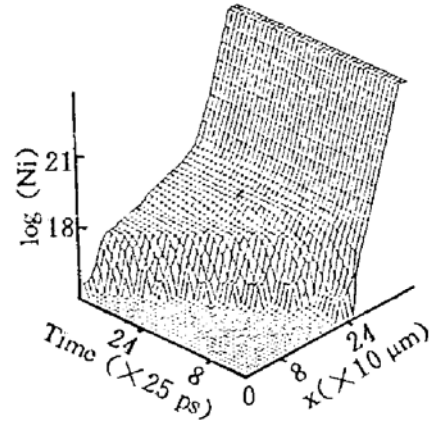
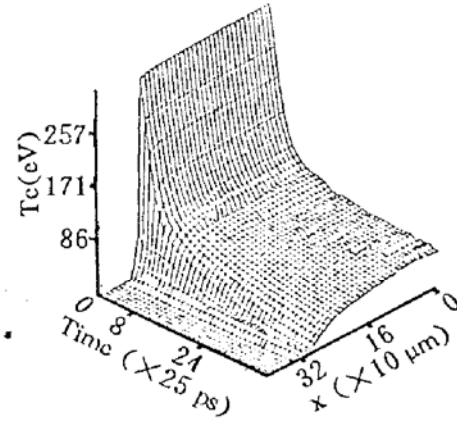


Fig. 4 Electron temperature as a function of space and time

Fig. 5 Ion density as a function of space and time

**结 论** 本文研究了类 Li, 类 Be 离子共振线的发射性质以及和泵浦激光功率密度, 激光等离子体参数的关系。表明类 Li, 类 Be 共振线强度比可以用作 X 射线激光实验中等离子体参数的诊断。

### 参 考 文 献

- [1] J. Zhang, M. H. Key, P. Norreys *et al.*, Intensity ratio of resonance lines as a diagnostic of initial conditions suitable for XUV laser action in recombining plasmas. *Opt. Commun.*, 1993, **95**(1): 51~54
- [2] J. P. Christasen, N. K. Winsor, CASTOR2; a two dimensional laser target code. *Comput. Phys. Commun.*, 1979, **17**(2): 397~412

## Diagnoses of Laser-Produced Plasma with Intensity ratio of Resonance Lines

Shen Baifei<sup>a</sup>    Zhang Jie<sup>b</sup>    Han Shensheng<sup>a</sup>  
Zhang Zhengqua<sup>a</sup>    Xu Zhizhan<sup>a</sup>

(a. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(b. Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX1 0XQ, UK)

(Received 1994; revised 1994)

**Abstract** The pumping intensity varying ration of intensities of resonance lines of Li-like and Be-like ions in laser irradiated slab target is calculated by using hydrodynamic and atomic codes. Correspondence between the ratio and requirement for gain of Li-like ions is analysed. A useful diagnostic method is also proposed for laser-produced plasma using the intensity ratios.

**Key words** plasma diagnoses, X-ray laser, Li-like ions.