

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0004-03

# 毛细管放电类氩氩软 X 射线激光系列参数

程元丽 张新陆 王 骥

(哈尔滨工业大学光电技术研究所, 哈尔滨 150001)

郑无敌 彭惠民

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**提要** 利用北京计算数学与物理研究所编制的一维磁流体力学程序对毛细管放电条件下类氩氩等离子体进行了计算, 给出了等离子体半径、电子、离子温度和密度等参数随时间的变化情况; 并根据 Cowan 程序对类氩-氩原子参数的计算结果, 讨论了在毛细管放电类氩氩等离子体中形成粒子数反转的可能性, 以及光线在毛细管传播、放大的可能性。

**关键词** 毛细管放电, 类氩氩离子, 原子参数, X 射线激光

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A

## Calculation And Discussion of Series Parameters in Capillary Discharge Soft X-Ray Laser

CHENG Yuan-li ZHANG Xin-lu WANG Qi

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ZHANG Wu-di PENG Hui-ming

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

**Abstract** Using SDCH, a one-dimensional Lagrangian magneto-hydrodynamics code, the simulation results of discharge-pumped  $2p^5 3p \rightarrow 2p^5 3s$  transition 46.9 nm laser line in Ne-like Ar are presented. Energy structures and atomic process parameters are calculated, and the possibility of population inversion in the plasma produced by capillary discharge is discussed systematically.

**Key words** capillary discharge, collisional excitation, z-pinch

近年来,有关利用毛细管快放电激励类氩离子产生软 X 射线激光的研究十分活跃,1999 年美国 Colorado 大学 Rocca 小组利用该方案取得了突破性的进展,获得了毛细管放电抽运类氩氩 46.9 nm 激光 1 mJ 能量输出,平均能量 0.88 mJ,重复率 4 Hz,其转换效率比传统的激光等离子体产生 X 射线激光有显著提高,并且体积小,费用低,操作相对简便,是目前最有希望实现台式 X 射线激光器的方案。本文初步计算了毛细管放电等离子体参数及原子参数,并讨论毛细管放电等离子体中激光的形成过程

以及饱和长度。

### 1 等离子体参数及其演变过程

XDCH 程序是北京应用物理与计算数学研究所针对毛细管放电开发的,采用一维近似,并将一维非平衡磁流体力学程序(MHD)与反转动力学程序相耦合来计算毛细管放电等离子体的物理过程和激光产生的物理参数。我们选取 1995 年美国 Rocca 小组<sup>[7]</sup>毛细管放电类氩-氩 X 光激光饱和输出的一组实验参数进行了数值模拟计算。放电电流为类正弦波形  $I(t) = I_0 \sin(\pi t/T)$ , 电流峰值  $I_0 = 39$  kA,  $T = 120$  ns 为电流脉冲周期,毛细管半径  $R_0 = 2$  mm; 在室温情况下,充入 Ar 气的压强为 93 Pa。初始条件为毛

\* 国家自然科学基金(60038010)、国家 863 激光技术领域(863-804-7-10)资助课题。

细管内充满均匀预电离气体和高密度的中性气体。

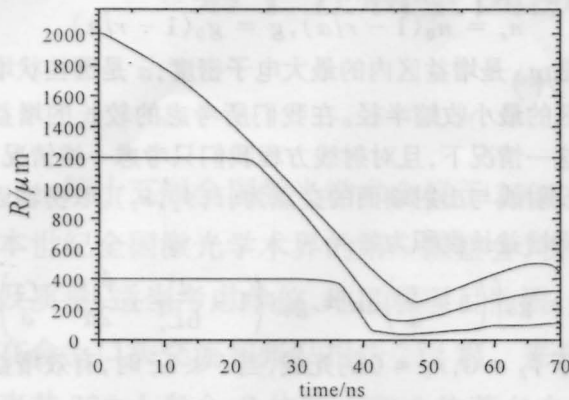


图 1 模拟计算得到的各拉氏点轨迹

Fig. 1 A comparison of the simulated trajectories of Lagrangian cells in Ar plasma

计算数据表明,随着毛细管通道内快速上升的电流,逐渐增大的径向电磁作用力(洛伦兹力),产生较强的压缩激波,激波到达的地方等离子体开始向内箍缩,压缩激波向轴心推进,在等离子体轴心区域形成压缩的高温、高密度等离子体柱。激波到达轴心后反射,此时等离子体柱处于停滞阶段,如图 1 所示(40 ns~43 ns)。激波加热(压力做功)对毛细管等离子体中心区域的升温、电离起很大作用。在最后的压缩阶段,40 ns 附近,因为比较高的压缩速率,电子密度突然提高,接近达到类 Ne-Ar 3p-3s 跃迁形成增益的合适条件:电子温度为 60 eV~80 eV,电子密度为  $(0.3 \sim 1) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,持续时间为 2 ns~3 ns(如图 2 所示)。当压缩激波能量再次向轴心汇聚,致使离子温度突然升高,高密度等离子体的过电离,多谱勒展宽,碰撞热能化导致了增益的迅速减小。等离子体过电离之后,复合又膨胀降温,也应该

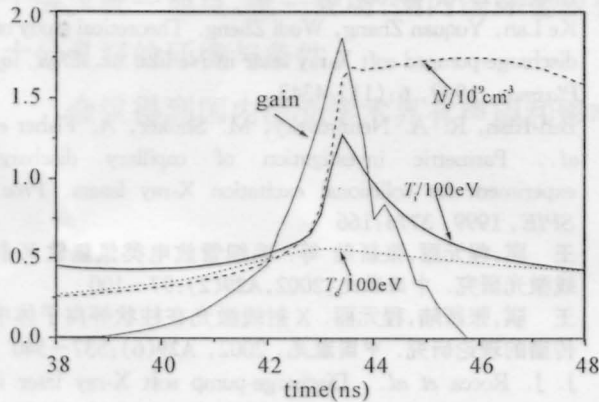


图 2 在增益峰值处 Ne, Te, Ti 和增益 g 随时间的变化  
Fig. 2 Evolution of Ne, Te, Ti and gain g against time at the Lagrangian cell which produces the maximum gain

有增益,但此时离子密度太低,增益不可观。在最大压缩时,等离子体柱辐射区域的直径为  $200 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ 。等离子体保持最大压缩时刻半径大约 10 ns,然后由于很陡的密度梯度产生的强大的热压,使等离子体柱开始向外侧膨胀,直到第一个电流半周期结束。第二个电流半周期峰值后,等离子体经历第二次坍塌,但这时等离子体半径约为 1 mm,等离子体温度较低,不适合于产生碰撞激发软 X 激光。

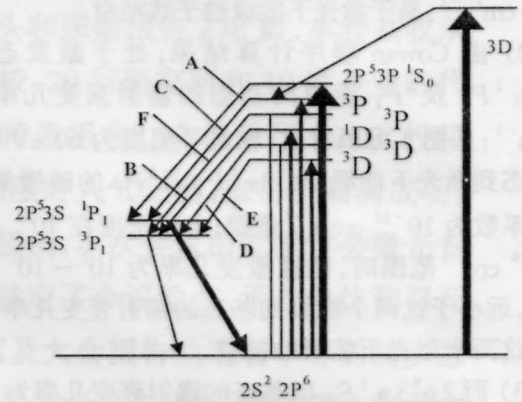


图 3 类氩离子 3p-3s 激光能级图

Fig. 3 The energy-level diagram of 3p-3s in Ne-like Ar

## 2 粒子数反转的建立

美国 Los Alamos 国家实验室 Robert Cowan 编制的 Cowan 物理程序(Cowan physics code)由于其涉及面广,计算精度高,因而在国际、国内 X 光激光及原子物理学等领域广为使用。我们选用 Cowan 程序,计算了类氩离子 46.9 nm 激光有关能级数据。以下根据计算的数据讨论在毛细管放电条件下,46.9 nm 跃迁线粒子数反转的形成。

1) 在适当放电条件下,毛细管放电产生的高剥离类氩等离子体中的电子温度可达 60 eV~80 eV

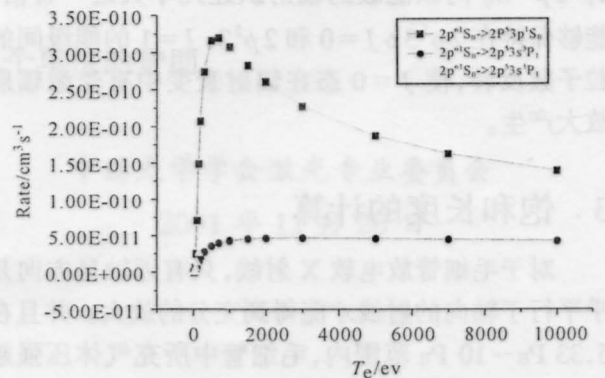


图 4 类氩离子的碰撞激发速率系数

Fig. 4 The rates of electron-collision excitation in Ne-like Ar

(接近  $10^6$  K 量级), 可认为电子遵从 Maxwell 分布。在 Maxwell 分布情况下, 我们利用 Cowan 程序计算了类氩离子的碰撞激发速率系数。如图 4 所示, 电子温度在 60 eV ~ 80 eV 时, 基态类氩离子碰撞激发到激光上能级  $2p^5 3p^1 S_0$  的速率系数较大, 约为  $10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $J=0 \rightarrow 1$  单极激发), 易于激光上能级的粒子数积累; 而基态类氩离子碰撞激发到激光下能级  $2p^5 3s^1 P_1$  和  $2p^5 3s^3 P_1$  的速率系数较小, 约为  $10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , 易于激光下能级粒子数抽空。

2) 由 Cowan 程序计算结果, 处于激发态的  $2p^5 3s^1 P_1$  及  $3P_1$  能级向基态的辐射衰变几率为  $10^{11} \text{ s}^{-1}$ ; 从图 4 可以看出, 在电子温度为 60 eV 时, 从基态到激光下能级  $2p^5 3s^1 P_1$  及  $3P_1$  的碰撞激发速率系数为  $10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  量级; 电子密度在  $10^{18} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  范围时, 碰撞激发几率为  $10^7 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$  量级, 远小于这两个能级到基态的辐射衰变几率, 有利于这两个激光下能级的抽空。

3) 而  $2p^5 3p^1 S_0$  向基态的辐射衰变几率为  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , 属于光学禁戒。从图 4 可以看出, 在电子温度为 60 eV ~ 80 eV 时, 从基态到激光下能级  $2p^5 3s^1 P_1$  及  $3P_1$  的碰撞激发速率系数为  $10 \sim 11 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  量级。在电子密度为  $10^{18} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的范围时, 碰撞激发几率为  $10^7 \text{ s}^{-1} \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$  量级, 远大于这两个能级到基态的辐射衰变几率, 有利于激光上能级粒子数的积累。

4) 综合以上因素, 在  $2p^5 3p^1 S_0$  和  $2p^5 3s^1 P_1$  能级间形成粒子数反转。由于处于高激发态的  $2p^5 3p^1 S_0$  能级向基态  $2p^6$  及  $2p^5 3s J=0$  能级的跃迁属于光学禁戒, 它只能向  $2p^5 3s J=1$  的能级发生辐射跃迁。而且, 根据计算结果, 激光下能级  $2p^5 3s J=1$  向基态的辐射衰变几率比激光上能级  $2p^5 3p^1 S_0$  向该能级的辐射跃迁几率大近一百倍, 能够保持在  $2p^5 3p J=0$  和  $2p^5 3s J=1$  的能级间的粒子数反转, 使  $J=0$  态在辐射衰变中有受激辐射放大产生。

### 3 饱和长度的计算

对于毛细管放电软 X 射线, 只有近轴且方向几乎平行于轴向的射线才能得到充分的放大。并且在 5.33 Pa ~ 10 Pa 范围内, 毛细管中所充气体压强越大, 径向电子密度梯度越小。为了得到最小饱和和长

度, 我们取电子密度梯度最大的分布, 电子密度和增益线性分布很相似: 即

$$n_e = n_0(1 - r/a), g = g_0(1 - r/a)$$

式是  $n_0$  是增益区内的最大电子密度,  $a$  是圆柱状增益区的最小收缩半径。在我们所考虑的较长的增益区这一情况下, 且对射线方程我们只考虑一维情况, 并设射线与出射端面的交点为  $(l, \phi_2, r_2)$ 。取傍轴近似得增益长度积为

$$G = g_0 \int \left(1 - \frac{r}{a}\right) dz = g_0 l \left(1 - \frac{l^2}{6L_r^2} + \frac{\phi_2 l}{2a} - \frac{r_2}{a}\right)$$

对于  $\phi_2 = 0, r_2 = 0$  的光线, 当  $l \ll L_r$  时, 有效增益  $g_{\text{eff}} \approx g_0$ , 折射效应的影响不大; 当  $l \geq \sqrt{6}L_r$  时,  $g_{\text{eff}} \leq 0$ , 折射效应的影响相当严重。在  $l > \sqrt{6}L_r$  的区域内, X 光激光的强度几乎没有增值, 在轴向甚至没有放大。我们定义  $l_{\text{max}} = \sqrt{6}L_r$  为  $\phi_2 = 0$  的射线最大增益区长度, 即为饱和长度; 我们也可看出对于不同偏转角的射线其饱和长度也不同, 其饱和长度随偏转角的增大而变长, 因此从侧面出来近轴且经过整个增益区长度的射线的饱和长度最长, 其值为  $\frac{3L_r + \sqrt{34}L_r}{2}$ 。当然对毛细管放电激光器而言, 可以通过努力使电子密度梯度减小, 以取得更长的饱和长度。

### 参 考 文 献

- 1 C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca *et al.*. Generation of millijoule-level soft-X-ray laser pulses at a 4 Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16): 1115 ~ 1117
- 2 R. C. 埃尔顿著. X 射线激光. 范品忠译. 北京: 科学出版社, 1996. 48, 66 ~ 67
- 3 Ke Lan, Yuquan Zhang, Wudi Zheng. Theoretical study on discharge-pumped soft X-ray laser in Ne-like Ar. *Phys. of Plasmas*, 1999, **6**(11): 4343
- 4 Ben-Kish, R. A. Nemirovsky, M. Shuker, A. Fisher *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers. *Proc. SPIE*, 1999, **3776**: 166
- 5 王 骐, 程元丽, 张新陆 等. 毛细管放电类氩氩软 X 射线激光研究. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 97 ~ 100
- 6 王 骐, 张新陆, 程元丽. X 射线激光在柱状等离子体中传播的理论研究. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 537 ~ 540
- 7 J. J. Rocca *et al.*. Discharge-pump soft X-ray laser in neon-like argon. *Phys. Plasma*, 1995, **2**(6): 2547 ~ 2554, 2002,