

Al 等离子体辐射损失的数值研究

李跃林 徐至展 陈时胜

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

1990 年 2 月 16 日收到

建立了一个用于研究 Al 等离子体中的离子丰度和辐射损失的碰撞辐射模型。模型考虑了碰撞电离和复合, 碰撞激发和退激发, 辐射复合和自发辐射跃迁等原子过程。在恒离子密度和光性薄近似下, 讨论了该模型给出的离子丰度和辐射损失的动态结果。

PACC: 5265; 5225P; 3220R

一、引 言

长期以来, 为了给不同实验提供有意义的参数, 对 Al 等离子体的光谱特性的数值研究一直受到人们的重视^[1-10]; 特别在 AlXIII d—nf 跃迁实现自发辐射放大的研究中, 实验与数值研究都得到了令人满意的结果^[10]。

这些数值研究除了考虑流体模拟^[3-5]或静态计算外^[6-9], 只有少数考虑了纯原子弛豫对等离子体的影响。在参考这些文献的同时, 为了计算上的简便, 建立了一个纯原子辐射冷却的 Al 等离子体的碰撞-辐射模型 ALSX, 用于研究高温 Al 等离子体中 AlXII 和 AlXI 离子的辐射损失, 并探讨实现复合泵浦机制下自发辐射放大的更适宜的条件^[10,11]。采用碰撞-辐射模型是因为其特性显然优于局部热平衡模型和日冕模型^[7], 而其时间依赖性可以使我们对等离子体参数进行动态分析。本文讨论了 ALSX 在不同离子密度下给出的辐射损失特性。

二、模型描述

在文献[4]的能级结构的基础上, 去掉了双激发态, 增加了实验中经常观测到的 AlXII $1s^2-1s2p$ 跃迁的上能级和 AlXIII 离子的基态, 从而确定图 1 所示的能级图。

ALSX 要求输入等离子体的离子密度 n_i 和初始电子温度 T_0 , 然后按改进萨哈方程^[12]和玻耳兹曼分布计算等离子体的初态

$$\begin{aligned} N^{s+1}/N^s &= (g_i^{s+1}/g_i^s) \exp(\xi - \chi_i^s/T_0), \\ N_i^z/N_i^s &= (g_i^z/g_i^s) \exp(-E_i^z/T_0), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{且} \quad \sum_{i,z} N_i^z = \sum_z N^s = n_i, \quad \sum_z N^s \cdot z = n_e, \quad (2)$$

z 为电离级, 下标 1 表示基态, g 为统计权重, ξ 为电离参数^[12], n_e 为电子数密度。然后

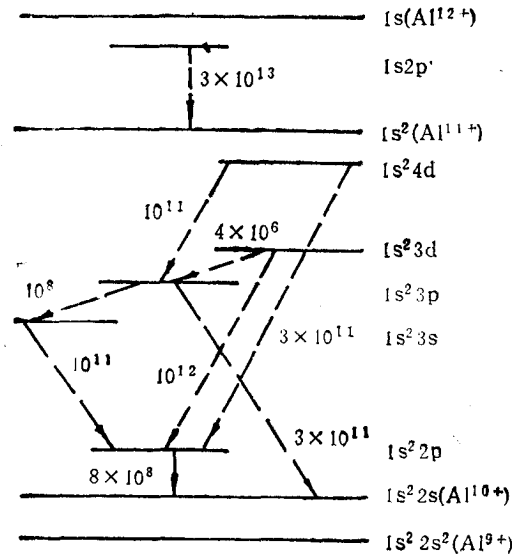
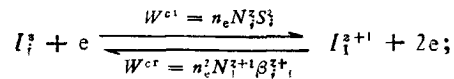


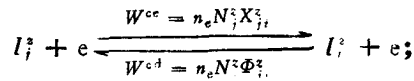
图1 ALSX 所采用的能级结构图 箭头边的数值代表爱因斯坦自发跃迁系数

等离子体通过以下原子过程弛豫:

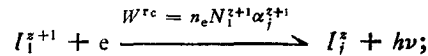
1) 碰撞电离与复合



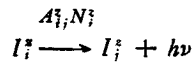
2) 碰撞激发与退激发



3) 辐射复合



4) 自发辐射跃迁



$S, \beta, \alpha, X, \Phi$ 和 A 分别为碰撞电离与复合, 辐射复合, 碰撞激发与退激发以及爱因斯坦系数。于是 z 电离级基态离子数随时间的变化为

$$\begin{aligned} dN_i^z/dt = & \sum_j [N_i^z (A_{ji}^z + n_e \Phi_{ji}^z) - N_i^z n_e X_{ji}^z] \\ & + n_e [N_i^{z+1} (\alpha_i^{z+1} + n_e \beta_i^{z+1}) - N_i^z S_i^z] \\ & - n_e \sum_j [N_i^z (\alpha_i^z + n_e \beta_i^z) + N_i^{z-1} S_i^{z-1}], \end{aligned} \quad (3)$$

激发态 i 则为

$$dN_i^z/dt = \sum_{j>i} [N_i^z (A_{ji}^z + n_e \Phi_{ji}^z) - N_i^z n_e X_{ji}^z]$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{i < j} [N_i^z (A_{ij}^z + n_e \Phi_{ij}^z) - N_j^z n_e X_{ji}^z] \\
& + n_e [N_1^{z+1} (\alpha_i^{z+1} + n_e \beta_i^{z+1}) - N_i^z S_i^z].
\end{aligned} \quad (4)$$

在忽略离子动能时,系统能量为离子内能和电子动能之和,则离子内能 E^i 随时间的变化为

$$\begin{aligned}
dE^i/dt = & \sum_{i < j, z} [(X_{ij}^z N_i^z - N_j^z \Phi_{ji}^z) n_e E_{ji}^z - P_{b-b}^z] \\
& + \sum_{z, j} [n_e x_j^{z-1} (N_j^{z-1} S_j^{z-1} - n_e N_j^z \beta_j^z) - P_{f-b}^z],
\end{aligned} \quad (5)$$

电子动能则为

$$\begin{aligned}
dE^e/dt = & \frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} T_e \right) = \sum_{z, i < j} (N_i^z \Phi_{ji}^z - N_j^z X_{ij}^z) n_e E_{ji}^z \\
& + \sum_{i, z} [n_e (n_e N_1^z \beta_i^z - S_j^{z-1} N_j^{z-1}) \chi_j^{z-1} - P_{f-f}^z],
\end{aligned}$$

式中

$$P_{b-b}^z = \sum_{i < j} N_i^z A_{ij}^z E_{ji}^z g_i^z / g_j^z \quad (6)$$

$$P_{f-b}^z = n_e \sum_i \alpha_i^z N_1^z \chi_i^{z-1}, \quad (7)$$

$$P_{f-f}^z = 1.5 \times 10^{-32} \sum_i T_e^{1/2} n_e z^2 N_i^z (\text{W/cm}^3) \quad (8)$$

分别为自发辐射、辐射复合和韧致辐射功率密度^[9], χ 表示态电离能。在 ALSX 中,这三种辐射过程决定了等离子体中的能量输运。

求解(3)–(8)式的微分方程组,就可以求得等离子体中态丰度、辐射损失的动态结果。

计算中, α, S, X 采用了通常接受的半经验公式^[2], β, Φ 则由其与 S, X 的细致平衡推得。爱因斯坦系数采用了文献[3]和[4]的结果, 岗特因数则采自文献[4]和[13]的平均结果。

三、数值结果

图 2 给出 $n_i = 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 和 10^{19}cm^{-3} 两种条件下一些离子激发态丰度随电子温度的变化。显然, 在离子密度差了二个数量级时, AlXII 1s 2p 态丰度也差了近两个量级, 而 AlXI 离子各激发态的丰度则只差了约一个数量级。这种差别可以由等离子体中各原子过程的相对关系得到解释,

$$W^{\text{cr}} = n_e^2 N_1^z \beta_i^{z+1} \propto n_i^3 \chi^{-1}$$

$$W^{\text{rc}} = n_e N_1^z \alpha_i^{z+1} \propto n_i \chi^{1/2},$$

$$W^{\text{cc}} = n_e N_j^z X_{ji}^z \propto n_i^2 \exp(-E_{ij}/T_e) / E_{ij}.$$

上式给出碰撞复合、辐射复合及碰撞激发速率对离子密度和态激发能(电离能)的依赖关

系。可见碰撞复合过程对次一电离级的高激发态具有重要影响,而辐射复合则对基态的影响较明显,一些较低激发态也由于碰撞激发得到填充。

由于对密度的不同依赖使得在密度降低时,首先影响到 Al XII $1s2p$ 态以复合方式得到的填充,同时其高达 1598 eV 使其由基态激发而得到填充的机会很小。而在 Al XI 离子中,激发态布居虽然也受到密度降低的影响,但其较低激发能使其仍可以通过碰撞激发得到填充。因而在图 2 中,能量较低的态受到密度变化的影响就比能量高的态要小。从以上分析来看,由于 Al XI nf 能级是该离化态中较高的能级,要实现其对于 3d 能级反转,就要求初条件下等离子体处于 Al^{11+} 态,且具有较高的密度,使 nf 能级由于碰撞复合而得到填充;同时等离子体迅速膨胀,实现下能级的辐射倒空而产生反转。

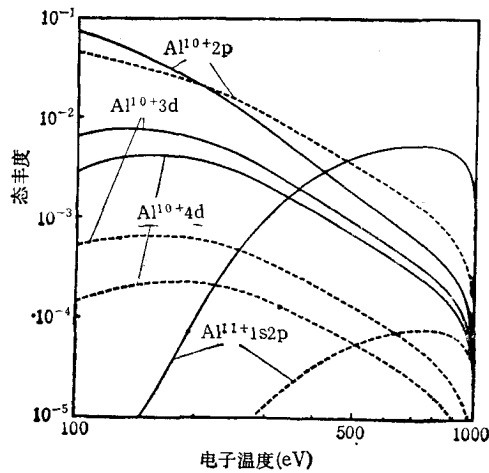


图 2 部分能级在两种密度条件下的丰度随电子温度的变化
--- 为 $n_i = 10^{19} \text{cm}^{-3}$; — 为 $n_i = 10^{21} \text{cm}^{-3}$

这一态丰度分布随密度的变化就直接影响到等离子体中线谱辐射特点。图 3 给出两种密度条件下各种辐射的单离子功率随时间的变化。在 ALSX 中, Al XII $1s^2-1s2p$ 跃迁代表了 K 带的线辐射源,是全部线辐射跃迁中最强的;而 L 带中最强的辐射则是 Al XI $2p-3d$ 。显然在两种密度下这两个跃迁的相对关系并不相同,在 $n_i = 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时 Al XI $2p-3d$ 跃迁的功率峰值相对有所提高,且 $2s-2p$ 跃迁也成为重要的辐射源;这就造成

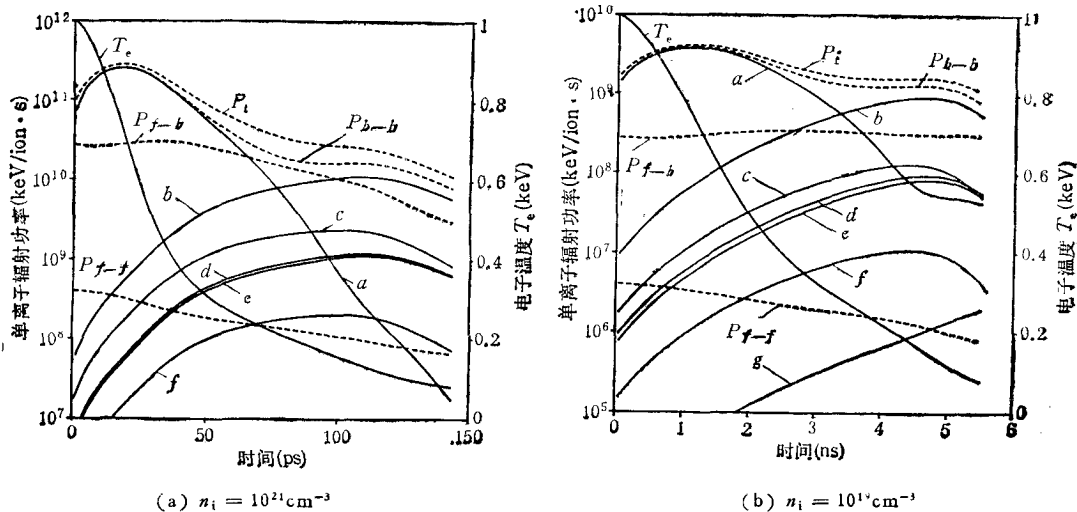


图 3 Al 等离子体中的总辐射线 (P_t)、线辐射 (P_{b-b})、辐射复合 (P_{f-b}) 和韧致辐射 (P_{f-f}) 单离子功率随时间的变化,图中还给出一些线辐射各自的辐射功率。曲线 a 为 Al XII $1s^2-1s2p$; 曲线 b 为 Al XI $2p-3d$; 曲线 c 为 Al XI $2p-4d$; 曲线 d 为 Al XI $2p-3s$; 曲线 e 为 Al XI $2s-3p$; 曲线 f 为 Al XI $2s-2p$

图3(b)中单粒子线辐射功率向 L 带漂移 (P_{b-b}), 这一结果与文献[9]的趋势一致。从图3中的时间标尺和电子温度随时间的变化来看, 低密度等离子体保持的时间比高密度的要长很多, 其能量损失的主要部分线辐射的功率也小很多。

同时还注意到图3中类 Li 的 AlXI 离子中的几条线辐射跃迁的相对关系, 在两种密度条件下基本不变, 且一些跃迁波长相近, 其比值可能提供较好的温度判据。

图3中同时还给出单离子辐射复合 (P_{f-b}) 和韧致辐射 (P_{f-f}) 功率的变化曲线, 显然, 在考虑的温度密度范围内, 连续谱发射都不是主要成份, 韧致辐射成份甚至可以忽略。且由表1的 1000eV 至 80eV 的积分损失来看, 随密度降低, 连续谱损失成分也进一步降低。这证实了文献[7]的有关结果。

表1 Al 等离子体中的辐射损失

离子密度 (cm^{-3})	辐射总能量 (J/cm^3)	线 辐 射		辐射复合		韧致辐射	
		能量 (J/cm^3)	百分比 (%)	能量 (J/cm^3)	百分比 (%)	能量 (J/cm^3)	百分比 (%)
10^{21}	2.04×10^6	1.64×10^6	80.6	3.91×10^5	19.2	4.00×10^3	0.2
10^{19}	2.10×10^4	1.82×10^4	86.9	2.72×10^3	13.0	19.91	0.1

四、讨论与结论

由于计算机时间限制, 选择了有限的能级, 希望在进一步的研究中考虑对于自发辐射放大具有重要意义的 AlXI ∞ 能级。ALSX 中采用的恒密度条件在高密度时也显然不尽精确。ALSX 中的另一个重要假设是光性薄近似, 因而其结果对于光电离、光激发对等离子体态分布影响比碰撞过程要弱很多的情况较适用, 且给出的线辐射功率偏大。但这种自由原子弛豫模型相对简便, 其时间解又可给出静态解所不能得到的动态图象, 其在低密度下的结果, 对于远离临界面的稀薄等离子体是良好的近似。初步的运行确证了以下结果:

1. 线辐射是辐射损失的主要成分, 其比例随离子密度下降而提高, 且功率峰随之向 L 带漂移;
2. 在所考虑的温度范围内, 连续谱辐射为总辐射的 20%, 且随密度下降而下降。

本工作得到陈荣清、张文琦、钱家钧等同志的大力协助, 在此致谢。

- [1] K. G. Whitney, J. Davis, *Appl. Phys. Lett.*, **24**(1974), 509.
- [2] K. G. Whitney, J. Davis, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 5294.
- [3] K. G. Whitney *et al.*, *Phys. Fluids*, **18**(1975), 1687.
- [4] J. Davis, K. G. Whitney, *J. Appl. Phys.*, **47**(1976), 1426.
- [5] D. Duston, J. J. Duderstadt, *Phys. Rev.*, **A18**(1978), 1707.
- [6] R. K. Landshoff, P. Perez, *Phys. Rev.*, **A13**(1976), 1619; J. D. Perez, G. L. Payne, *Phys. Rev.*, **A21**

- (1980), 968.
- [7] D. Salzmann, A. Krumbein, *J. Appl. Phys.*, 49(1978), 3229.
- [8] D. Duston, J. Davis, *Phys. Rev.*, A21(1980), 1664.
- [9] D. Duston, J. Davis, *Phys. Rev.*, A23(1981), 2602.
- [10] H. Guennou, A. Sureau, *J. Phys. B*, 20(1987), 919; P. Jaegle *et al.*, *Europhys. Lett.*, 1(1986), 555.
- [11] 徐至展等, 中国激光, 16(1989), 385.
- [12] P. Alaterre *et al.*, *Phys. Rev.*, A34(1986), 4184.
- [13] E. Oran, J. Davis, *J. Appl. Phys.*, 45(1974), 2480.

A NUMERICAL STUDY OF RADIATIVE LOSSES IN ALUMINUM PLASMAS

LI YUE-LIN XU ZHI-ZHAN CHEN SHI-SHENG

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai, 201800

(Received 16 February 1990)

ABSTRACT

A collisional-radiative numerical model is developed for studies of radiative losses and ion abundances in aluminum plasmas. Atomic processes such as collisional ionization and recombination, collisional excitation and deexcitation, radiation recombination, and spontaneous radiation are included. The dynamic results of ion abundances, radiation losses are discussed under the approximation of constant ion density and optically thin condition.

PACC: 5265; 5225P; 3220R