

Impact of Ar Pressure on Capillary Discharge Soft X-Ray Laser Output*

Xingqiang Zhang¹, Qi Wang²

¹School of Science, Hubei Automotive Industries Institute, Shiyan

²National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin

Email: zhangxingqiang.student@sina.com

Received: Jan. 16th, 2013; revised: Jan. 28th, 2013; accepted: Feb. 4th, 2013

Abstract: Ar pressure was such a key parameter in capillary discharge soft X-ray laser research that it played important role in generating mechanism and output and so on of laser. Through systemic investigation of the impact of Ar pressure on laser output in this article, it was found that the maximum output of laser signal had really been increased from ~17 V to ~18.4 V when Ar pressure went up from 38 Pa to 65 Pa. But the prerequisite was to increase the pre-current pulse and to prolong the delay time between pre- and main-current pulse properly which could make the main-current pulse utilize the better state of pre-ionized plasma adequately and obtain the laser medium with larger gain coefficient. These research works had important significance in optimizing the discharge parameter further and improving the output power of laser and so on.

Keywords: Laser Technique; Capillary Discharge; Soft X-Ray Laser; Laser Output; Ar Pressure

Ar 气气压对毛细管放电软 X 光激光输出的影响*

张兴强¹, 王 骐²

¹湖北汽车工业学院理学系, 十堰

²哈尔滨工业大学, 可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨

Email: zhangxingqiang.student@sina.com

收稿日期: 2013 年 1 月 16 日; 修回日期: 2013 年 1 月 28 日; 录用日期: 2013 年 2 月 4 日

摘 要: Ar 气气压是毛细管放电软 X 光激光研究中的关键参量, 其对激光的产生机理和输出等发挥重要的作用。本文通过系统地研究 Ar 气气压对激光输出的影响, 发现当 Ar 气气压从 38 Pa 升高到 65 Pa 时, 激光信号的最大输出值确实从 ~17 V 提高到 ~18.4 V。但前提条件是适当地增大预脉冲电流, 并适当地延长预 - 主脉冲延时, 使主脉冲电流能够更充分地利用良好的预电离等离子体状态, 获得增益系数较大的激光介质。这些研究工作对进一步优化放电参量, 提高激光的输出功率等具有重要的意义。

关键词: 激光技术; 毛细管放电; 软 X 光激光; 激光输出; Ar 气气压

1. 引言

激光的出现是人类发明史上的大事, 极大地促进了人类社会的发展和文明的进步。正如当年人们从 Maser 向 Laser 进军一样, 获得更短波长的 X 光激光^[1]

始终是人类梦寐以求的向往。X 光激光具有波长短、单光子能量大、光源亮度高、相干性好等优点, 在 X 光激光相干检测、全息、光刻、工业加工、医疗等方面具有重要的应用前景。毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光来源于 Ar⁸⁺。当满足一定的放电条件时, Ar⁸⁺ 的丰度很高, 此时轴向均匀、细长的等离子体柱

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60838005)和哈尔滨工业大学创新团队资助。

成为很好的软 X 光激光增益介质。由此可见, Ar 气气压是影响软 X 光激光输出的关键因素之一。在一定的放电条件下, 升高 Ar 气气压应该获得增强的激光输出。然而在实验中我们发现, 一定的放电条件对应一个最佳的气压值, 高于或低于这个值, 激光输出都会减小, 偏离这个最佳值达到一定的程度, 根本无法输出激光。因此, 系统地分析 Ar 气气压与激光输出的关系对于优化放电参量, 获得较强的激光输出具有重要的现实意义。

2. 毛细管放电 Ar 气的击穿电压分析

采用预-主脉冲方式工作的毛细管放电软 X 光激光装置首先将 Ar 气电离成+1、+2 价的等离子体, 随后经过适当延时的峰值 20~40 kA 的主脉冲电流到来后进一步电离、欧姆加热, 并快速箍缩等离子体, 当等离子体的电子温度达到 60~90 eV、电子密度达到 $(0.5\sim 2) \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 时, 可输出类氩氩 46.9 nm 激光^[2,3]。从产生软 X 光激光的工作过程可见, Ar 气的击穿是输出激光的基础。为此我们首先计算 Ar 气的击穿电压与气压的关系。

毛细管放电通道小, 管壁对电子繁流影响大, 与平板电极放电不受管壁限制不同。考虑到管壁的影响, 通过建立电子繁流方程, 可计算毛细管放电的击穿电压。电子繁流方程^[4]表示为:

$$APde^{-BPd/V_s} - C \frac{d^2}{R^2 V_s^{1/4} (Pd)^{3/4}} = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1)$$

其中 A 、 B 和 C 是与气体性质有关的常数, γ 为正离子打到阴极引起的次级电子发射系数, 也是常数, P 为毛细管内气体的初始气压, d 为气柱长度, R 为气柱的初始半径, V_s 为击穿电压。方程左边第一项表示电子通过长度 d 所产生的电子(离子)数, 第二项表示电子通过长度 d 由于管壁复合引起的电子减少数, 方程右边是常数。

陶瓷毛细管的长度为 15 cm, 内径为 3 mm, 内充 Ar 气, 气压可调。在一定的气压范围内, 由式(1)计算出毛细管放电 Ar 气的击穿电压与气压的关系如图 1 所示。从图中可见, Ar 气在 90 Pa 附近的击穿电压为 181 V, 达到最小值。此时该电压能够引起毛细管内电子定向运动形成电流, 在开始形成电流时, 因电子与气体分子碰撞使分子电离而产生的电子数和正

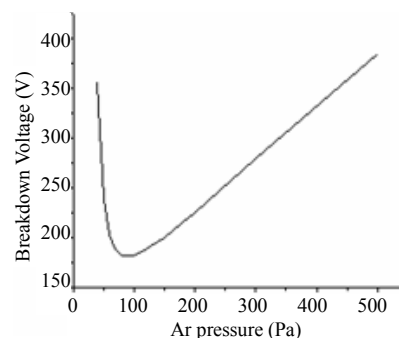


Figure 1. Breakdown voltage vs. pressure of Ar gas in capillary discharge

图 1. 毛细管放电 Ar 气的击穿电压与气压的关系

离子数抵消因管壁复合而损耗的电子数和正离子数, 达到瞬时平衡时, 净电荷数等于方程(1)右边的值, 从而形成电流。升高或降低气压后, 在 181V 的电压下, 电子碰撞电离产生的电荷数不足以克服因管壁复合而损耗的电荷数, 无法形成电流, 此时只能升高电压, 尽量增加电子碰撞电离产生的电荷数。当气压小于 90 Pa 时, Ar 气的击穿电压随着气压的降低而快速增加, 图中只给出 40 Pa 气压时, Ar 气的击穿电压为 355 V, 当气压降低到 30 Pa 时, Ar 气的击穿电压迅速增加到 1204 V, 而当气压降低到 20 Pa 时, Ar 气的击穿电压提高到 73,754 V, 10 Pa 的 Ar 气理论上很难击穿。当气压大于 90 Pa 时, Ar 气的击穿电压随着气压的升高缓慢增加, 图中只给出了 500 Pa 气压时, Ar 气的击穿电压为 384 V, 当气压升高到 1000 Pa 时, Ar 气的击穿电压仅增加到 630 V。即使气压分别升高到 10,000 Pa 和 50,000 Pa, Ar 气的击穿电压也分别只有 4042 V 和 16,267 V。

在实际的毛细管放电装置上, 由于接触电势的存在, Ar 气的实测击穿电压相对于理论曲线要整体抬升。在最佳易穿气压值附近, Ar 气的击穿电压实验值至少约 1500 V 左右, 相对于 181 V 的理论值扩大了近 10 倍, 其它气压所对应的击穿电压也有不同程度的提高。此外, 毛细管放电不同于平板电极或其它形状的电极放电, 毛细管放电过程中, 内壁涓流弥补了管内气压的不足, 使理论曲线整体向左移动。因此, 在实验中毛细管内 Ar 气的最佳易穿气压值大约在 40 Pa 附近, 理论曲线受涓流的影响向左平移了大约 50~60 Pa。毛细管放电装置的击穿电压随气压的实验关系是将理论曲线向左上方进行了移动, 具体数据需要在实验中验证。

在实验操作中, 我们很少利用图 1 中 90 Pa 以下的气压进行工作。一方面击穿电压随气压的变化率较大, 气压微小的波动也会影响到击穿电压的剧烈变化, 这对于预电离等离子体的状态非常不利, 最终影响到激光的输出。另一方面气压低, 最终参与发光的 Ar^{8+} 的丰度不高, 对激光的输出也不利。因此, 在实验操作中, 利用 90 Pa 以上的气压进行工作, 有多方面的好处: 1) 当气压大于 90 Pa 时, 击穿电压随 Ar 气气压的变化线性度较好, 这便于分析激光输出与气压的关系; 2) 当气压大于 90 Pa 时, 击穿曲线比较平缓, 气压微小的波动不会引起激光输出的剧烈变化, 有利于实验观察和现象分析; 3) 当气压大于 90 Pa 时, 参与发光的 Ar^{8+} 的丰度增加, 激光介质的增益系数提高, 对于相同的等离子体柱长度, 激光输出必然增大, 这有利于实验研究。

3. 实验研究

在一定的放电条件下, 我们已经研究了激光强度与 Ar 气气压的关系。发现 38 Pa 气压时输出了~17 V 的激光信号, 而 65 Pa 气压时几乎没有激光输出^[5]。以预-主脉冲方式工作的毛细管放电软 X 光激光装置, 预脉冲电压维持在 15 kV, 脉宽 9 μs , 电流大小可调。高的预脉冲电压一方面可以确保毛细管内的 Ar 气能被击穿, 在更大的气压范围内可调; 另一方面在适宜的气压条件下, 预脉冲电路的总阻抗一定, 高的预脉冲电压可获得较大的预脉冲电流, 预脉冲电流的较强磁场有利于预电离等离子体柱的轴向稳定性, 为主脉冲电流的到来提供电流较大、轴向稳定的预电离等离子体, 有利于激光的输出。

实验中保持毛细管长度和内径不变, 预-主脉冲延时根据需要进行调节, 维持在微秒量级^[6]。将预脉冲电流从 20 A 升高到 25 A, 主脉冲电流峰值从 39 kA 升高到 40 kA, 研究 Ar 气在 38 Pa 和 65 Pa 气压下激光输出的情况。不同气压下的激光输出和主脉冲电流波形如图 2 所示, 从图中可见, 两种气压下主脉冲电流的峰值均为 40 kA, 所不同的是在 38 Pa 气压下, 调节预-主脉冲延时, 当延时达到~6 μs 时, 获得最大的激光输出值为~17 V, 如图 2(a)所示; 而在 65 Pa 气压下, 当预-主脉冲延时调节到~10 μs 时, 获得最大的激光输出值为~18.4 V, 如图 2(b)所示。

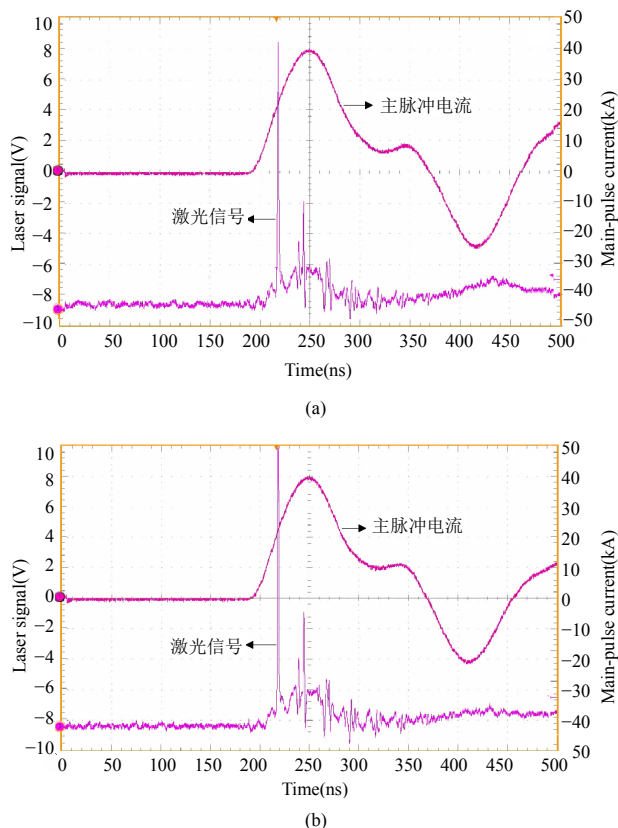


Figure 2. Laser signal and main-current pulse at different pressure (a) 38 Pa, delay time ~6 μs ; (b) 65 Pa, delay time ~10 μs
图 2. 不同气压下的激光信号和主脉冲电流波形(a) 38 Pa, 延时~6 μs ; (b) 65 Pa, 延时~10 μs

4. 结果与分析

从上面的实验中可以看出, 当 Ar 气气压从 38 Pa 调节到 65 Pa 时, 可以获得较强的激光输出。为此需要调节预脉冲电流和预-主脉冲延时等放电参量。

在两种不同的气压条件下, 毛细管内 Ar 气的密度不同。由于 46.9 nm 软 X 光激光来源于 Ar^{8+} 的 $2p^5 3p \sim 2p^5 3s$ 能级跃迁, 38 Pa 是 Ar 气的易穿气压, 较小的电压就可以将 Ar 气击穿, 在这种情况下, 适当调节预-主脉冲延时, 维持合适的主脉冲电流, 就可以输出较大的激光信号。在 65 Pa 气压条件下, 气体密度越大, 气柱越不易击穿, 但 15 kV 的预脉冲电压可以轻易将其击穿。此时适当增加预脉冲电流, 两种相差不大的气压条件下, 毛细管内壁的涓流基本相同, 预脉冲电流的增加部分主要流经预电离等离子体, 这样预电离等离子体电离更加充分, 由预电离等离子体作为载体的预脉冲电流增大, 产生的磁场也增强, 这种磁场对预电离等离子体起镇静和稳定作用。

因此, 在 65 Pa 气压下, 通过增大预脉冲电流, 可以获得更稳定、轴向更均匀、电离状态更好的预电离等离子体, 经过~10 μs 的延时, 强大的主脉冲电流到来后, 可以将预电离等离子体箍缩到增益系数更高的等离子体状态。图 2 中观察到 65 Pa 气压的激光输出高于 38 Pa 气压的现象, 充分说明了前者的增益系数较大。

图 2 中两种气压条件下, 主脉冲电流的峰值都是 40 kA, 电流上升沿~55 ns。激光在上升沿的~28 ns 处产生, 上升沿的剩余部分对激光输出没有影响, 因此, 主脉冲电流峰值 39 kA 或 40 kA 都可以产生激光输出。这里重要的是主脉冲电流的上升沿, 上升沿太慢, 洛伦兹力对等离子体作用产生的磁压力增加较慢, 在箍缩过程中要克服等离子体热压力的作用, 不可能将预电离等离子体快速箍缩成激光增益介质; 上升沿太快, 开始磁压力远大于热压力, 等离子体先被箍缩到很小的直径, 直到两种力达到瞬时平衡, 随后巨大的热压力反抗磁力的作用, 使等离子体向外急剧膨胀, 直到热压力减小到等于磁压力时, 达到瞬时平衡。接着开始下一周期的振荡。这样预电离等离子体在箍缩过程中会因磁压力和热压力的剧烈作用而产生振荡, 不利于激光增益介质的形成。在两种气压条件下, 因主脉冲电流的上升沿相同, 其对 38 Pa 和 65 Pa 气压的作用基本相同。然而后者的气体密度较大, 单位体积内 Ar^{8+} 离子的丰度较高, 形成的激光介质的增益系数较大, 输出激光信号较强。

在 65 Pa 气压条件下, 20 A 的预脉冲电流和~6 μs 的预-主脉冲延时不能产生激光信号。主要的原因是: 1) 相对于 38 Pa 的气压来说, 此时的预脉冲电流较小, 无法提供比较理想的预电离等离子体状态。毛细管内壁的涓流对两种气压的影响基本相同, 可以不考虑。65 Pa 气压比 38 Pa 气压升高不少, 两者的气体密度不同, 气体稀薄时, 20 A 的预脉冲电流经过预电离等离子体, Ar^+ 和 Ar^{2+} 离子的浓度较高, 而当气体稠密时, 20 A 的预脉冲电流经过预电离等离子体, Ar^+ 和 Ar^{2+} 离子的浓度明显降低。两种情况下, 气体都不可能完全电离, 随后到来的主脉冲电流将预电离等离子体进一步电离成各种电离价的终态等离子体, 如果 Ar^{8+} 离子的丰度较高, 则产生激光的可能性较大。在 65 Pa 气压下, 主脉冲电流主要用于电离预脉冲电流还没有来得及电离的中性 Ar 原子和进一步电离低价

离子。能够电离达到 Ar^{8+} 的离子数量不会太多, 因此不能形成较好的激光增益介质。2) 即使 20 A 的预脉冲电流可以将 65 Pa 的 Ar 气充分电离成 Ar^+ 和 Ar^{2+} 离子。当预-主脉冲延时~6 μs 时, 预脉冲还没有来得及将 Ar 气充分电离, 主脉冲电流已经到来, 此时由于预电离等离子体的状态不佳, 主脉冲电流也不可能进一步将预电离等离子体电离成较好的激光增益介质。此时, 也难以产生激光输出。在不同的气压下, 预-主脉冲延时有一个最佳值, 可以产生较大的激光输出。而对于一定的气压而言, 存在一个最佳延时值, 可产生最大的激光输出, 当延时小于该值时, 预电离等离子体来不及充分电离; 当延时大于该值时, 充分电离的预电离等离子体已经开始坍塌、弥散和复合等。这两种情况都不利于主脉冲电流的工作。

在 65 Pa 气压条件下, 适当增加预脉冲电流, 可以充分电离 Ar 气, 产生较好的预电离等离子体状态, 由于此时气体密度增大, 充分电离 Ar 气所需时间延长, 因此, 适当增大预-主脉冲延时, 可以使主脉冲电流尽可能充分利用预电离等离子体的良好状态, 形成增益系数更大的激光增益介质。图 2 中将预脉冲电流从 20 A 提高到 25 A, 预-主脉冲延时从~6 μs 提高到~10 μs , 观察到较大的激光输出, 说明在 65 Pa 气压条件下, 激光介质的增益系数确实提高了。但激光信号仅增加了~1.4 V, 这是因为两种气压的差别不太大。如果进一步升高 Ar 气气压, 并优化预脉冲电流和预-主脉冲延时等参量, 激光信号应明显增强。由于实验装置的限制, 在更高的气压条件下研究激光的输出情况无法进行。国外有过这方面的报道, 在 100~200 Pa 的气压条件下, 产生了更大的激光输出或得到了更短波长的激光^[7,8]。由此可见, 研究 Ar 气气压对激光输出的影响是一件非常有意义的工作。

5. 结论

毛细管放电软 X 光激光输出实验中, 升高 Ar 气的气压, 适当增加预脉冲电流, 可以获得状态良好的预电离等离子体; 同时适当延长预-主脉冲延时, 可使主脉冲电流充分利用良好的预电离等离子体状态, 最终产生了增益系数更大的激光介质。这些研究工作不仅有利于毛细管放电参量的优化和激光器的稳定运行, 而且对提高激光输出功率和探索气压条件等都

发挥了积极的作用。

参考文献 (References)

- [1] J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel, et al. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser. *Physical Review Letters*, 1994, 73(16): 2192-2195.
- [2] X. Q. Zhang, Y. L. Cheng and Q. Wang. Characteristics of a Ne-like Ar 46.9-nm soft X-ray laser in capillary discharge at a low Ar pressure. *Laser Physics*, 2008, 18(8): 958-961.
- [3] 张兴强, 程元丽, 王骐等. 主开关改进对毛细管放电软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 324-327.
- [4] 黄宗琳, 王欲知. 毛细管放电着火特性的研究[J]. *电子学报*, 1985, 13(1): 72-80.
- [5] 张兴强, 王骐. 毛细管放电类氩 46.9 nm 软 X 光激光谱线的分辨[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2011, 25(2): 53-56.
- [6] 张兴强, 程元丽, 王骐等. 延时对毛细管放电类氩 46.9 nm 软 X 射线激光的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 363-366.
- [7] G. Niimi, M. Nskajima, A. Okino, et al. Development and characterization of a low current capillary discharge for X-ray laser studies. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(2): 616-621.
- [8] J. J. Gonzalez, M. Frati and J. J. Rocca. High-power-density capillary discharge plasma columns for shorter wavelength discharge-pumped soft-X-ray lasers. *Physical Review E*, 2002, 65: 026404-1-026404-9.