

文章编号: 0258-702X(2002)02-097-04

毛细管放电激励类氖-氩离子 X 光激光研究

王 骥¹, 程元丽¹, 张新陆¹, 刘 鹏¹, 郑无敌², 彭惠民²

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001

² 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

提要 以类氖-氩离子跃迁线为例, 应用一维的 Lagrangian 程序——XDCH 研究了毛细管放电碰撞机制激励软 X 光激光的物理机制, 对等离子体的 Z-箍缩过程和 46.9 nm 谱线产生增益的条件进行了讨论, 并分析了毛细管放电装置中产生软 X 激光的可能性。

关键词 毛细管放电, 碰撞机制, Z-箍缩

中图分类号 TN 241 **文献标识码** A

Study on Capillary Discharge-pumped Soft X-ray Laser in Ne-like Ar

WANG Qi¹, CHENG Yuan-li¹, ZHANG Xin-lu¹, LIU Peng¹,
ZHENG Wu-di², PENG Hui-ming²

(¹ National Key Lab. of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)
² Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract In this paper the development of capillary discharge soft X-ray laser is introduced. Using XDCH, a one-dimensional Lagrangian magneto-hydrodynamics code, the simulation results of a discharge-pumped $2p^53p \rightarrow 2p^53s$ transition 46.9 nm laser in Ne-like Ar are presented. The physical schemes in Ne-like Ar 46.9 nm laser are also studied. Finally the possibility of generating soft X-ray laser from the home-made setup is discussed.

Key words capillary discharge, collisional excitation, Z-pinch

1 毛细管放电激励类氖-氩离子 X 光激光物理机制

毛细管放电是指在毛细管两端加上快脉冲高压, 导致毛细管中形成等离子体放电通道, 并产生 Z 箍缩效应。Z 箍缩过程中能否产生粒子数反转和激光放大决定于等离子体的状态, 是否具有一定长度、能维持一定时间的均匀等离子体, 并且均匀区内是否满足一定的电子温度、离子温度、电子密度条件。所以, 激光介质的等离子体动力学状态是 X 光激光中十分重要的研究课题。本文将利用 XDCH 程序对毛细管放电抽运类氖-氩离子等离子体动力学过程进行系统的计算和分析。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动力学程序(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 J. J. Rocca 等毛细管放电类氖-氩 X 光激光饱和输出的一组实验参数^[1]进行了数值模拟计算。放电电流为类正弦波形, $I(t) = I_0 \sin(\pi t/T)$, $I_0 = 39$ kA 为电流峰值, $T = 120$ 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。初始条件为毛细管内充满均匀预电离气体和高密度的管壁中性气体。下面给出在选取的实验参数下, 由数值模拟计算结果得出的等离子体状态随时间的变化过程及

收稿日期 2000-09-25; 收到修改稿日期 2001-02-12

基金项目 国家自然科学基金(60038010)重点资助项目和国家 863 高技术资助项目。

作者简介 王骥(1942.3—)男, 山东莱州市人, 教授, 博士生导师, 多年来一直从事毛细管放电和强场感应电离 X 光激光研究。E-mail: qiwang@hope.hit.edu.cn

46.9 nm 谱线增益的产生。

1.1 工作介质处于被箍缩、加热、电离阶段(0 ~ 40 ns)

放电早期(30 ns 前),趋肤效应使得很大一部分电流集中在等离子体表层,由于电流密集,焦耳加热和洛伦兹力作用非常强烈,使该层的温度远高于其他区域,并且形成压缩激波向内推进。随着放电电流迅速上升(30 ns 后),洛伦兹力产生的磁压大于粒子热运动的热压,表层与管壁脱离,等离子体开始向内迅速箍缩,密度增加,温度升高并进一步电离,这时就有可能成为 X 射线激光介质(如图 1 所示)。

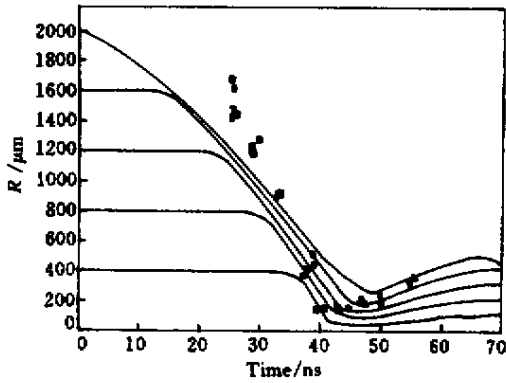


图 1 模拟计算得到的各拉氏点轨迹与实验中观测到的等离子体半径的比较

Fig.1 Comparison of the simulated trajectories of Lagrangian cells in Ar plasma (solid lines) with radius of plasma (square) observed from experiment

计算结果和 J. J. Rocca 等的实验数据在放电最初的 30 ns 之前存在着很大差异,这主要是因为 XDC 程序中采用的是单流体模型(只考虑离子和电子),没有考虑中性粒子对箍缩的影响。事实上在放电初期,毛细管内存在的是大量的中性粒子,电流并不能对其进行有效箍缩,只有当大多数粒子被电离后才能被有效箍缩。J. J. Rocca 等的实验中有毛毛细管管壁的厚度没有公开,而放电电流中有一部分(20% ~ 50%)是烧蚀管壁时被消耗掉,所以毛细管管壁的厚度将对增益有所影响,我们的计算结果增益峰值在 43 ns 左右,比实验值 40 ns 略有延迟。但在 30 ns 后产生激光的关键阶段里,其他的计算结果和实验数据还是非常吻合的。

1.2 等离子体产生 X 光阶段(40 ~ 45 ns)

最初的压缩激波到达轴心,包括中心区域在内的 Ar 等离子体中,电子密度 N_e 和温度 T_e 沿径向的分布存在着很大差别,形成了一个会聚的等离子体

壳层(如图 2 所示),此时壳层内高温、高密度 Ar 等离子体几乎已全部电离为类 Ne 离子,等离子体进入环形增益目标区域,最大增益产生在 117 μm 处。从图 3 中可以看出,激光产生在电子密度和离子温度迅速上升的阶段。在增益区,电子密度 N_e 的值为 $(0.3 \sim 1.7) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,离子温度 50 ~ 120 eV,电子

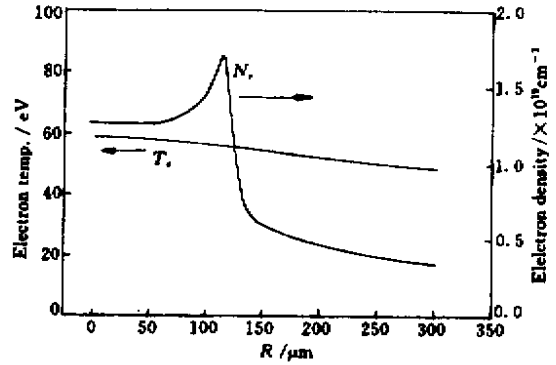


图 2 在增益峰值时刻 N_e, T_e 随拉氏点 R 的变化情况

Fig.2 Evolution of N_e and T_e against position R at the time when the gain reaches the maximum

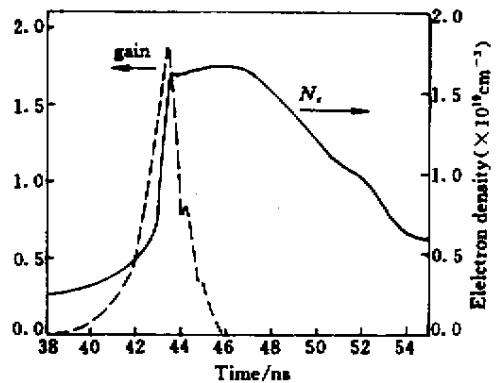
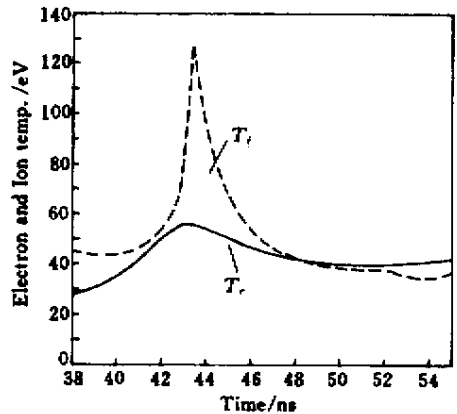


图 3 在增益峰值处 T_e, T_i, N_e 增益 g 随时间的变化

Fig.3 Evolution of T_e, T_i, N_e and gain g against time at the Lagrangian cell which produces the maximum gain

温度 T_e 变化不大,为 50 ~ 60 eV。这些计算数据和实验结果基本吻合^[1]。

对于类氖-氦离子,基态到激发态的能级差为几十电子伏量级,因此要求等离子体的电子温度必须有几十电子伏。电子温度太低, $2p^6$ 基态上的电子难激发到 $3p$ 态上,粒子数反转就无法形成。而离子温度过高,等离子体过电离,将降低类氖离子丰度,减小激光线的增益。所以要得到激光增益和放大,电流脉冲、等离子体内电子和离子的温度、密度、类氖离子丰度等要很好地匹配,才能形成粒子数反转。此外,只有粒子数反转是不够的,还必须使这种均匀等离子体有一定厚度和一定维持时间。从图 4 可以看出 $\lambda^{10,11} \gg \lambda^{9,10}$ ($\lambda^{10,11}$ 是表征从类 Na 离子基态到类 Ne 离子基态的电离速率, $\lambda^{9,10}$ 表征从类 Ne 离子基态

时类 Ne 离子比较难电离到类 F 离子,所以这导致在等离子体里产生了大量的、能长时间存在的类 Ne 离子。

1.3 等离子体膨胀阶段(45 ns 后)

等离子体继续箍缩,直至热压和磁压相等,压缩激波向外反射,等离子体坍塌,而激光输出由于折射的增加、碰撞热损失和过电离等原因减小。由计算得到电子密度和其他自发发射在坍塌时达到最大值,随后等离子体开始膨胀,电子密度开始减小,完成了一次激光输出过程。

通过以上分析可以看出我们的计算结果与 J. J. Rocca 等的实验结果能够比较好地吻合,数值模拟计算结果可以用于描述等离子体柱的整个演变过程和激光产生的动力学过程,为进一步开展实验研究提供了可靠的理论指导。

2 毛细管放电激励软 X 光激光实验装置

我们已经在现有的一台 Marx 发生器的基础上设计建造了一套完整的毛细管放电 X 光激光装置^[2]。实验装置的一般原理方框图见图 5。

Marx 发生器是一种储能设备,用来对脉冲形成线进行脉冲谐振充电,充电时间通常大约为 $1 \mu s$ 左右。脉冲形成线充电到它的峰值电压 90% ~ 95% 时,主开关接通,脉冲形成线提供一个快前沿、短持续时间(20 ~ 100 ns)的脉冲电压加到毛细管负载上,形成快脉冲大电流;毛细管内预电离形成的等离子体在快脉冲大电流的作用下,进行箍缩,形成高密度、高温、高电离度、均匀的等离子体柱,在适当的条件下即可产生软 X 射线的激射。

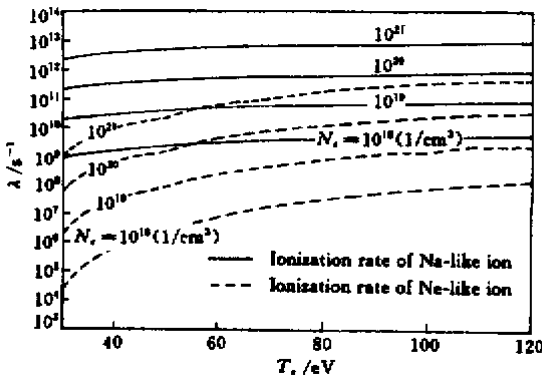


图 4 类氖离子和类钠离子的电离速率随 T_e 的变化

Fig.4 Variation of the ionization rates of Ne-like ion and Na-like ion with T_e

到类 F 离子基态的电离速率,均包括直接过程和间接过程),说明类 Na 离子容易电离到类 Ne 离子,同

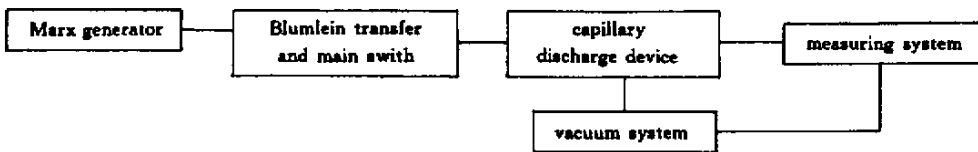


图 5 毛细管放电装置原理框图

Fig.5 Schematic illustration of capillary discharge setup

目前毛细管放电实验装置已基本能稳定运行,各项性能指标基本达到设计值。如图 6 所示,在 Marx 发生器输出电压 190 kV 情况下,充 Ar 毛细管在 67 Pa 时,最大放电电流峰值为 30.4 kA,脉冲前沿 44 ns,半高宽 62 ns。由此估算,Marx 发生器输出

为最大 300 kV 时,放电电流可达 40 kA 以上,完全可以满足抽运软 X 射线激光实验的要求。

而且从 J. J. Rocca 等 1994 ~ 1999 年毛细管放电碰撞机制的实验研究^[2~7]中可以看出,随着激光输出能量的提高($6 \mu J \rightarrow 30 \mu J \rightarrow 1 mJ$),放电条件却降

低了(放电电流:40 kA→39 kA→26 kA;上升前沿:20 ns→40 ns)。我们分析这主要是通过以下几方面改进来实现的:

1) 使用铍平面反射镜,进行双程放大或加大毛细管长度,达到饱和输出。

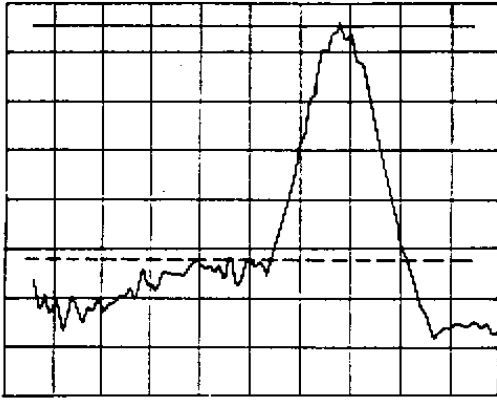


图6 Blumlein 传输线向充氩气毛细管负载放电电流波形

Fig.6 Waveform of charge circuit from Blumlein to capillary filled with Ar plasma

2) 采用预脉冲技术并外加磁场来获得更均匀的等离子体柱。

3) 对能量传输装置进行改进。开始 J. J. Rocca 等采用的是水介质平行板电容器,后来改为 Blumlein 传输线。这主要是因为 Blumlein 传输线电压传输效率高,可以降低对 Marx 发生器的要求。在 1999 年,因为放电电流的要求从 40 kA 降为 26 kA,所以又改回水介质平行板电容器,这一方面可以缩小整个实验装置的体积,另一方面水电容中的水在作为电介质的同时也能冷却毛细管,从而延长了毛细管寿命,使一根毛细管可以放电 5000 次以上。同时由于改为水电容,可以比较容易地实现预脉冲的控制。预脉冲在整个毛细管放电中起着非常重要的作用。

4) 对毛细管的长度、直径、材料、所充氩气压强进行适当的选取,最初 J. J. Rocca 等采用的毛细管参数为长 14 cm,半径 2 mm,充氩气 93 Pa,1999 年采用的参数为长 34.5 cm,半径 1.6 mm,充氩气 60 Pa。因陶瓷材料机械强度比聚缩醛好,能做到更长而不变形,所以后来 J. J. Rocca 等采用了陶瓷毛细管。形成相同电离度、温度、密度的等离子体,毛细管的直径减小,更有利于能量的耦合;所充氩气压强即密度降低,则电离、加热所需能量降低,降低对放电电流的要求,而且密度降低更容易形成均匀的等离子

体柱。可见放电条件与毛细管的材料、长度、直径、所充气体压强是密切相关的,它们之间存在着最佳搭配方案,这由产生激光所需的最佳等离子体状态决定,是实验中所要选取的最关键参数。

3 总 结

XCHD 程序能够比较准确地计算毛细管放电等离子体的箍缩过程和激光输出的参数。根据计算结果将毛细管放电产生 X 光激光分为三个阶段进行了细致分析,从计算的其他几个和以上所选取的模型相近的模型,发现在该模型附近类氩-氩等离子体产生激光的条件是相近的:电子密度 N_e ($0.3 \sim 1$) $\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,电子温度 T_e 约 60 eV。最后,根据我们的实验装置对毛细管放电的结果,分析了其产生软 X 射线激光的可能性并讨论了对实验的进一步改进方案。

致谢 在本文的完成过程中得到蓝可博士的帮助,在此谨表示感谢。

参 考 文 献

- 1 J. J. Rocca *et al.*. Discharge-pump soft-X-ray laser in neon-like argon [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(6): 2547 ~ 2554
- 2 J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16): 2192 ~ 2195
- 3 J. J. Rocca, D. P. Clark, J. L. A. Chilla *et al.*. Energy extraction and achievement of the saturation limit in a discharge-pumped table-top soft X-ray amplifier [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(8): 1476 ~ 1479
- 4 F. G. Tomasel, J. J. Rocca, V. N. Shlyaptsev *et al.*. Lasing at 60.8 nm in Ne-like sulfur ions in ablated material excited by a capillary discharge [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(2): 1437 ~ 1440
- 5 C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of millijoule-level soft-X-ray laser pulses at a 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16): 1115 ~ 1117
- 6 F. G. Tomasel, V. N. Shlyaptsev, J. J. Rocca. Enhanced beam characteristics of a discharge-pumped soft-X-ray amplifier by an axial magnetic field [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(3): 2474 ~ 2477
- 7 J. J. Rocca, C. H. Moreno, M. C. Marconi *et al.*. Soft-X-ray laser interferometry of a plasma with a tabletop laser and a Lloyd's mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6): 420 ~ 422