

在激光等离子体中产生高电荷态离子的新途径

王晓方 沈百飞 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 本文提出一种在激光等离子体中产生高丰度高电荷态离子的新途径, 即通过共振光激发和碰撞电离混合过程来实现. 模型计算表明, 这一混合过程对提高高电荷态离子丰度的有效性. 有关实验也证明这一过程的重要作用.

关键词 激光等离子体, 高电荷态离子, 复合 X 射线激光.

1 引 言

复合泵浦 X 射线激光的基本原子过程是通过三体复合过程实现粒子数反转^[1], 即



因此这一过程的先决条件是产生高丰度的高电荷态离子 $A^{(i+1)+}$. 目前, 它主要通过电子碰撞电离过程来实现, 这要求高电子温度. 但是在高温下的三体复合几率很小, 不利于过程(1)发生, 从而不利于粒子数反转. 实验上, 通常是先形成高温等离子体产生足够丰度高电荷态离子, 再通过快速冷却来降低等离子体温度从而增强三体复合. 虽已提出了一些新方案^[2]如超快激光加热、光场感应电离复合等, 但因其本身物理机制尚不清晰或目前实验条件所限还难以确认这些方案的有效性. 本文根据激光等离子体 X 射线发射光谱特性提出了一种在较低温等离子体中产生高丰度高电荷态离子的新途径, 通过这一途径可以在较冷的等离子体中产生高丰度的高电荷态离子, 从而有利于三体复合.

2 模型描述

如图 1 所示的离子能级结构. 1、3 分别为电荷态离子 A^{i+} 、 $A^{(i+1)+}$ 的基态. 2 为 A^{i+} 的第一激发态, n' 为 A^{i+} 离子其他一些激发态. 在激光等离子体中, 由于对应 A^{i+} 的一些电荷态离子如类 H、类 He 离子中 $n=2 \rightarrow 1$ 间跃迁辐射(即共振线)非常强, 因而在这种情况下通过共振光吸收可将离子从基态共振激发到能级 2; 而且在类 H 和类 He 离子中, 能级 2 到 $A^{(i+1)+}$ 离子基态的能级间隔小, 因此在较低温度下通过电子碰撞电离过程可很容易使能级 2 上的粒

* 分别对应原子核和类 H 离子.

收稿日期: 1993 年 7 月 16 日

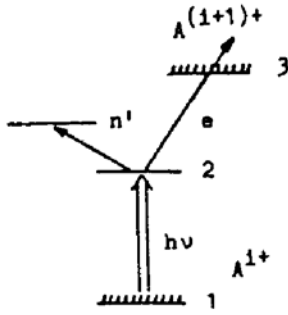


Fig. 1 Energy level diagram for producing highly ionized ions by resonant photoexcitation, followed by electron collisional ionization

子电离到 $A^{(1+)+}$. 能级 2、3 上粒子数的速率方程为

$$(dN_2/dt) = N_1(Pe + n_e C_{12}) + N_3(n_e \alpha_{32} + n_e^2 \beta_{32}) - N_2(A_{21} + g_1 P_e / g_2 + n_e S_{23} + n_e \sum_{n'} C_{2n'}) \quad (2)$$

$$(dN_3/dt) = N_1 n_e S_{13} + N_2 n_e S_{23} - N_3(n_e \alpha_{32} + n_e \alpha_{31} + n_e^2 \beta_{31} + n_e^2 \beta_{32}) \quad (3)$$

方程中已考虑了碰撞激发(退激发)、碰撞电离(复合)、辐射复合、共振光激发(退激发)等原子过程. 式中 N_1 、 N_2 、 N_3 分别为能级 1、2、3 上的粒子数密度, n_e 为电子密度, α 为辐射复合系数^[3], β 为三体复合系数⁽⁴⁾, S 为碰撞电离系数⁽⁴⁾, C 为碰撞激发(退激发)系数⁽⁵⁾. P_e 为共振光激发速率⁽⁶⁾,

$$P_e = (g_2/g_1) A_{21} \rho \quad (4)$$

g_1 、 g_2 分别为能级 1、2 的简并度, A_{21} 为 1、2 间自发辐射速率, ρ 为模密度, 其与单色光强 I 的关系为⁽⁷⁾

$$I = 8 \pi C^2 (h/\lambda^5) \rho \quad (5)$$

(2) 式中 $\sum_{n'} N_2 n_e C_{2n'}$ 的引入是为了计入能级 2 和其它能级 (n') 间的耦合, 从而可更有效地考察能级 2 上的粒子数, 使本文的模型更接近实际情况. 因 n' 上的粒子数相对能级 1、2 上的很少, 故在 (3) 式中忽略了其对 N_3 的影响.

3 计算结果和讨论

这里以类氢铝离子(即 $A^{1+} = Al^{11+}$) 为例, 并讨论稳态条件下的结果. 因为类氢铝离子基态 $1s^2$ 到激发态 $1s2p$ 的能级间隔很大, 且在激光等离子体中 $1s^2-1s2p$ 的共振线发射又非常强, 因此类氢铝离子和本文模型中的 A^{1+} 离子能级结构极相似. 在计算中, 考虑了 Al^{11+} 的基态 $1s^2$ 、激发态 $1s2s$ 、 $1s2p$ 、 $1s3d$ 、 $1s4d$ 、 $1s3s$ 、 $1s4s$ 等能级的单重态以及类氢离子 Al^{12+} 的基态. $1s2p$ 对应模型中能级 2. 各能级间隔和能级间偶极跃迁振子强度由 Cowan 原子程序^[8]计算获得*.

图 2 是分别在有无共振光激发条件下类 H 离子和类氢离子基态粒子丰度的相对比值. 从图 2 可见, 在共振光激发条件下, 类 H 离子丰度大大提高. 这样, 在较低电子温度条件下, 就可产生高丰度的类 H 离子. 在此基础上, 有可能实现复合泵浦类 He 离子的短波长 X 射线激光^[9].

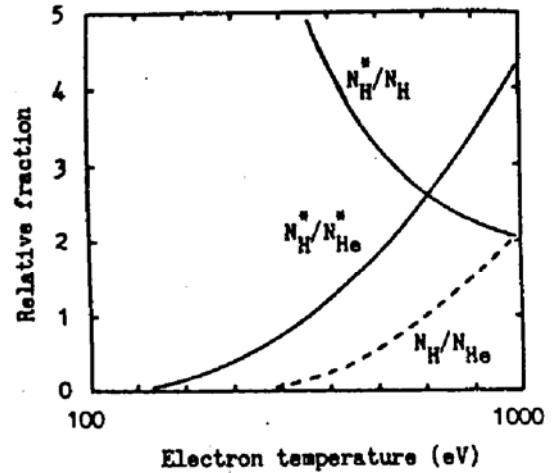


Fig. 2 Relative fraction of the H-like ions to the He-like ions versus electron temperature with resonant photoexcitation (N_H^*/N_{He}) or without resonant photoexcitation (N_H/N_{He}). The relative ratio of the H-like ions with resonant photoexcitation to that without photoexcitation is also shown. $n_e = 2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$, $\rho = 0.01$

* 原子过程的各速率系数取自文献[3~5]

模型也考察了电子密度和共振光激发泵浦强度对类 H 离子丰度的影响. 图 3(a)表明, 低密度或高温条件下共振光激发对提高类 H 离子丰度更有效. 然而在此情况下, 粒子数反转亦受到限制, 不利于高增益产生. 从图 3(b)还发现, 泵浦光强度(即不同模密度 ρ)对类 H 离子丰度影响很显著. 泵浦光越强, 越有利于类 H 离子丰度的提高. 且在温度保持不变条件下, 共振光激发的作用受密度影响不大.

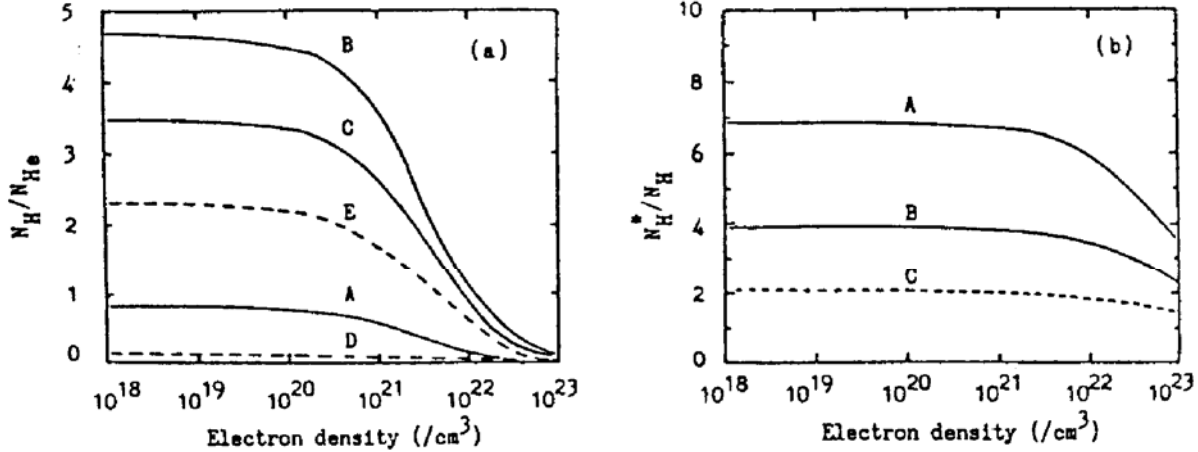


Fig. 3 (a) Relative fraction of the H-like ions to the He-like ions with resonant photoexcitation (curves A, B, C) or without resonant photexcitation (Curves D, E). A: $\rho = 0.01$, $T_e = 500$ eV; B: $\rho = 0.01$, $T_e = 1000$ eV; C: $\rho = 0.005$, $T_e = 1000$ eV; D: $\rho = 0$, $T_e = 500$ eV; E: $\rho = 0$, $T_e = 1000$ eV.
(b) Relative ratio (N_{H^+}/N_H) of the H-like ions with resonant photoexcitation to that without resonant photoexcitation. A: $\rho = 0.01$, $T_e = 500$ eV; B: $\rho = 0.005$, $T_e = 500$ eV; C: $\rho = 0.01$, $T_e = 1000$ eV

但在高密度条件下, 电子碰撞以及辐射复合等原子过程的作用使体系趋于热平衡, 类 H 离子丰度不高, 参见图 3(a). 因此, 综合密度效应和泵浦光强两方面的影响可见, 合适的等离子体密度和提高泵浦光强对于增强共振光激发的作用和提高类 H 离子丰度是十分必要的. 从图 3 可见, 它要求电子密度应小于 $10^{21}/\text{cm}^3$. 对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光打靶, 这正对应临界密度以下的等离子体区域.

实验方面, 为了有效地产生共振光泵浦源, 可通过选取合适等离子体参数如高亮度激光打靶或专门设计的双脉冲激光打靶来实现. 通过双脉冲激光打靶, 可产生等离子体空间分布的变化, 从而可使一定区域的等离子体的类 He 共振线发射作为泵浦光源去有效地共振激发另一区域的基态类 He 离子. 如在进行的双脉冲激光打靶中⁽¹⁰⁾, 第二个脉冲和靶的作用可在等离子体中距离靶面不同区域产生泵浦源(近靶面)和吸收区(较远离靶面), 使吸收区的类 H 离子丰度大大提高, 并已观察到类 He 离子 $n = 3 - 2$ 间粒子数反转; 而通常采用单脉冲却无法产生高丰度的类 H 离子和实现上述粒子数反转. 对这些结果的合理解释, 共振光激发和碰撞电离这一过程对提高类 H 离子丰度是有贡献的. 此外, 近年来随着高亮度短脉冲激光的发展, 其加热等离子体产生的 X 射线辐射能流已达到 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ ^[11]. 对于类氦 Al 离子的 $1s^2 - 1s2p$ 共振线发射(0.78 nm)和自然线宽, 这相当于模密度 $\rho = 0.02$ 的泵浦源. 因此在本文的模型计算中取 $\rho = 0.01$ 是合理的. 同时, 这也表明在超短高亮度激光驱动的 X 射线激光或 X 射线辐射中, 本文所提出的这一过程将会起着更为重要的作用.

最后需指出, 本文提出的这一新途径和以前文献中所讨论的共振光激发直接产生粒子数反转机制⁽¹²⁾不同. 因为后一机制要求共振光激发的上能级为粒子数反转的上能级(类似于本

文模型中的能级 n'), 它对泵浦源波长匹配和高亮度要求更为苛刻. 而本文模型中共振光激发的上能级为共振线的上能级, 不但激发几率非常大, 而且在激光等离子体中共振线发射非常强, 因此可在同一等离子体中采用同种电荷态离子很容易实现波长匹配的高亮度泵浦源.

结 论 本文提出了利用共振光激发和电子碰撞激发两步过程来提高等离子体中高电荷态离子丰度. 模型计算表明, 在目前完全可以满足的适当等离子体条件(如专门引进的双脉冲或高亮度激光产生的等离子体中)下, 通过这一混合过程可以在较低等离子体温度下有效地产生高丰度的高电荷态离子, 从而对于实现复合 X 射线激光是十分有益的.

参 考 文 献

- [1] G. Jamelot, *et al.*, Amplification of soft X-ray spontaneous emission in aluminium and magnesium plasmas. *J. Phys. (B)*, 1984, **B18**(12): 4647~4663
- [2] N. H. Burnett, G. D. Enright, Population inversion in the recombination of optically-ionized plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(10): 1797~1808
C. H. Skinner, Review of soft X-ray lasers and their applications. *Phys. Fluids, (B)*, 1991, **B3**(8): 2420~2429
- [3] D. Colombant, G. F. Tonon, X-ray emission in laser-produced plasma. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(8): 3524~3537
- [4] R. K. Landshoff, J. D. Perez, Determination of plasma parameters of laser-produced aluminium plasma from X-ray line radiation. *Phys. Rev.*, 1976, **13**(4): 1619~1632
- [5] R. C. Elton, *X-Ray Lasers*. San Diego, Academic Press, 1990: 101
- [6] R. C. Elton, *X-Ray Lasers*. San Diego, Academic Press, 1990: 129
- [7] J. Nilson, Ni-like X-ray lasers resonantly photopumped by Ly- α radiation. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(3): 305~308
- [8] R. D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra*. Los Angeles, Univ. of Calif. Press, 1981
- [9] J. P. Apruzese, *et al.*, Recombination lasing in heliumlike silicon: a possible path to the water window. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1988, **16**(5): 529~533
- [10] Xiaofang Wang, *et al.*, Approach to 'water-window' wavelength X-ray lasers with helium-like ions between $n=3$ and 2 levels. *International Conference on Quantum Electronics Technical Digest Series*, 1992, **9**: 104~106
Xiaofang Wang, *et al.*, Enhanced ionization and population inversion with double-pulse laser heating. *Chinese J. Lasers*, 1993, **B2**(6): 509~516
- [11] A. Zigler, *et al.*, High intensity generation of 9~13 Å X-rays from BaF₂ targets. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(7): 777~778
- [12] R. C. Elton, *X-ray Lasers*, San Diego, Academic Press, 1990: 126~143

A New Path to Enhance the Fractions of Highly Ionized Ions

Wang Xiaofang Shen Baifei Xu Zhizhan

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

(Received 16 July 1993)

Abstract A new path is put forward to enhance the fractions of highly ionized ions in laser-produced plasmas through a mixed process of resonant photopumping followed by electron collisional ionization. Modelling calculations indicate that the mixed process is effective to create the highly ionized ions. Experimental evidences imply the potential importance of this process.

Key words laser plasma, highly ionized ions, X-ray laser.