

文章编号: 1001-4322(2005)04-0537-06

放电参数对毛细管放电泵浦的软 X 射线激光的影响*

彭惠民¹, 郑无敌¹, 杨大为², 赵永蓬³, 程元丽³, 王 骢³

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

3. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 以哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室中的 Marx 发生器的放电脉冲波形为基础, 理论上模拟计算了在不同放电参数下充氙气的毛细管放电产生的等离子体状态和类氙离子 3p—3s 跃迁线的增益系数的时空演变过程。中心模型中, 选取内径为 3.1 mm 的陶瓷毛细管并充入初始密度为 $1.07 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的氙气, 电流脉冲峰值为 27.81 kA, 脉冲宽度为 61.4 ns。改变放电参数进行模拟, 结果表明: 上升前沿越陡, 则增益系数越大, 电流脉冲上升时间在 20~40 ns, 电流峰值在 25~40 kA, 电流脉冲宽度在 50~70 ns 范围内, 毛细管放电产生的等离子体状态比较理想, 可获得较高的增益系数。

关键词: 毛细管放电; 上升时间; 电流脉冲峰值; 脉冲宽度; 软 X 射线激光

中图分类号: O432.1; TN241 **文献标识码:** A

在毛细管放电泵浦的软 X 射线激光实验中, 软 X 射线激光一般出现在电流脉冲上升前沿的中间到峰值之间。出现的早晚与放电参数(上升速度 A/s, 电流峰值)、氙气压强(氙气密度)、毛细管直径(冲击波到心时间)等有关。其中最好是出现在电流峰值时刻, 因为这时毛细管放电的能量利用率最高。过早出现软 X 射线激光信号则说明放电电流峰值过大, 多余的能量会使等离子体过热和过电离, 使得类氙离子丰度下降, 维持增益的时间较短。解决办法是在氙气密度不变的情况下减小放电电流峰值, 或增加毛细管管径, 使等离子体压缩最大的时刻出现在电流峰值附近。如果在放电电流峰值附近没有观测到软 X 激光信号, 通常是由于电流不够大或上升时间过长, 或等离子体压缩不够, 类氙离子丰度不够造成的, 且此后不会再出现软 X 激光信号。解决办法是增加电流峰值和上升斜率或减少毛细管管径。实验和理论模拟表明上升前沿一般应维持在 $2 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{12} \text{ A/s}$ 量级^[1~5]。

获得最佳增益条件是一项逐步接近的过程, 需要经过多次调整实验参数才能得到。我们希望用最小的放电电流获得最高的输出能量。不同的 Marx 放电和传输系统产生的放电电流峰值和上升前沿都会有所不同。

本文以哈尔滨工业大学的 Marx 放电装置给出的放电参数波形^[6]为基础, 探讨在毛细管管径、充氙气密度一定的条件下, 放电参数对产生的等离子体状态和类氙离子中 3p—3s 跃迁线的增益系数的影响, 利用已有的程序^[7,8]进行理论模拟计算, 寻求在现有装置下获得软 X 射线激光的工作范围。

1 放电电流脉冲上升前沿的影响

快速上升的电流脉冲是电子碰撞激发机制成功的关键条件之一。成功实验^[1~5]的电流脉冲从 10% 到 90% 的上升时间为 20~40 ns, 第一半周期 $t_{\text{FWHM}} = 60 \sim 110 \text{ ns}$ 。

本文的计算条件: 陶瓷毛细管内径 $d = 3.1 \text{ mm}$, 毛细管管壁密度 $\rho_w = 4.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 管内氙气初始密度 $\rho_0 = 1.07 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (气压 60 Pa), 管内氙气初始温度 $T_{e0} = T_{i0} = 0.5 \text{ eV}$, 管壁初始温度 $T_{e0w} = 0.025863 \text{ eV}$, 电子热导率取经典值, 粘性系数 $\eta = 20$; 峰值电流 $I_{\text{max}} = 27.81 \text{ kA}$; 上升时间 $t_{\text{rise}} = 20, 24, 26, 28, 29, 31, 32, 34, 40 \text{ ns}$ 。脉冲的尾部相同。初始的真实脉冲分布取自哈尔滨工业大学的实验装置^[6]。

当 $t_{\text{rise}} = 20 \text{ ns}$ 时, 相应的上升斜率为 $1.39 \times 10^{12} \text{ A/s}$, 这是比较高的, 计算结果表明获得增益的时间比较早, 而且增益系数的数值也比较高。图 1(a) 到图 1(h) 给出 $t_{\text{rise}} = 20 \text{ ns}$ 条件下, 从开始出现比较明显的增益后不同时刻的等离子体状态(电子温度和电子密度)和增益系数的空间分布, 显示出增益区状态的演变情况。

上升前沿的陡与缓首先影响增益区出现的早和晚。上升前沿陡, 增益出现时间早, 反之则增益出现晚。当 $t_{\text{rise}} = 20 \text{ ns}$ 时, $t = 30 \text{ ns}$ 开始出现增益, $t_{\text{rise}} = 29 \text{ ns}$ 时, $t = 34 \text{ ns}$ 出现增益, 当 $t_{\text{rise}} = 40 \text{ ns}$ 时出现增益的时间是

* 收稿日期: 2004-07-13; 修订日期: 2004-11-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助课题(60038010), 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 彭惠民(1937—), 研究员, 主要从事 X 射线激光和等离子体物理研究; E-mail: peng_huimin@iapcm.ac.cn.

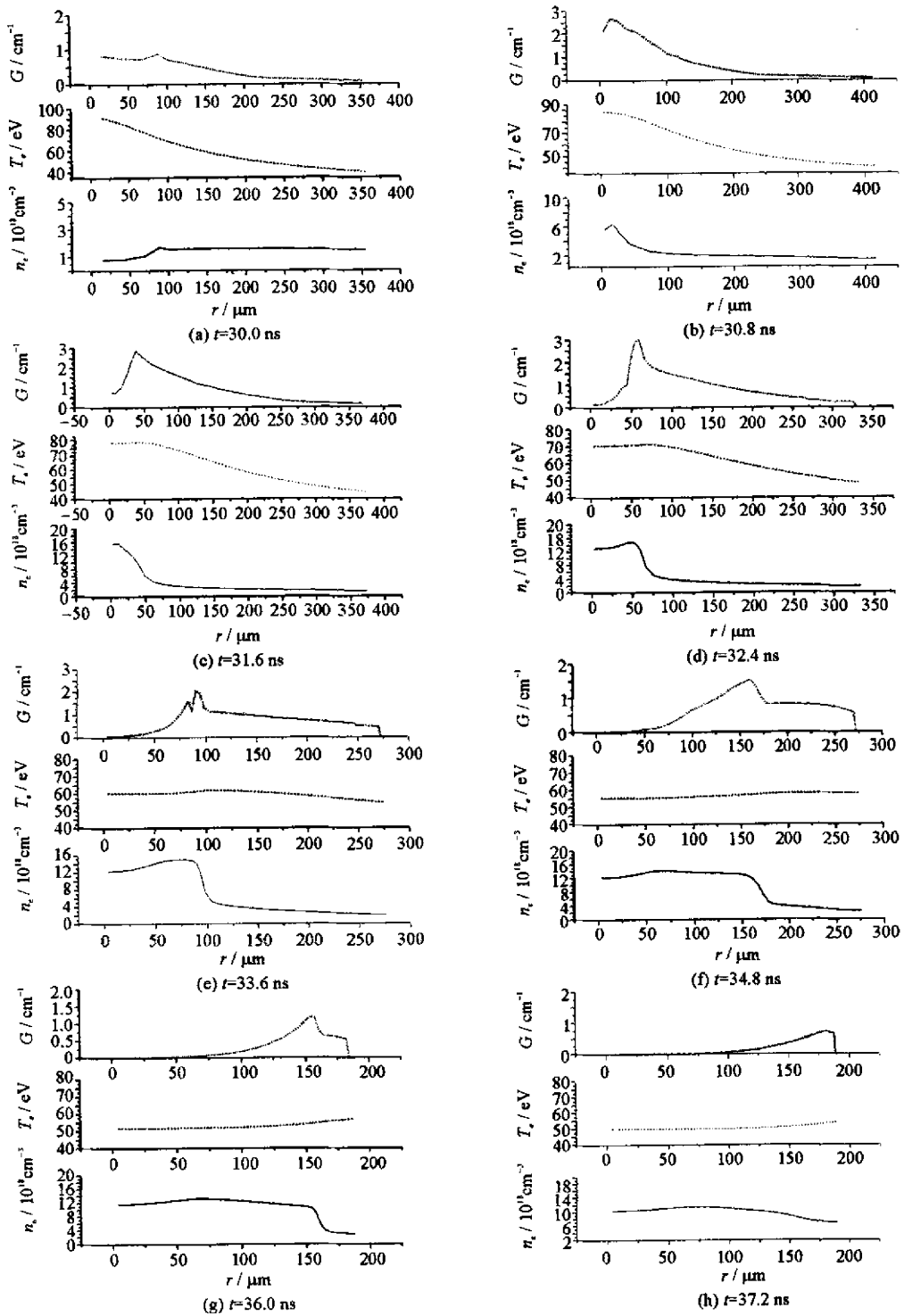


Fig. 1 Spatial distributions of plasma condition and gain coefficient at $t=30.0, 30.8, 31.6, 32.4, 33.6, 34.8, 36.0$ and 37.2 ns

图 1 $t=30.0, 30.8, 31.6, 32.4, 33.6, 34.8, 36.0$ 和 37.2 ns 时刻等离子体状态和增益系数的空间分布

$t=39.2$ ns。原因很明显,电流上升前沿陡,压缩过程也快,获得的最大增益数值高。此外,如果上升时间变长,即上升斜率变小,最大增益数值也相应变小。模拟计算表明 $t_{\text{rise}}=20$ ns 时的最大增益系数是 $t_{\text{rise}}=40$ ns 时的 2 倍。上升前沿快慢对增益区的维持时间有影响但是不大,因为通常电流脉冲宽度较大,而相应的增益区维持时间也比较长,在我们模拟的上升时间范围内增益区的维持时间大约为 10 ns。

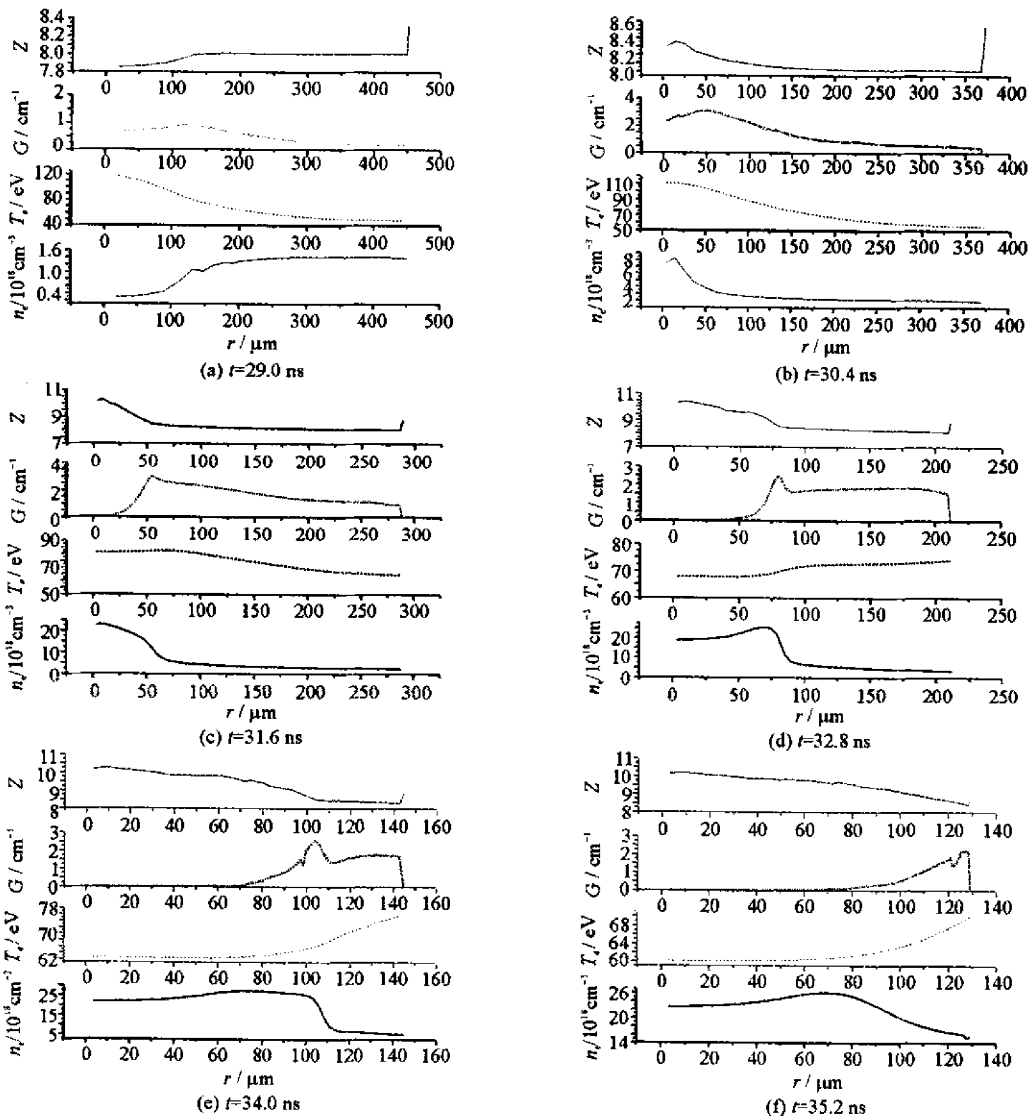
综上所述,毛细管放电的电流脉冲上升前沿是影响等离子体状态的一个重要因素。在给出的模拟计算范围内均会出现增益,但是上升前沿越陡,则增益系数越大。因此实验中应该尽可能地在保证放电电流峰值不变的情况下选取上升前沿陡的放电脉冲。

2 放电电流峰值的影响

计算条件:电子热导率取经典值,脉冲全宽 $\tau_0 = 61.4$ ns, 电流峰值 $I_{\max} = 15, 20, 23, 26, 27.81, 29, 32, 36, 40$ kA,其它参数不变。

当其它参数固定时,只改变峰值电流,等离子体状态的特点是电子温度随着电流峰值的增加而升高。计算表明当 $I_{\max} = 15$ kA 时,最大电子温度约为 35 eV。由于电离度低,没有出现增益。当 $I_{\max} = 20$ kA 时,最大电子温度约为 50 eV,氙气的电离度有所上升,增益区出现的时间较晚,并且增益系数很小,维持时间也短,因为维持能够产生粒子数反转所需的电子温度的持续时间短。当 $I_{\max} = 27.81$ kA,即目前实际波形的电流脉冲峰值时,放电产生的最大电子温度可以达到 76 eV,离子的平均电离度略大于 8,增益区维持时间约为 10 ns(我们用了平均电离度 Z 来反映等离子体中类氙离子所占的比重,通常略大于 8 表示类氙和类氟离子含量丰富)。增益区首先出现在等离子体柱的中心附近,随着时间的延长向外移动。空间增益消失的原因是早期电离度不够,后来则电离过度。增益区范围实际上是一个不断变窄的等离子体圆柱壳层,增益区的厚度与类氙离子区的厚度基本一致,维持时间大约 10 ns。

随着电流峰值的增加,电子温度将进一步上升,增益系数的最大值也会有所上升。若电流峰值比较高,例如 $I_{\max} = 40$ kA,且开始出现增益时, $T_{\max} = 116.8$ eV,在比较宽的空间范围内电子温度在 48~80 eV,而且基本上是电离度 8 附近的离子,因此在较宽的范围内将会出现增益。由于电子温度比较高,容易造成离子过度电离,使得类氙离子份额下降,类氟离子份额上升,从而使增益终止。在图 2 中给出 $I_{\max} = 40$ kA 的条件下不同时刻的等离子体状态和增益系数的空间分布,可以明显地看到演变情况。由于电流峰值高,出现明显增益的时间也提前到 $t = 29$ ns,但是维持时间依然在 10 ns 左右。从图 2(a)和图 2(b)可以看到,刚开始离子的电离度在



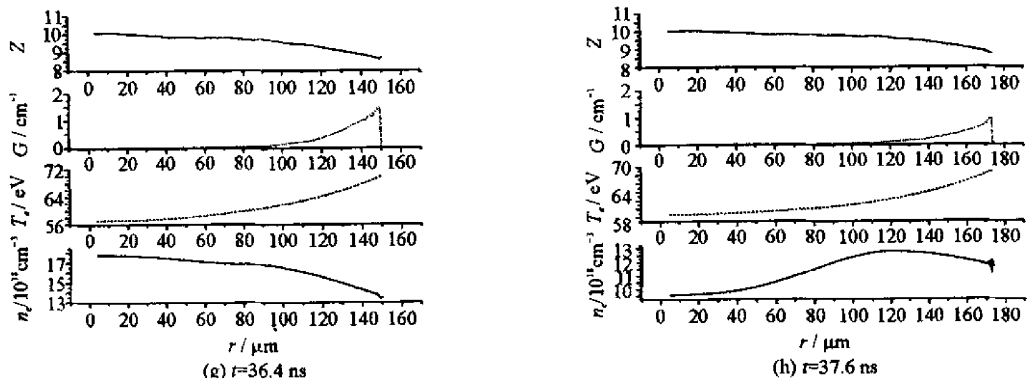


Fig. 2 Spatial distributions of plasma condition and gain coefficient at $t = 29.0, 30.4, 31.6, 32.8, 34.0, 35.2, 36.4$ and 37.6 ns

图 2 $t = 29.0, 30.4, 31.6, 32.8, 34.0, 35.2, 36.4$ 和 37.6 ns 时等离子体状态和增益系数的空间分布

比较宽的范围内维持在 8 附近。最大增益系数出现在电子温度和电子密度较高的区域。图 2(c)和图 2(d)显示了增益系数比较高的区域。从增益区随时间演变的图形可以看到,这个区域的空间范围随着时间的延续不断缩小,因为在这个区域之外,等离子体过电离就变成了类氟离子。增益区是一个厚度约 $100 \mu\text{m}$ 的圆柱壳层,随着时间的延长这个增益区的壳层逐步变薄,最后消失,消失的主要原因是电离过度。所以在一定的条件下并不是放电电流的峰值越高越好。

因此,当其它条件不变,只改变电流峰值时,电流峰值低则电子温度低,如果达不到所需要的温度范围,就不会出现增益。过高的电流峰值会使等离子体的电子温度过高,形成电离度过大的等离子体,也会使增益消失。理论模拟表明:在本文所用的条件下电流峰值在 $25 \sim 40$ kA 范围内应能测量到增益。

3 放电电流脉宽的影响

计算条件:取电流峰值 $I_{\text{max}} = 27.81$ kA, 其它条件同上,脉冲宽度 $\tau_0 = 30, 40, 50, 54, 58, 62, 66, 70$ 和 80 ns。

在放电电流峰值和管内气体初始密度等条件不变的情况下,脉冲宽度与放电脉冲的上升前沿以及总能量有关。脉宽窄则上升前沿陡,压缩过程快,有利于获得较高的增益,但是脉冲窄,总能量少,维持增益的持续时间也相应地变短。计算表明当 $\tau_0 = 30$ ns 时,增益的持续时间在 $4 \sim 5$ ns。由于上升前沿陡,最高电子温度值比较大,电子温度的空间分布比较陡,电子密度的空间分布也不是很理想。随着脉冲宽度的增加,增益区的维持时间也相应增加,例如当 $\tau_0 = 50$ ns 时维持时间为 $8 \sim 9$ ns,当 $\tau_0 = 66$ ns 时维持时间约为 10 ns。但是,随着脉宽的进一步增加,由于峰值固定,所以上升前沿变缓,尽管电子温度的空间分布比较平缓,所能获得的电子温度的最大值还是将下降,最大增益系数数值也将下降。适中的脉冲宽度值在给定条件下选取为 $\tau_0 = 50 \sim 60$ ns。需要指出的是当其它放电条件改变时,最佳值也是要变化的。

图 3 给出放电电流脉冲宽度 $\tau_0 = 50$ ns 时在不同时刻的等离子体状态和增益系数的空间分布演变情况。结果表明:电流脉冲宽度增加后,由于上升前沿下降,出现增益的时刻推后。从图 3(d),3(e)和图 3(f)的电子温度、电子密度和离子的平均电离度的空间分布可以看到,这个期间电子温度在 $50 \sim 70$ eV,空间分布比较平坦,电子密度在 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之间,离子的平均电离度略大于 8,属于比较好的增益区,相应的增益系数值也比较高。这个区域的厚度在 $100 \sim 150 \mu\text{m}$,是比较理想的。

我们计算了放电电流脉冲宽度增加到 80 ns 时不同时刻等离子体状态和类氟氩离子 $3p-3s$ 跃迁线的增益系数的空间分布演变情况。由于放电脉冲的上升前沿变缓,压缩过程也变缓,因此出现增益的时间推后到 $t = 38.8$ ns。虽然最大的电子温度值有所下降,但是电子温度的时空分布比较平坦。增益系数的最大值比脉宽 $50 \sim 60$ ns 的情况有所下降,但是随时空变化比较平缓。刚开始时由于大部分区域电子温度比较低,增益只是在靠近轴心的区域出现,随后由于在大约 $200 \mu\text{m}$ 的厚度内电子温度为 $50 \sim 60$ eV,处于压缩过程中的电子其密度也比较高,对于产生粒子数反转有利,因此产生的增益区也比较宽。因为篇幅所限,没有在文中给出变化曲线。

从图 2 和图 3 中平均电离度 Z 在不同时刻的空间分布可以看出,开始时没有增益或增益小是由于电离不足,随着电子温度和密度的增加,电离过大也会使增益变小或消失。

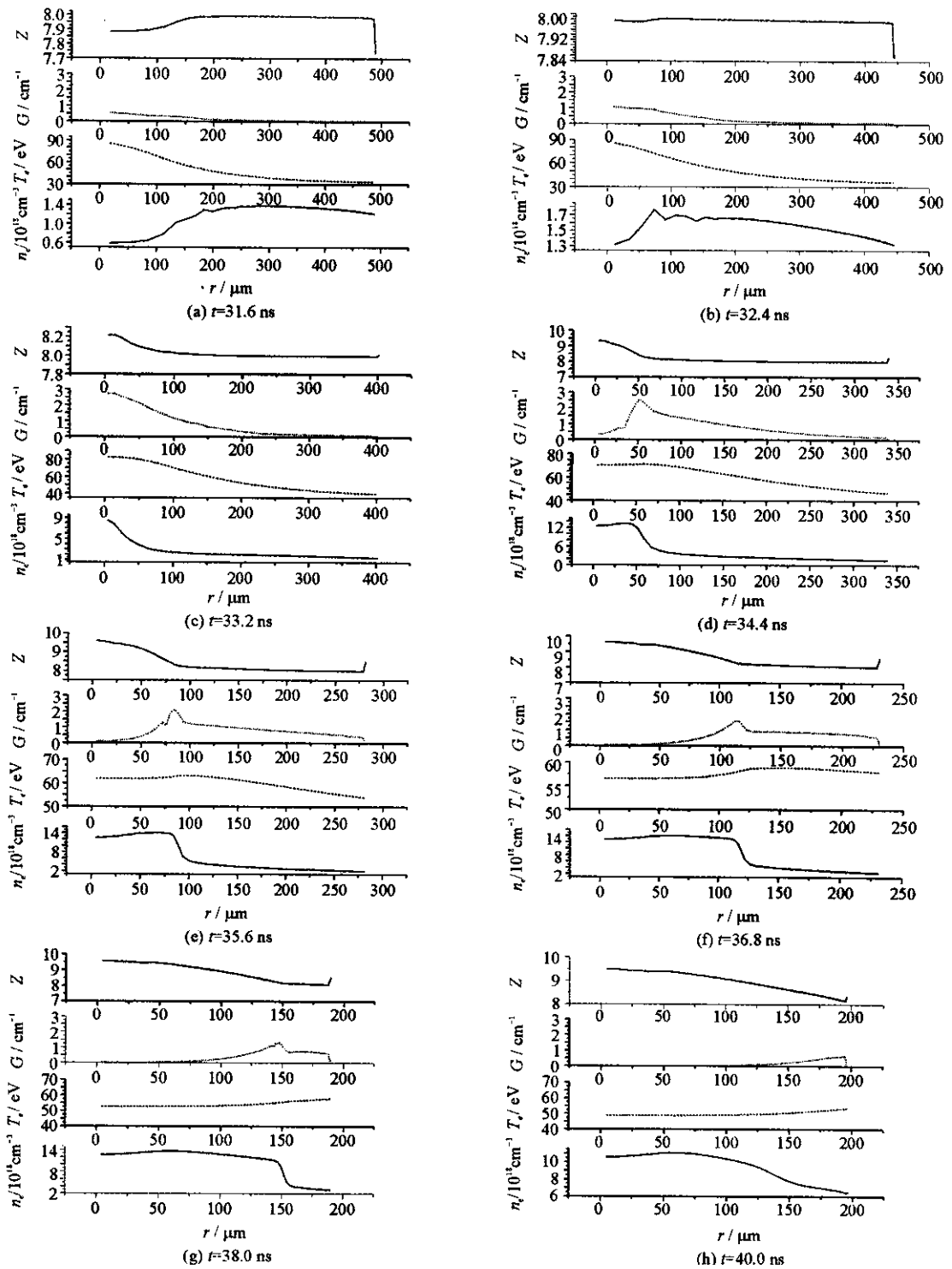


Fig. 3 Spatial distributions of plasma condition and gain coefficient at $t=31.6, 32.4, 33.2, 34.4, 35.6, 36.8, 38.0$ and 40.0 ns

图 3 $t=31.6, 32.4, 33.2, 34.4, 35.6, 36.8, 38.0$ 和 40.0 ns 时等离子体状态和增益系数的空间分布

综上所述,当充气条件和电流脉冲峰值一定时,如果脉冲宽度过窄,则由于总能量不足,增益区维持时间短,电离度不足会使得增益消失;若放电电流脉冲宽度过大,上升前沿过长,由于压缩过程比较平缓,所以产生的增益系数相对较低,但可维持较长时间。在给定的条件下,比较理想的宽度在 $50 \sim 70$ ns, 这时产生的等离子体状态比较理想,对获得较高增益有利。

4 结 论

快速上升的电流脉冲是电子碰撞激发机制成功的关键条件之一。在我们给出的模拟计算范围内均会出现增益,但是上升前沿越陡,则增益系数越大。因此实验中应该尽可能地在保证放电电流峰值不变的情况下选取

上升前沿陡的放电脉冲。

当其它条件不变,只改变电流峰值时,电流峰值低则电子温度低,如果达不到所需要的温度范围,就不会出现增益。过高的电流峰值会使等离子体的电子温度过高,形成电离度过大的等离子体,也会使增益消失。理论模拟表明在本文条件下电流峰值在 25~40 kA 范围内应测量到增益。

当充气条件和电流脉冲峰值一定时,如果脉冲宽度过窄,则由于总能量不足,增益区维持时间短,电离度不够导致增益消失。放电电流脉冲宽度过大,上升前沿过缓,压缩过程比较长,则产生的增益系数相对较低,但是可维持较长时间。在给定的条件下,宽度应在 50~70 ns,这时产生的等离子体状态比较理想,对获得较高增益有利。

需要指出的是,给出的计算结果有助于我们了解放电过程中等离子体状态和增益系数的时间和空间演变情况,掌握物理图像。从定性看不会有原则问题,但是定量上不一定很准确,例如计算出来的增益系数可能普遍偏高。在国外已发表的理论模拟计算文献中,为了拟合实验结果,经常采用人为改变电导率和电子热导率的情况^[7,9],本文中采用经典值,计算结果有所不同。这些情况表明,在理论模拟中,在物理假设、参数和计算方法等许多方面还有不少待解决的问题。

参考文献:

- [1] Nimi G, Sakamoto N, Nakajima M, et al. Study of low current capillary discharge for compact soft X-ray laser[A]. CP641, X-Ray Lasers 2002; 8th International Conference on X-Ray Lasers[C]. Melville, New York, 2002. 103—106.
- [2] Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A, et al. Energy extraction and achievement of saturation limit in a discharge-pumped table-top soft X-ray amplifier[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 1476—1479.
- [3] Rocca J J, Cortazar O D, Szapiro B, et al. Fast-discharge excitation of hot capillary plasmas for soft X-ray amplifiers[J]. *Phys Rev E*, 1993, **47**(2): 1299—1304.
- [4] Rocca J J, Shlyaptsev V, Tomasel F G, et al. Demonstration of a discharge pumped table-top soft X-ray laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **73**: 2192—2195.
- [5] Benware B R, Macchietto C D, Moreno C H, et al. Demonstration of a high average power tabletop soft X-ray laser [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **81**(26): 5804—07.
- [6] 赵永蓬,程元丽,王骥,等. 激励软 X 光激光的毛细管预-主脉冲放电装置[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(6): 733—736. (Zhao Y P, Cheng Y L, Wang Q, et al. Device of capillary discharge with pre-pulse and main pulse to excite soft X-ray laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6): 733—736)
- [7] Lan K, Zhang Y Q, Zheng W D. Theoretical study on discharge-pumped soft X-ray laser in Ne-like Ar[J]. *Phys Plasmas*, 1999, **6**: 4343—4348.
- [8] 郑无敌,彭惠民. 毛细管放电类氩氩 X 光激光中的准稳态增益[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(1): 1—5. (Zheng W D, Peng H M. Quasi-static-state gain in Ne-like Ar capillary discharge pumped X-ray laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1): 1—5)
- [9] Bogrova N A, Balanov S V, Farina D, et al. MHD simulations of plasma dynamics in pinch discharges in capillary plasmas[J]. *Laser and Particle Beams*, 2000, **18**: 623—638.

Influence of discharge parameters on capillary discharge-pumped soft X-ray laser

PENG Hui-min¹, ZHENG Wu-di¹, YANG Da-wei², ZHAO Yong-peng³, CHENG Yuan-li³, WANG Qi³

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China;

2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing 102413, China;

3. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the wave shape of Marx device at National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, the influence of discharge parameters upon the temporal evolution of capillary discharge produced plasmas conditions and the gain coefficient of 3p—3s transition in Neon-like Ar was simulated. In the simulation, argon with a density of $1.07 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ was filled into a ceramic capillary with an inner diameter of 3.1 mm, the peak of the discharge current pulse was 27.81 kA, and the width of the current pulse was 61.4 ns. The results show that the shorter the pulse rise time is, the higher the gain coefficient is. When the pulse rise time is 20~40 ns, the peak of the current pulse is 25~40 ns, and the current pulse width is 50~70 ns, the higher gain coefficient can be obtained.

Key words: Capillary discharge; Rise time; Peak of current pulse; Pulse width; Soft X-ray laser