

## 辐射输运实验中的 Al 等离子体发射光谱研究\*

蒲昱东<sup>†</sup> 杨家敏 靳奉涛 张璐 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009年12月17日收到; 2010年5月29日收到修改稿)

SGII 装置上用八路激光注入金腔产生高温辐射源, 然后利用该辐射源来加热输运腔中的掺 Al 泡沫样品. 从测量得到的 Al 类氦离子发射光谱可以观察到 a—d, qr 伴线的强度明显高于 jkl 伴线的强度, 由此可以确定出光子激发和电离过程对输运腔中等离子体的形成不可忽略. 除此之外, 还观察到较强的互组合线发射, 这表明存在一个低密度区域. 最后考虑到实验测量得到的 Al 类氦离子发射光谱是时间、空间积分, 利用两个状态等离子体的发射光谱合成再现了实验光谱.

**关键词:** 发射光谱, 辐射加热, 光谱诊断

**PACS:** 52.70.Kz, 52.40.Db

## 1. 引言

在惯性约束聚变和天体研究等领域, X 射线在等离子体中的输运现象受到广泛的关注. 在间接驱动惯性约束聚变研究中, 激光对称的注入黑腔转化成 X 射线, 这些 X 射线通过输运过程传输到腔壁上被吸收再辐射, 或是照射到靶丸上, 驱动靶丸内爆. X 射线在黑腔中的输运既影响 X 射线的转换份额, 又影响 X 射线的能谱结构. 而在天体物理研究中, 一般通过观察发射光谱来推断天体性质. 然而由于存在自吸收效应, 对来自星体深处的发射光谱而言, 必须用辐射输运理论进行分析.

随着激光技术的发展, 我们能够在实验室内创造出高温辐射源, 这使得我们能够从实验上研究辐射输运中的基本物理问题. 20 世纪 90 年代, 美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)在 NOVA 激光装置上, 通过 X 射线背光吸收光谱法测量了 Al, Fe, Ni, Ge 等中高 Z 材料的高温辐射不透明度数据. 国内则从 20 世纪 90 年代末期开始, 在星光 II 和在神光 II 激光装置上, 相继进行了一系列辐射输运实验, 研究了辐射输运的效率和超声速热波的传播问题<sup>[1,2]</sup>. 在所有的这些实验中, 辐射加热等离子体的温度、密度始终是我们感兴趣的问题之一, 是理论分析和

定量理解实验结果的重要参数. 张继彦、杨家敏等人<sup>[3,4]</sup>曾通过吸收谱来获得辐射加热等离子体电子温度, 而在我们的实验中, 则对利用发射谱来推断辐射加热等离子体电子温度的方法进行了尝试. 为此, 我们在 CH 泡沫材料中掺入 Al 元素, 测量 Al 类氦离子发射光谱. 与以往电子碰撞加热等离子体发射光谱不同, 在我们的实验中, 观察到 a—d qr 伴线的强度明显强于 jkl 伴线的强度, 这表明伴线的主要产生机理由双电子复合转变成光子激发内壳层电子, a—d qr 伴线的增强正好体现出辐射加热在等离子体发射光谱形成中的作用, 所以用碰撞辐射模型解释实验光谱时, 我们必须在模型中考虑光激发、受激辐射以及光电离等过程.

## 2. 实验安排

实验布置如图 1 所示, 神光 II 八路激光(每路激光能量 260 J, 脉宽 1 ns)注入金腔中产生高温辐射源, 利用该辐射源加热输运管中的掺 Al 泡沫样品. 输运管直径为 600  $\mu\text{m}$ , 长 600  $\mu\text{m}$ , 壁上沿输运腔轴方向开宽度为 300  $\mu\text{m}$  的两条正对的诊断狭缝. 输运管中填充了密度为  $(29.7 \pm 1.4) \text{ mg/cm}^3$  的 CH 泡沫, 掺杂原子比为 C: H: Al = 100: 200: 1.7. 利用软 X 射线能谱仪从激光注入口测量获得等效辐射温度的时间过程, 其峰值温度为 150 eV. 同时利

\* 等离子体物理国家重点实验室基金(批准号: 9140C6801020801)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: pyd02@mails.tsinghua.edu.cn

用晶体谱仪测量 Al 等离子体发射光谱. 晶体谱仪采用 TJ-III X 射线胶片进行记录, 然后通过黑密度计扫描谱图得到位置和黑密度谱图, 按识别的谱线进行谱线位置-波长转换, 利用记录胶片的标定结果进行黑密度-强度转换, 最后得到实验光谱结果, 如图 2 所示.

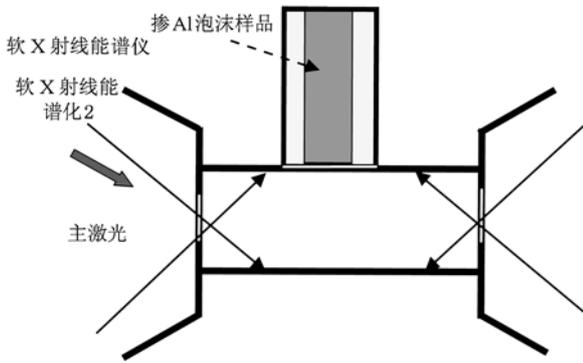


图1 实验排布示意图

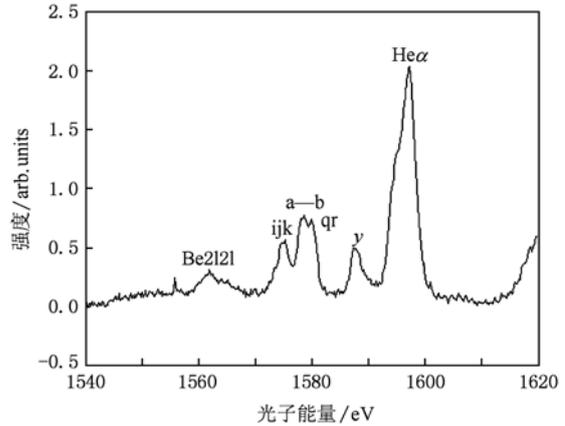


图2 实验观测到的 Al 等离子体发射光谱

### 3. 实验结果与讨论

根据实验结果, 采用文献[5]中的符号来代表谱线, 我们对谱线进行了辨认. 从实验测量得到的结果来看, 发射光谱具有以下几个明显的特征: 1) 类 Li 伴线发射较强, 并且 a—d ( $1s2p^2 \rightarrow 1s^2 2p^2: ^2P^0 - ^2P$ ), qr ( $1s2p2s \rightarrow 1s^2 2s: ^2P - (^1P)^2P^0$ ) 等伴线强度高于 jkl ( $1s2p^2 \rightarrow 1s^2 2p: ^2P^0 - ^2D$ ) 伴线; 2) 有明显的互组合线 ( $1s2p^3 P_1 \rightarrow 1s^2 ^1S_0$ ) 发射. 为了定量解释实验结果, 首先用 Multi-1D<sup>[6]</sup> 对辐射加热过程进行了模拟, 给出等离子体温度、密度的大致范围. 然

后根据此范围, 利用碰撞辐射模型<sup>[7]</sup>, 从理论上计算出发射光谱, 并与实验光谱相比较, 确定出辐射加热 CH 泡沫等离子体状态.

在用 Multi-1D 进行模拟计算时, 我们将软 X 射线能谱仪测量得到的等效辐射温度作为输入辐射源, 加在 CH 材料的一端, CH 材料的另一端采用自由面边界条件, 同时将不透明度参数划分为 20 群. 图 3 给出了 CH 材料的加源端 (front side), 自由端 (back side) 以及中部 (mid plane) 三处位置的电子温度和电子密度随时间的变化. 从计算结果可以看出, 电子温度在输运管内分布较为均匀, 在 100 eV 左右. 电子密度在加源端和自由端由于稀疏波向里传播而随时间下降. 电子密度在中部变化相对较小, 约为  $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  (相当于 CH 全电离). 此时等离子体处于非局域热动平衡 (NLTE) 状态. Salzmann 在文献[8]中曾指出当电子密度在  $1 \times 10^{21} - 1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$  范围内时, Al 等离子体处于冕区平衡和

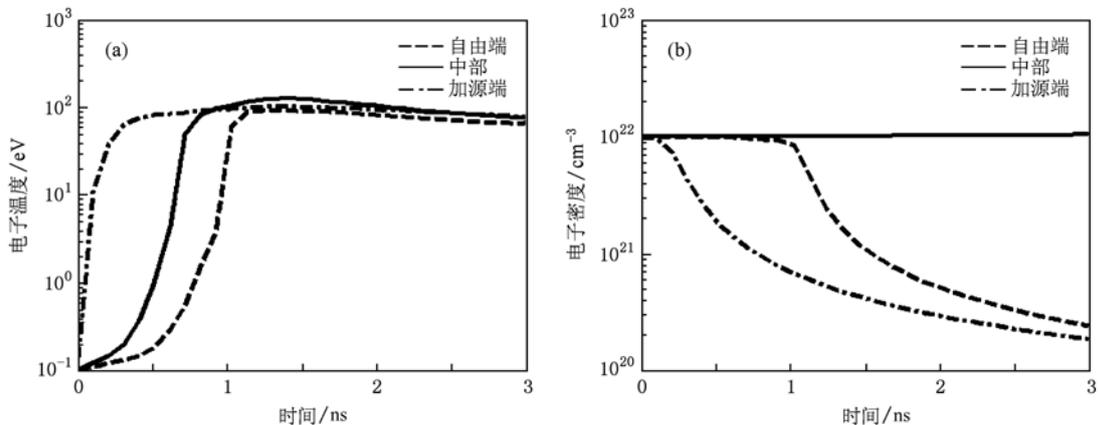


图3 通过模拟计算得到的 CH 材料加源端(front side)、自由端(back side)以及中部 (mid plane) 三处位置的电子温度 (a) 和电子密度 (b) 随时间的变化

LTE 之间的过渡区域. 在后面讨论 a—d, qr 伴线强度高于 jkl 伴线强度进行讨论时, 这一结论将帮助我们确定该光谱特征来源于等离子体的辐射加热特性.

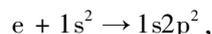
### 3.1. 伴线发射

在实验光谱中, 我们观察到 a—d, qr 伴线的强度高于 jkl 伴线的强度. 这样的结果对 LTE 等离子体而言是容易理解的. 因为我们知道处于 LTE 状态下, 各种碰撞的正逆过程到达精细平衡, 此时 Al 等离子体发射光谱中 a—d, qr 伴线强度高于 jkl 伴线的强度. 但是通过前面的分析, 输运管内的等离子体电子密度在  $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  以下, 处于 NLTE 状态. 所以伴线的强度特征不可能来源于 LTE 等离子体发射光谱的贡献, 而是来源于辐射场的作用.

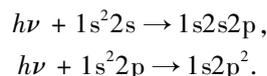
为此我们计算比较了存在辐射场和不存在辐射场条件下发射光谱的区别, 如图 4 所示. 从计算结果可以看出, 当不存在辐射场时, a—d, qr 伴线的强度低于 jkl 伴线的强度, 这一特征在冕区平衡或 NLTE 条件下普遍存在, 从许多其他实验测得的光谱中也可以观察到这一特点<sup>[9]</sup>. 然而, 当辐射场较强时 (辐射温度高于电子温度), a—d, qr 伴线的强度反而高于 jkl 伴线的强度, 我们认为这是辐射加热等离子体的发射光谱特征之一. 产生这一现象,

这是因为 a—d, qr 伴线主要由内壳层电子激发产生, 而 jkl 伴线则主要由双电子复合产生, 所以在辐射场较弱, 并且电子密度不是太高的情况下 (无法达到 LTE), 双电子复合产生机理占优, jkl 伴线较强. 而当辐射场较强时, 光子激发内壳层电子的产生机制占优, 于是 a—d, qr 伴线强度较强.

为了验证上述结论, 我们比较了在两种条件下 Li2l2l' 双激发态各种产生机理的相对大小, 如图 5 所示, 其中纵坐标的含义是单位时间单位体积内通过某一种原子过程产生的该种双激发态的数目, DR (dielectron recombination), CE (electron excitation), PI (photon ionization), A (photon excitation) 分别代表双电子复合过程、电子碰撞激发内壳层过程、光子电离内壳层过程、光子激发内壳层过程. 从图中可以看出在相同电子密度、温度条件下, 不考虑辐射场时, 双激发态主要由双电子复合产生



而当辐射场变强以后, 双激发态离子则主要由光子激发内壳层电子产生



这种趋势随着电子温度的增加而减弱, 当  $T_e = 180 \text{ eV}$  时, 类 Li2l2l' 双激发态的产生又重新以双电子复合为主.

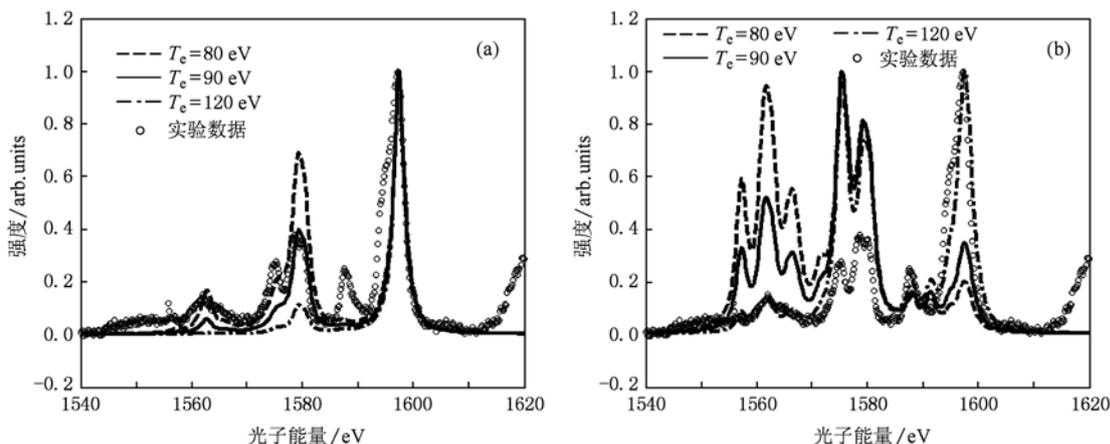


图 4 对比存在辐射场和不存在辐射场时的理论计算光谱 (a)  $T_e = 150 \text{ eV}$ ; (b)  $T_e = 1 \text{ eV}$ . 计算了三个电子温度下的发射光谱,  $T_e = 80, 90, 120 \text{ eV}$ . (a) 中 a—b, qr 伴线强度高于 jkl 伴线的强度; (b) 中 a—b, qr 伴线的强度低于 jkl 伴线的强度 ( $N_e = 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ )

### 3.2. 互组合线发射

我们知道, 互组合线可以用作等离子体密度诊断. 为此我们计算了在  $T_e = 200 \text{ eV}$ , 并且不考虑辐射

场条件下, 不同电子密度时类 He 离子发射光谱, 如图 6 所示. 从图中可以看出, 互组合线在密度较低时发射较强. 随着电子密度的增加, 互组合线相对于共振线的强度单调减少. 文献[10]中也得到相同的

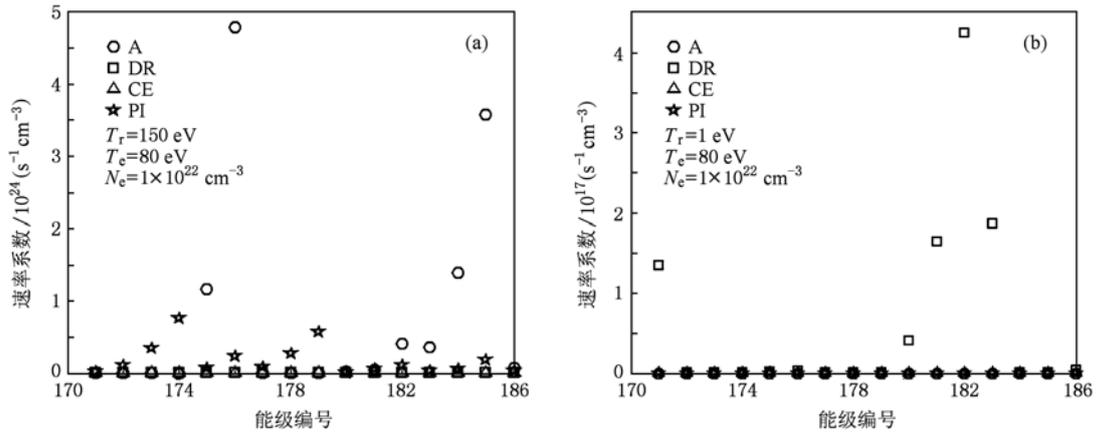


图5 比较了在  $T_e = 80 \text{ eV}, N_e = 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  时, 存在辐射场和不存在辐射场两种条件下  $\text{Li2I2I}'$  双激发态各种产生机理的相对大小. 组态与能级编号的具体对应关系为 171— $1s2s^2$ ; (172—176, 180—181)— $1s2s2p$ ; (177—178, 182—186)— $1s2p^2$  (a) 存在辐射场; (b) 不存在辐射场

结论. 如果在计算中加入辐射场, 基本的结论依然没有变化: 互组合线在等离子体密度较低时发射较强. 这是因为  $^3P_1$  态主要由电子碰撞激发产生, 通过自发辐射损失. 辐射场的存在并不能直接影响  $^3P_1$  态的产生和损失, 而是通过改变电离态分布而间接影响互组合线的发射. 在目前的实验中, 观察到较明显的互组合线发射, 这意味着在我们实验的观测范围内, 存在一密度较低的等离子体区域. 最后, 我们根据互组合线相对于共振线的强度, 推断出低密度区域的电子密度约为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

应不同的光谱特征. 考虑到我们实验测量的是时间、空间积分的发射光谱, 用单一等离子体状态难以再现实验光谱. 所以根据观测到的两个明显光谱特征, 我们用两种等离子体状态合成再现了实验光谱, 如图 7 所示. 其中一组参数是  $T_e = 85 \text{ eV}, T_r = 150 \text{ eV}, N_e = 1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ . 这一组参数是考虑到 a—d, qr 伴线的强度, 同时参考模拟计算给出的电子温度、密度而确定的, 它代表了辐射加热低温高密度等离子体状态. 另一组参数为  $T_e = 200 \text{ eV}, N_e = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 没有辐射场. 这一组参数是考虑到互组合线发射而确定的, 它代表了高温低密度冕区等离子体. 我们注意到这样一组参数与模拟给出的等离子体状态并不相符合. 在一维模拟中, 无法考虑二维效应, 因此无法考虑输运管内等离子体通过诊断狭缝向外膨胀, 而这一过程会进一步降低输运管内的等离子体密度. 除此之外, 模拟计算中的源项

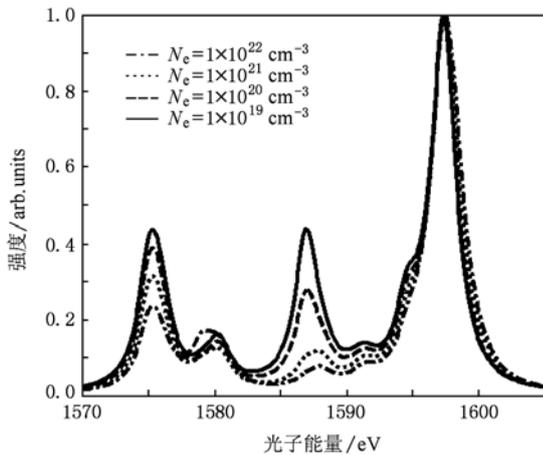


图6 互组合线发射强度随电子密度降低而增加

### 3.3. 再现实验光谱

根据以上两个小节分析, 我们知道在不同的温度、密度以及辐射温度下的等离子体状态可以对

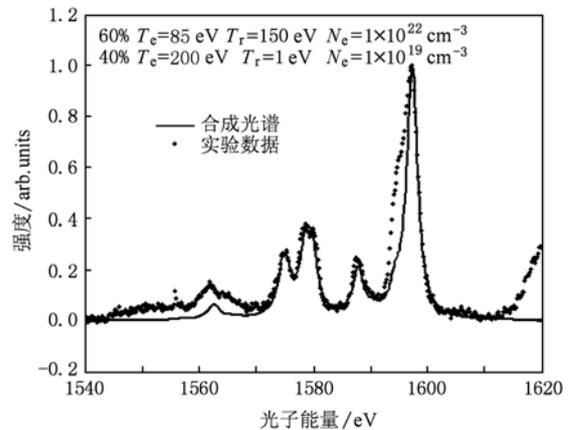


图7 合成光谱与实验光谱的比较

考虑的是一个黑体辐射场,而在实验中,黑腔内的电子、散射激光、金  $M$  带都有可能直接加热泡沫,从而进一步提高电子温度. 进一步确定其原因需要设计时间、空间分辨的光谱实验,还有待实验技术的发展. 但总的来说,合成光谱基本反映了实验光谱中的主要特征,其中  $Li2I2I'$  伴线和互组合线的强度,计算值和实验值符合得较好,而类 Be 的伴线和  $Li2InI'$  ( $n=3,4$ ) 的伴线计算值低于实验值,可能的原因是在计算中没有包括  $n$  大于 4 的双激发态能级.

#### 4. 结 论

在辐射输运实验中,我们通过在 CH 泡沫材料

中掺入 Al 元素,测量得到了 Al 类 He 离子发射光谱. 观测到 a—d, qr 伴线的强度高于 jkl 伴线的强度,这是等离子体在辐射加热占主导情况下的光谱特征. 然后利用两种等离子体状态,合成再现了实验光谱.

在电子加热占主导的等离子体中,我们可以用伴线与共振线的相对强度来诊断电子温度. 然而在辐射加热等离子体中,伴线的产生机理发生了改变,这时伴线的强度与辐射温度有关,并且电子加热的效果与辐射加热效果呈相互竞争的关系. 所以在辐射加热显现作用时,利用光谱特征诊断电子温度或是辐射温度的可能性,值得我们进一步探讨.

- 
- [1] Jiang S E, Sun K X, Zheng Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3413 (in Chinese) [江少恩、孙可煦、郑志坚 2004 物理学报 **53** 3413]
- [2] Jiang S E, Sun K X, Huang T X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1425 (in Chinese) [江少恩、孙可煦、黄天暄 2004 物理学报 **53** 1425]
- [3] Zhang Jiyan, Yang Jiaming, Xu Yan 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 985 (in Chinese) [张继彦、杨家敏、许 琰 2008 物理学报 **57** 985]
- [4] Yang J M, Zhang J Y, Ding Y N 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1483 (in Chinese) [杨家敏、张继彦、丁耀南 2007 强激光与粒子束 **19** 1483]
- [5] Gabriel A H 1972 *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **160** 99
- [6] Salzmann D 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 3229
- [7] Glenzer S H, Fournier K B, Decker C 2000 *Phys. Rev. E* **62** 2728
- [8] Pu Y D, Jin F T, Zhang J Y 2010 *Journal of Atomic and Molecular Physics* **27** (in Press) [蒲昱东、靳奉涛、张继彦 2010 原子分子物理学报 **27**]
- [9] Vinogradov A V, Skobelev I Y, Yukov E A. 1975 *Sov. J. Quant. Electron.* **5** 630
- [10] Ramis R, Schmaltz, Meyer-ter-Vehn 1988 *J. Comp. Phys. Comm.* **49** 475

## Characteristics of emission spectroscopy of radiatively heated Al plasma<sup>\*</sup>

Pu Yu-Dong<sup>†</sup> Yang Jia-Min Jin Feng-Tao Zhang Lu Ding Yong-Kun

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

(Received 17 December 2009; revised manuscript received 29 May 2010)

### Abstract

The X-ray spectrum of radiatively heated tracer Al in the doped foam was recorded by using a flat crystal spectrometer. The radiation thermal bath with a peak temperature of 150 eV is created inside the hohlraum irradiated by 8 laser beams, each delivering 250J. From the measured spectrum, we have observed that the intensities of jkl Li-like satellite were smaller than those of qr Li-like satellites, which is not a case usually encountered in electron collision dominated low density plasmas. The analyses of various generation and loss channels of doubly excited states indicate that in the radiatively heated plasma considered in the present work, the photo excitation and the photo ionization processes are fully responsible for the generation of doubly excited states instead of dielectronic recombination. Besides the satellite features, intercombination lines are also observed which imply the existence of a low density plasma region. Finally, we compare the calculated spectrum with the measured spectrum, and find that they are in fairly good agreement was achieved.

**Keywords:** emission spectrum, radiation heating, spectrum diagnostics

**PACS:** 52.70.Kz, 52.40.Db

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of Plasma Physics (Grant No. 9140C6801020801).

<sup>†</sup> E-mail: pyd02@mails.tsinghua.edu.cn