

Al 等离子体类锂伴线的布居机制分析及实验应用*

于新明¹⁾²⁾ 程书博¹⁾ 易有根^{1)†} 张继彦²⁾ 蒲昱东²⁾ 赵阳²⁾
胡峰²⁾ 杨家敏²⁾ 郑志坚²⁾

1)(中南大学物理科学与技术学院,长沙 410083)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)

(2010年10月17日收到;2011年3月24日收到修改稿)

基于 K 壳层稳态碰撞辐射模型的程序,详细分析 Al 等离子体类锂伴线的主要布居机制,分别给出 $1s2p^2P-1s^22p^2P, 1s2s2p(^1S)^2P-1s^22s^2S$ 与 $1s2p^2D-1s^22p^2P$ 这两组类锂伴线的线强比随电子温度和密度的变化趋势. 研究发现,这两组伴线线强比对电子密度敏感而对电子温度不敏感,可以将它们用于高温高密度等离子体的密度诊断. 同时,给出了类氦的互组合线与共振线的线强比随电子密度的变化情况. 计算结果表明,在高密度下互组合线的线强由于受到周边的不可分辨的类锂伴线线强的影响,线强比会出现明显的偏大. 最后给出了“神光-II”装置上获得的 Al 平面靶激光等离子体发射谱和理论模拟谱,并给出了相应的电子温度和密度.

关键词: 碰撞辐射模型, 类锂伴线, 线强比, 激光等离子体

PACS: 52. 25. Dg, 52. 50. Jm, 52. 70. - m

1. 引言

随着激光器件的发展,实验室通过超短超强激光脉冲辐照固体 Al 平面靶可以获得高温高密度的等离子体^[1-3]. 这一状态的等离子体存在于磁约束聚变、惯性约束聚变之中,并且受到了广泛的关注. 因此,研究这一状态的等离子体有着非常重要的意义. 发射光谱作为一种诊断等离子体技术,因其所用仪器相对简单,采用非接触测量,并具备灵敏度高、响应速度快等特点,被应用于各种等离子体性质的研究和参数的诊断之中^[4,5]. K 壳层发射谱由于谱线相对简单易于分辨而被广泛用于诊断实验室产生的激光等离子体的温度和密度等状态信息^[6,7]. 对于高密度等离子体区域的温度密度诊断,可以将低 Z 材料掺杂到高密度样品的方法,然后通过分析低 Z 材料的 K 壳层发射谱强度从而诊断出温度和密度的信息,该方法在惯性约束聚变的内爆实验诊断靶丸芯区温度中得到应用. 利用共振线线强比诊断等离子体温度密度的方法在激光等离子体的实验诊断中得到了广泛应用,由于共振线的光学厚较大,因而该方法在高密度下需要运用逃逸因子

来修正诊断值^[8],增加了诊断的不确定度. 因为伴线在高密度下光学厚很小,因此,利用伴线线强比诊断电子温度和电子密度的方法可以用于由超短超强激光产生的高密度等离子体的电子温度和电子密度的诊断. 本文以“神光-II”实验装置的 Al 等离子体发射光谱诊断为研究背景,建立了 K 壳层稳态碰撞辐射模型的程序. 在该模型中详细讨论了类锂伴线的布居机制以及这些伴线的密度效应,发现它们的比值是温度不敏感而密度敏感,可以应用于等离子体的密度诊断. 而对于我们熟悉的互组合(IC)线与共振线的线强比诊断密度方法,在电子数密度超过 10^{21} cm^{-3} 的区域会因为 IC 线周围混合着不能分辨的类锂伴线的影响而产生较大的诊断误差. 最后通过全谱拟合的方法给出了“神光-II”装置上产生的 Al 等离子体的温度和密度.

2. 碰撞辐射模型的数值模拟

碰撞辐射模型不同于局域热动平衡模型,为了得到各离化态各能级的布居数,需要系统地求解下列速率方程:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j W_{ji} N_j - \sum_i W_{ij} N_i, \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(批准号:10874156,10875109)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yougenyi@mail.csu.edu.cn

其中 $N_{i(j)}$ 表示第 $i(j)$ 能级的离子布居数, $W_{j(i)}$ 表示第 $j(i)$ 个能级到第 $i(j)$ 个能级的总速率系数, 这些速率系数是等离子体中电子温度和电子密度的函数. 本文中我们只考虑稳态的情况, 因此等离子体中的电子温度和电子密度是不随时间变化的. 令 (1) 式等号左边随时间的变化项为零, 通过自洽求解速率方程 (1) 就可以获得各个能级的布居数.

2.1. 原子能级

为了准确获得密度对于类锂伴线的影响, 考虑了 K 壳层的细致能级结构. 在所研究的温度和密度下, 绝大多数的离子均处于较高的激发态. 对于低离化态的类铝到类铍离子, 只考虑 1 个能级 (基态); 而对于类锂离子, 除考虑了基态外, 加上 $1s^2 2l, 1s^2 3l, 1s^2 4l, 1s 2l 2l'$ 的所有角动量 J 可分辨的能级共 33 个; 对于类氦离子, 考虑了基态和 $1s 2l, 1s 3l, 1s 4l, 2l 2l'$ 所有角动量 J 可分辨的能级共 28 个; 对于类氢离子, 有基态和主量子数从 1 到 4 的所有角动量 J 可分辨的能级 14 个. 这里 l 为轨道量子数, J 为能级总角动量量子数. 以上所考虑的能级的能量都通过 COWAN 原子结构程序^[9] 计算获得.

2.2. 原子过程

在求解速率方程中, 考虑了自发辐射、碰撞激发与退激发、碰撞离化与三体复合、辐射复合以及电子俘获和自电离这些原子过程. 对于光子参与的光离化和光激发过程暂时不予考虑, 这是因为在激光辐照平面靶实验中, 由于样品非常薄, 因此可以近似认为是光学薄的. 对于所有 Z 离化态的基态与单激发态都与其 $Z+1$ 离化态的基态通过碰撞离化与三体复合、辐射复合相耦合; 所有 Z 离化态的各能级之间通过碰撞激发与退激发及自发辐射相耦合; 类氦 (类锂) 离子的双激发态和类氢 (类氦) 离子的基态通过自电离与电子俘获相耦合. 碰撞离化系数通过经验公式计算给出^[10]; 三体复合速率系数通过与碰撞离化系数之间的细致平衡原则得出; 辐射复合系数由文献^[11] 给出; 碰撞激发速率系数通过 FAC 程序计算得到^[12]; 退激发速率系数通过与碰撞激发系数之间的细致平衡原则获取; 自发辐射速率系数通过 COWAN 程序计算得出^[9]; 自电离速率系数取自于文献^[13] 的计算结果; 电子俘获速率系数通过与自电离速率系数的细致平衡原则计算得出. 在本文中, 我们考虑了双激发态之间的碰撞激发和

退激发对于双激发态布居数的影响, 这些速率系数通过文献^[14] 给出.

2.3. 类锂双电子伴线

本文中, 用 T_e 表示电子温度, N_e 表示电子密度, R 表示谱线的线强比, E 表示光子能量, I 表示谱线强度. 模拟得出电子温度为 300 eV, 电子密度为 10^{20} cm^{-3} , Al 等离子体类锂离子的双电子伴线分布如图 1 所示, 图中的标识采用 Gabriel 等^[15] 给出的符号.

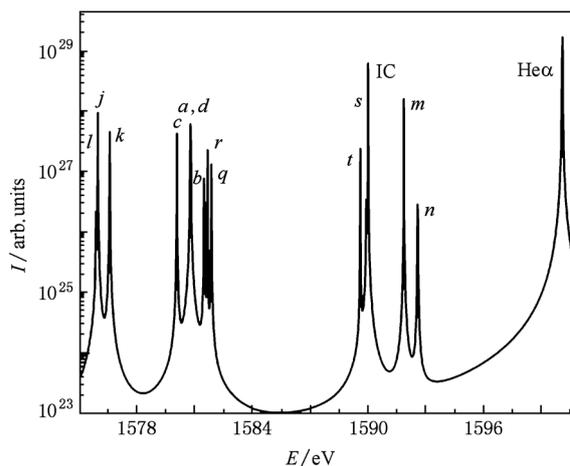


图 1 Al 类锂离子伴线分布

从图 1 可以看出, 在类氦共振线 ($\text{He}\alpha$) 的长波区分布着 IC 线以及 $s-t-m-n$ 伴线组、 $q-r$ 伴线组、 $a-b-c-d$ 伴线组和 $j-k-l$ 伴线组. 由于伴线之间很小的波长差和测量仪器分辨率的原因, 实验室测量将无法分辨出各伴线. 在该模型中谱线线型是采用多种展宽机制都考虑在内的 Voigt 线型. 实验室测量不可分辨谱线组的强度是对时间和空间积分而获得, 因此理论计算谱线组的强度可以通过线性累加每条谱线的强度而得到. 从图 1 中还可以看出, 在 IC 线的周围分布着 $s-t-m-n$ 伴线组, 这些伴线的线强在高密度下会变得不可忽略, 从而影响用 IC 线与共振线线强比来诊断电子密度的结果.

2.4. 模拟结果及分析

图 2 中给出 300 eV 温度下, Al 类锂离子 $a-b-c-d, j-k-l$ 伴线组电子随密度的变化情况, 为了考察这些伴线的布居机制, 给出了不同原子过程对于这些伴线组线强的影响.

由于 $j-k-l$ 伴线组拥有很大的双电子俘获速率, 因此 $j-k-l$ 伴线组的主要布居机制为双电子俘获过

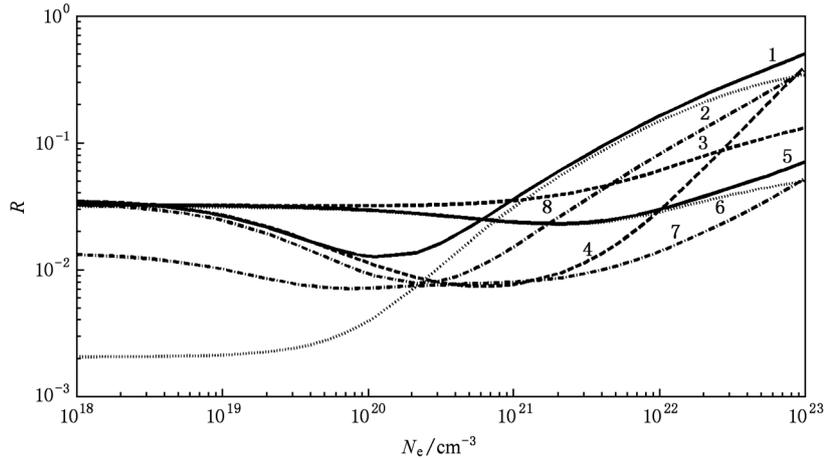


图2 在温度为 300 eV 时, $j-k-l$ 伴线组、 $a-b-c-d$ 伴线组线强(采用类氦共振线强度进行归一化)随电子密度的变化情况. 实线是考虑全部的原子过程, 点线是忽略内壳层电子碰撞, 短划线是忽略双激发态之间的电子碰撞, 点划线是忽略双电子复合过程

程, 如图 2 中标记为 5 的实线与标记为 7 的点划线. 而内壳层激发过程对于它的布居影响很小, 如标记为 5 的实线与标记为 6 的点线. 当电子密度在 10^{21} cm^{-3} 以上时, 双激发态之间的碰撞激发过程对于它的布居有较大的影响, 如图 2 中标记为 5 的实线和标记为 8 的短划线. 这主要是因为在高密度下双激发态之间的碰撞过程变得不可忽略, 致使在低能级的 $j-k-l$ 伴线组能级布居数被激发到高能级上, 使得 $j-k-l$ 能级布居数变小从而影响伴线强度. 从图 2 还可以看出: 不同于 $j-k-l$ 伴线组的布居机制, 由于 $a-b-c-d$ 伴线组很小的双电子俘获速率, $a-b-c-d$ 伴线组的布居机制在电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下时, 主要是通过内壳层碰撞激发布居, 如标记为 1 的实线与标记为 2 的点线. 在该密度下双激发态的碰撞激发与双电子俘获过程都不是很重要, 如标记为 1 的实线与标记为 3 的点划线、标记为 4 的短划线. 随着密度增加, 发现内壳层激发过程已经变得不是很重要, 如图中标记为 1 的实线与标记为 2 的点线. 此时布居机制转变为双激发态之间的碰撞激发过程, 如标记为 1 实线与标记为 4 的短划线. $q-r$ 伴线组以及 $m-n$ 伴线组的布居机制与 $a-b-c-d$ 伴线组布居机制是一致的.

Jacobs 等^[14]指出, 这些拥有很小双电子俘获系数的伴线组可以用于诊断电子的密度. 因此, 本文给出了图 3 所示 $a-b-c-d$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比和图 4 所示 $q-r$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比随电子温度 T_e 和电子密度 N_e 的变化. 由此可以看出, 在低温度区域的情况, $a-b-c-d$ 伴线组、 $q-r$ 伴线组与

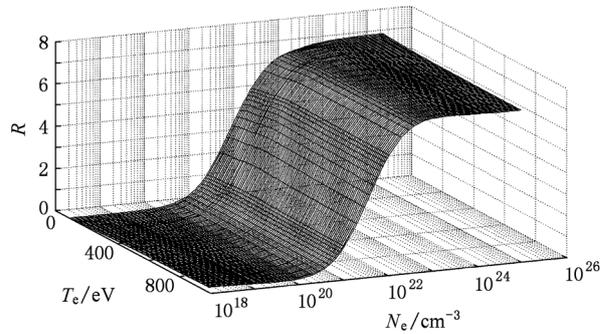


图3 $a-b-c-d$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比 R 随电子温度 T_e 和电子密度 N_e 的变化

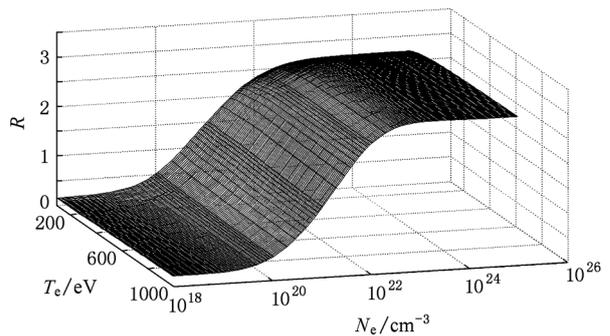


图4 $q-r$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比 R 随电子温度 T_e 和电子密度 N_e 的变化

$j-k-l$ 伴线组线强比会随着温度的增加而略有增加, 当达到较高温度的时候, 比值基本上不会再发生变化. 这是因为在低温区域情况下, 等离子体中占主导的离子应该是类锂离子, 而不是类氦离子. 根据

以上对各伴线布居机制的分析可以知道, $j-k-l$ 伴线组的主要布居机制为对类氦基态的电子俘获过程, 而 $a-b-c-d$ 伴线组、 $q-r$ 伴线组的主要布居机制是类锂离子的内壳层电子碰撞过程. 因此在低密度区域 $a-b-c-d$ 伴线组和 $q-r$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比随着温度的升高而变大. 当温度升高时, 离化平衡向高离化态移动, 此时类氦离子的基态数量会逐渐增多, 此时 $j-k-l$ 伴线组的强度变强, 比值会逐渐平稳, 因此会出现图 3 和图 4 中曲面上升的情况. 当电子密度为 $10^{21}—10^{24} \text{ cm}^{-3}$ 时, 线强比随着密度的增加而单调增加. 温度对于谱线线强比影响很小, 因此可以用此线强比诊断该区域的密度. 两个曲面在高密度和低密度下都趋向于一个极限值, 计算表明这些极限值对应于局域热动平衡模型与冕区模型的比值, 从而也证明了这个模型计算的正确性.

图 5 中给出了 IC 线与共振线线强比 R 随电子密度 N_e 的变化趋势. 我们发现, 低密度下 IC 线旁边的伴线对于线强的影响很小, 但是随着密度的增加, 伴线组对线强比的影响变得明显. Ilyukhin 等^[16] 首次发现这个影响并做了一些修正以保证诊断的正确性.

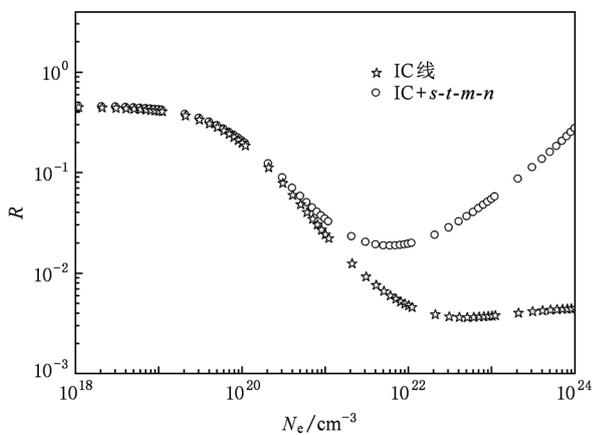


图 5 电子温度 $T_e = 300 \text{ eV}$ 时, IC 线与共振线线强比 R 随电子密度 N_e 的变化

从图 5 可以看出, 当用该方法诊断电子密度而忽略 IC 线周围伴线的贡献时, 诊断结果将会出现很严重的偏差. Duston 等^[17] 也给出了同样的变化趋势. 从图 1 可以看出, IC 线周围的伴线中最强的为 m 伴线, 因而 m 伴线对于图 5 中所示的 $IC + s-t-m-n$ 组合线的贡献也就最大, 而 m 伴线的布居机制是与 $a-b-c-d$ 伴线组的布居机制一样的, 因此在高密度下 m 伴线会因为双激发态之间的碰撞过程而变得很

强, 从而影响了诊断的结果.

3. 实验数据与诊断

实验中, 将“神光-II”装置的 8 路三倍频主激光 (每路激光波长为 351 nm , 能量为 260 J , 脉冲宽度为 10 ns) 注入到如图 6 所示的平面 Al 靶上产生高温高密度等离子体, 实验采用平面晶体谱仪加科学级电荷耦合器件进行记录, 记录面距离样品的光程约为 200 mm , 记录的 X 射线能量在 $1550—1610 \text{ eV}$ 之间. 测试所得结果如图 7 所示, 从图中可以清楚地分辨出类氦的共振线、IC 线以及类锂离子的伴线群.

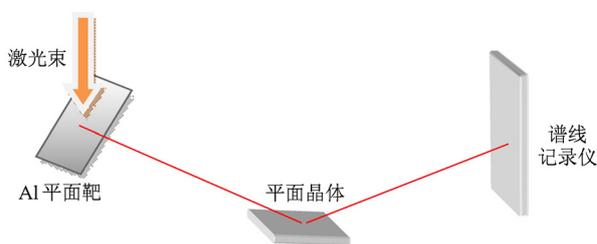


图 6 实验布局图

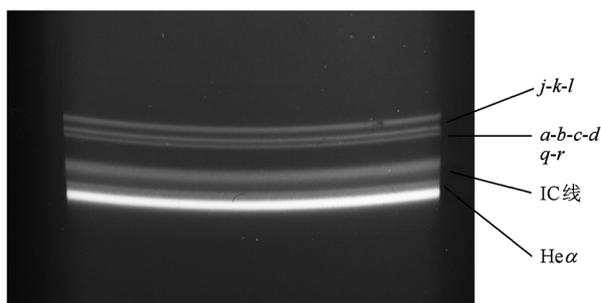


图 7 Al 等离子体的发射谱

图 8 中给出了实验谱线和模拟谱线, 图中伴线组

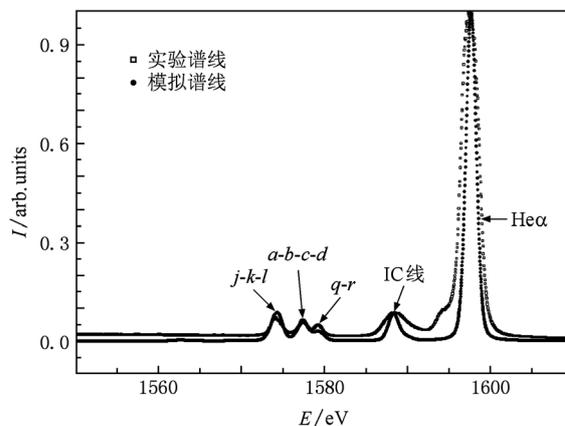


图 8 实验谱线和模拟谱线的分布

强度归一化于相应的共振线强度. 从图 8 可以看出, 两者在谱线强度方面拟合较好, 而实验产生的类氦共振线与 IC 线的展宽比模拟得到的谱线展宽要大, 这主要是因为我们的程序中没有考虑类锂高阶伴线 ($n \geq 3$) 的缘故. 通过设定等离子体的温度密度参数, 从而可以直接给出实验产生的激光等离子体的温度约为 300 eV, 电子密度约为 $6.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

4. 结 论

建立了 K 壳层的碰撞辐射模型的程序, 在该

模型程序的基础上分析了 Al 类锂离子伴线的密度效应, 并分别给出了 $a-b-c-d$ 伴线组、 $q-r$ 伴线组与 $j-k-l$ 伴线组线强比随温度密度的变化趋势. 研究发现, 这些线强比可以用于诊断高温高密度区域的电子密度. 同时也分析了一种常用的密度诊断法, 即 IC 线与共振线的线强比诊断密度法. 计算结果表明, 该方法在高密度区域会由于不可分辨的伴线影响而使诊断结果变得不可靠. 最后, 作为模型的实验应用模拟得出了“神光-II”实验装置的 Al 平面靶 K 壳层发射谱, 并直接给出了诊断的电子温度和电子密度.

- [1] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y, Yang G H, Yan J, Meng G W, Ding Y N, Wang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 985 (in Chinese) [张继彦、杨家敏、许 琰、杨国洪、颜 君、孟广为、丁耀南、汪 艳 2008 物理学报 **57** 985]
- [2] Saemann A, Eidmann K, Golovkin I E, Mancini R C, Andersson E, Forster E, Witte K 1998 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4843
- [3] Yang J M, Hu Z M, Zhang J Y, Zhu T, Zhao Y, Wen T S, Wang Z B, Ding Y K, Ding Y N, Wei M X, Yang G H, Zhang B H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 112704
- [4] Yang J M, Ding Y N, Chen B, Zheng Z J, Yang G H, Zhang B H, Wang Y M, Zhang W H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 411 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、陈 波、郑志坚、杨国洪、张保汉、王耀梅、张文海 2003 物理学报 **52** 411]
- [5] Jeffrey A K, Steven W H, Roberto C M 2004 *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Trans.* **88** 443
- [6] Kyrala G, Fulton R D, Whlin E K, Jones L A, Schappert G T, Cobble J A, Taylor A J 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2195
- [7] Mancini R C, Audebert P, Geindre J P, Rousse A, Fallies F, Gauthier J C, Mysyrowicz J P, Chambaret J P, Antonetti A 1994 *J. Phys. B* **27** 1671
- [8] Holstein T 1947 *Phys. Rev.* **72** 1212
- [9] Cowan R D 1967 *Phys. Rev.* **163** 54
- [10] Landshoff R K, Perez J D 1976 *Phys. Rev. E* **10** 1619
- [11] Kolb A C, McWhirter R W P 1964 *Phys. Fluids* **7** 519
- [12] Gu M F 2003 *Astrophys. J.* **582** 1241
- [13] Vainshtein L A, Safranov U I 1978 *At. Data Nucl. Data Tables* **21** 49
- [14] Jacobs V L, Blaha M 1980 *Phys. Rev. A* **21** 525
- [15] Gabriel A H, Bhalla C P, Presnyakov L P 1975 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **172** 359
- [16] Ilyukhin A A, Kramida A E, Peregodov G V, Chirkov V A 1981 *Sov. J. Quantum Electron.* **11** 34
- [17] Duston D, Rogerson J E, Davis J, Blaha M 1983 *Phys. Rev. A* **28** 2968

Analysis of formation mechanism of Li-like satellites in aluminum plasma and experimental application *

Yu Xin-Ming¹⁾²⁾ Cheng Shu-Bo¹⁾ Yi You-Gen^{1)†} Zhang Ji-Yan²⁾ Pu Yu-Dong²⁾
Zhao Yang²⁾ Hu Feng²⁾ Yang Jia-Min²⁾ Zheng Zhi-Jian²⁾

1) (School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

2) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 17 October 2010; revised manuscript received 24 March 2011)

Abstract

Base on the code of steady K -shell model for collision radiative balance, we analyze the main mechanism of populating the Li-like satellite of aluminum plasma in detail. The evolutions of the Li-like satellite intensity ratios of $1s2p^{22}P-1s^22p^2P$, $1s2s2p(^1S)^2P-1s^22s^2S$ and $1s2p^{22}D-1s^22p^2P$ with electron temperature and density are depicted from which we find that the intensity ratio is density sensitive and temperature insensitive, which can be used to diagnose the electron density in hot dense plasma. At the same time, the evolution of the intensity ratio of He-like to He-like resonant with electron density is also given. The value of the ratio is large in the high electron density region due to the influence of the undistinguished Li-like satellite around the He-like intercombination. Finally, we simulate the spectra emitting from the hot dense aluminum plasmas generated by the "Shengguang-II" equipment and give the electron temperature and density.

Keywords: collision radiative model, Li-like satellite, intensity ratio, laser plasma

PACS: 52. 25. Dg, 52. 50. Jm, 52. 70. - m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10874156, 10875109).

† Corresponding author. E-mail: yougenyi@mail.csu.edu.cn