

文章编号: 0258-7025(2008)03-0363-04

延时对毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光的影响

张兴强 程元丽 王 骥 勾宏刚

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了预、主脉冲延时这一敏感参量在低气压下对毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光的影响。实验表明, 采用长度 20 cm (钨电极长 4 cm), 直径 3 mm 的陶瓷毛细管, 当主脉冲电流峰值稳定在 20~21 kA, 氩气气压为 38 Pa 时, 激光输出对应的预、主脉冲延时范围为 $2.5 \mu\text{s} < \tau < 12.5 \mu\text{s}$, 获得较大激光输出的延时范围为 $3.5 \mu\text{s} < \tau < 8.5 \mu\text{s}$, 延时 5.8 μs 时获得了最大的激光输出。随着气压的缓慢增加, 出现最大激光输出的延时也逐渐增大。实验也证实了不同的气压有其特定的延时范围, 但差别较小。

关键词 激光技术; 预-主脉冲延时; 毛细管放电; 软 X 光激光; 激光输出

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Influence of Delay Time on Ne-Like Ar 46.9nm Soft-X-Ray Laser in Capillary Discharge

Zhang Xingqiang Cheng Yuanli Wang Qi Gou Honggang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The impact of the sensitive parameter of the delay time between pre- and main-current pulse on emission of Ne-like Ar 46.9 nm soft-X-ray laser in capillary discharge at low Ar pressure was investigated. The results indicate that, for ceramic capillary channel with 20 cm in length (4 cm long electrode) and 3 mm in diameter, when the main current pulse spike and Ar pressure were stabilized at 20~21 kA and 38 Pa respectively, the delay time τ of lasing locates in the range of $2.5 \sim 12.5 \mu\text{s}$ which included the optimal smaller range of $3.5 \sim 8.5 \mu\text{s}$ with relatively larger emissions. And at delay time of 5.8 μs there is the biggest laser output. Furthermore, the delay time with the maximum laser output increases gradually with Ar pressure. More detailed experiment afterwards proves that a definite Ar pressure gives out its own delay time range which generates neglectable difference with nearby delay time ranges.

Key words laser technique; delay time between pre- and main-current pulse; capillary discharge; soft-X-ray laser; laser output

1 引 言

1994 年 Rocca 等^[1]采用电子碰撞抽运机制首次实现了毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光; 采用镀铍反射镜实现双程放大, 输出激光能量 30 μJ ^[2]; 采用长度 34.5 cm 的陶瓷毛细管, 获得了重

复频率 4 Hz, 平均能量 0.88 mJ 的激光饱和输出^[3]。此后 A. Ben-Kish 等^[4]和 Hotta 小组^[5]也分别获得了软 X 光激光输出。哈尔滨工业大学^[6~9]在国内首次成功实现了 X 光激光输出, 开展了小型、台式、高效、经济适用的软 X 光激光及其应用^[10,11]的研究。

收稿日期: 2007-06-25; 收到修改稿日期: 2007-10-09

基金项目: 国家 863 计划(2002AA84ts23), 国家自然科学基金(60038010)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介: 张兴强(1969—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事毛细管放电软 X 光激光和毛细管放电 Z 箍缩 EUV 光刻光源的研究。E-mail: zhangxingqiang_student@sina.com

导师简介: 王 骥(1942—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事短波长激光, X 光激光及激光空间信息技术的研究。E-mail: qiawang@hope.hit.edu.cn

研究往往侧重于高压下的实验而低压下的基础实验相对不足。虽然低压下的激光输出较小,但其工作参数要求不高,不仅降低了对放电装置的要求,而且为高压下的激光实验打下了基础。毛细管放电软 X 光激光的依赖参数很多,大致可以分为迟缓类、反应类和敏感类,预、主脉冲延时属于第三类。研究延时对出光的影响可以优化参数,提高激光的输出效率;通过实验数据的分析,可改进实验装置,便于开展进一步的实验。

2 预、主脉冲延时的作用

毛细管放电软 X 光激光装置如图 1 所示,按功能可以分为四部分:1) 储能部分。包括一个快速高压电脉冲 10 级马克斯(Marx)发生器、直流高压电源、触发装置;2) 低电感回路部分。包括布鲁姆林

(Blumlein)传输线、主开关、充气系统;3) 毛细管及预脉冲电路部分。包括可调前置脉冲开关、毛细管放电室、真空系统、充气系统、充电电源、预脉冲发生线圈、延时触发电路及预脉冲隔离线圈;4) 真空及检测系统部分。包括 X 射线二极管(XRD)探测装置、真空系统、真空差分装置及示波器。

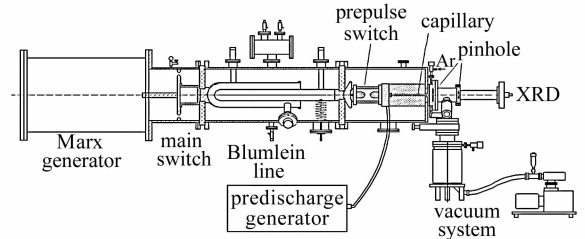


图 1 毛细管放电软 X 光激光装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of capillary discharge soft X-ray laser

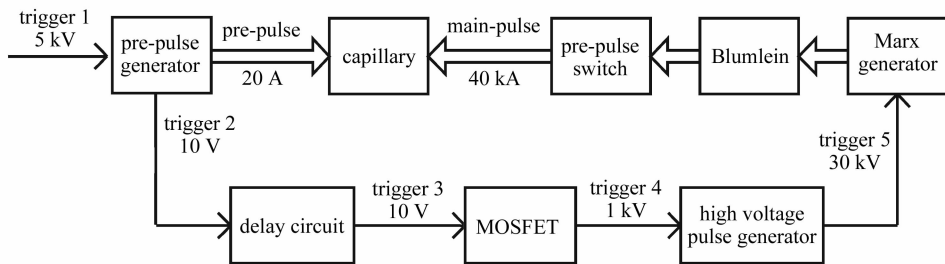


图 2 预、主脉冲放电的工作原理示意图

Fig. 2 Schematic illustration of pre- and main-pulse discharge operation

毛细管放电实验装置采用预、主脉冲工作方式,原理如图 2 所示。毛细管内充入一定气压的氩气,幅值 20 A,脉宽 $9 \mu\text{s}$ 的预脉冲将氩气电离成 +1, +2 价的比较均匀的等离子体。同时输出一路信号,经延时电路和场效应管(MOSFET)触发高压脉冲发生器,高压脉冲发生器的输出信号触发马克斯发生器的火花隙开关,使并联充电的电容串联放电输出高压。该输出电压对布鲁姆林传输线充电,当充电电压在 $1 \mu\text{s}$ 左右达到峰值电压的 90%~95% 时主开关导通,经布鲁姆林传输线整形的主脉冲电流击穿毛细管,该电流峰值可达 40 kA 以上,延时 20~100 ns。当主脉冲电流流过毛细管时有大电流产生的自磁场作用,使预电离等离子体向轴心箍缩。通过箍缩过程中的加热效应,等离子体进一步电离,温度急剧升高,最终电离成大量类氩离子,在合适的电子温度、密度和离子温度下,实现类氩 46.9 nm 软 X 光激光输出。

预脉冲对激光的产生具有重要作用:1) 将氩气预电离成 +1, +2 价的等离子体,为主脉冲的正常

工作做好铺垫;2) 使预电离等离子体与毛细管内壁快速分离,减少管壁烧蚀和碎屑产生;3) 使产生的等离子体具有较好的均匀性、稳定性和对称性,有利于激光的产生。有了预脉冲产生的等离子体,预、主脉冲延时决定着主脉冲的施加时刻是否合适。延时较长时,预电离等离子体在主脉冲到来前已基本膨胀、复合、弥散而消失,那样就失去了预电离的作用,过长的延时不利于主脉冲产生激光;延时较短时,在主脉冲到来前预电离等离子体还未充分形成,此时预电离等离子体的电离度和稳定性都不利于主脉冲的正常工作,太短的延时也不利于产生激光。延时存在一个最佳范围,通过实验研究,既可以确定激光输出的最佳延时,也可对一些参数进行优化以利于获得较大的激光输出。

3 实验结果及讨论

实验采用长度 20 cm(钨电极长 4 cm),内径 3 mm 的氧化铝陶瓷毛细管。毛细管内的氩气在高压的作用下开始电离,气柱电阻在击穿起始阶段

较大,随着电离过程的加剧,末态电阻非常小,可忽略不计。气柱电感在电离及箍缩过程中不断增大。毛细管的阻抗由系统固有电阻、气柱电阻和感抗项组成,在电压一定的条件下,阻抗决定了放电电流的峰值及上升沿,直接影响到等离子体的状态,从而决定能否产生激光。钼电极的作用是为了补偿气柱长度减小而损失的电感,从而使电路的阻抗达到产生激光的要求。

马克斯发生器最大可提供 300 kV 的输出电压,预脉冲电流控制在 20 A,主脉冲电流稳定在 20 kA 左右,预、主脉冲延时可调,氩气压可调。为便于研究延时对激光的影响,应先找出激光输出对应的最好气压。在其他参数稳定的条件下,改变氩气气压,测得了一些激光输出的值,如图 3 中的小方框。数据点是每个气压下最大的三次激光输出,抛物形曲线是激光输出的拟合。从图中可见,最大激光输出发生在 38 Pa 左右。

确定激光输出的最佳气压 38 Pa 后,改变预、主

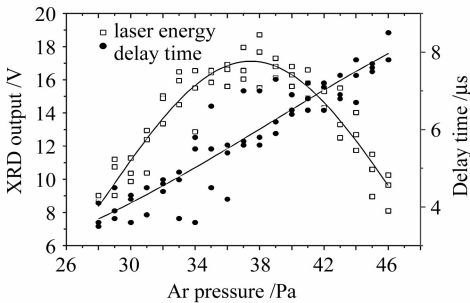


图 3 电流 20 kA 时激光输出及延时随气压的变化
Fig. 3 Laser output and delay time versus Ar pressure for 20 kA

表 1 不同延时条件下输出激光对应的参数

Table 1 Parameters corresponding to laser output under different delay time conditions

Alphabetical	Delay time / μs	Current spike /kA	Current rise time /ns	Position of laser /ns	Laser spike /V	Laser pulse width /ns
(a)	3.5	20.5	55	20.4	5.12	1.67
(b)	4.6	21	54	18.97	12.32	1.69
(c)	5.6	20.5	57	19.38	17.68	1.63
(d)	5.8	21	56	17.84	18.72	1.7
(e)	7.0	20	53	18.13	15.52	1.6
(f)	8.5	20	56	22.5	6.64	1.7

通常与激光输出有关的是主脉冲电流的第一个峰的幅值和上升沿,电流峰值已换算成真实电流。从表 1 可以看出,电流峰值稳定在 20~21 kA,上升沿稳定在 55 ns 左右,出光位置基本在主脉冲之后的 20 ns 左右,输出激光的脉宽 ~1.7 ns。延时较短

脉冲延时,测得了一些激光输出的值。图 4 是氩气压 38 Pa 时,在示波器上显示的不同预、主脉冲延时对应的主脉冲电流((a)~(f)的上面曲线)和光电二极管输出激光((a)~(f)的下面曲线)的波形。

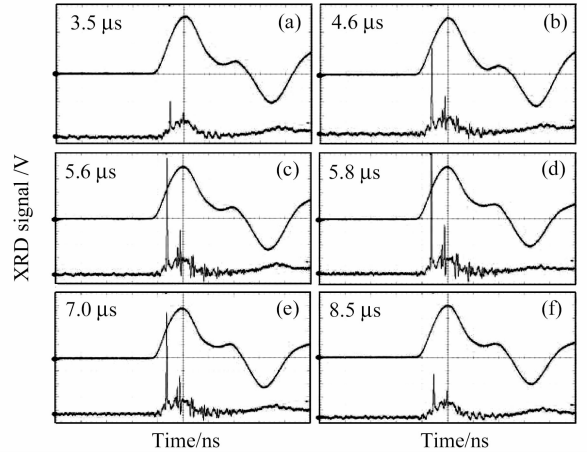


图 4 不同延时对应的主脉冲电流及光电二极管输出激光的波形

Fig. 4 Waveforms of the main currents and XRD output for different delay times

为便于比较与分析,将不同延时对应的出光参数列于表 1。从表中可见,预、主脉冲延时为 5.8 μs 时获得了最大的激光幅值 18.72 V,延时 3.5 μs 时激光幅值仅 5.12 V,延时 8.5 μs 时激光幅值降低到 6.64 V。经过反复实验,当预、主脉冲延时 $\tau \leq 2.5 \mu\text{s}$ 或 $\tau \geq 12.5 \mu\text{s}$ 时激光输出很弱或不可测。对于 38 Pa 的气压,只有在 $2.5 \mu\text{s} < \tau < 12.5 \mu\text{s}$ 的延时范围内工作时,才有可测的激光输出,而延时在 $2.5 \mu\text{s} < \tau < 3.5 \mu\text{s}$ 及 $8.5 \mu\text{s} < \tau < 12.5 \mu\text{s}$ 之间时激光输出相对较小。

(4.6 μs) 时,激光幅值 12.32 V;延时较长 (7 μs) 时,激光幅值 15.52 V,这些都是比较大的激光输出,延时 5.8 μs 时激光输出达到最大值 18.72 V,高于延时偏长或偏短的情形。

预、主脉冲延时反映了预电离等离子体对主脉

冲的影响。延时低于 $3.5\ \mu\text{s}$ 时,预电离等离子体还未充分电离和均匀,而延时高于 $8.5\ \mu\text{s}$ 时,预电离等离子体的电离度和稳定性已开始下降,这两种情况都不利于主脉冲到来时产生较大的激光输出。若延时 $\tau \leq 2.5\ \mu\text{s}$,毛细管中的氩气还没开始电离或刚开始电离,主脉冲已经到来,这时很难产生激光,延时 $\tau \geq 12.5\ \mu\text{s}$ 时,预电离等离子体已经基本复合,预脉冲失去应有的作用,也难以输出激光。

图3也显示了不同气压下激光输出对应的延时,直线是延时的拟合,从图中可以看出,随着气压的升高,延时逐渐增大,基本呈线性上升趋势。这也表明气压升高时,气体不易箍缩而使箍缩过程变得缓慢,从而增大了延时。进一步的实验也证实了不同气压有特定的延时范围,但与邻近气压的延时范围比较,差别较小。

4 结 论

实验表明,主脉冲电流峰值稳定在 $20\sim 21\ \text{kA}$,氩气气压 $38\ \text{Pa}$,预、主脉冲延时范围为 $2.5\ \mu\text{s} < \tau < 12.5\ \mu\text{s}$ 时可测得激光输出,在更小的延时范围 $3.5\ \mu\text{s} < \tau < 8.5\ \mu\text{s}$ 内可测到较大的激光输出。随着气压的升高,最大激光输出对应的延时逐渐增大。不同气压有一定的延时范围,但与邻近气压的延时范围比较,差别很小。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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.*, 1999, **77**(8):1476~1479
- 3 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
- 4 A. Ben-Kish, R. A. Nemirowsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers [C]. *SPIE*, 1999, **3776**:166~174
- 5 Gohta Niimi, Yasushi Hayashi, Mitsuo Nakajima *et al.*. Observation of multi-pulse soft X-ray lasing in a fast capillary discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**:2123~2126
- 6 Cheng Yuanli, Zhao Yongpeng, Gao Yingjian *et al.*. Study on low pressure discharge character of capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):43~48
程元丽,赵永蓬,高英建等. 低气压毛细管放电特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):43~48
- 7 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Wu Yinchu *et al.*. Experimental investigation of lasing condition for soft X-ray laser pumped by capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1189~1192
栾伯哈,赵永蓬,吴寅初等. 对毛细管放电抽运软 X 光激光产生条件的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1189~1192
- 8 Zhao Yongpeng, Li Yan, Xie Yao *et al.*. Influence of the main-switch of the capillary discharge setup on soft X-ray laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1176~1180
赵永蓬,李岩,谢耀等. 毛细管放电装置主开关结构对产生软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1176~1180
- 9 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli *et al.*. Influence of the inherent pre-pulse of Blumlein transmission line on soft X-ray laser pumped by capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):163~165
栾伯哈,赵永蓬,程元丽等. 毛细管放电产生软 X 光激光的稳定输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):163~165
- 10 J. J. Rocca, E. C. Hammarsten, E. Jankowska *et al.*. Application of extremely compact capillary discharge soft x-ray lasers to dense plasma diagnostics [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(5):2031~2038
- 11 Maria G. Capeluto, Georgiy Vaschenko, Michael Grisham *et al.*. Nanopatterning with interferometric lithography using a compact $\lambda = 46.9\text{-nm}$ laser [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2006, **5**(1):3~7