

文章编号: 0258-7025(2009)02-0324-04

主开关改进对毛细管放电软 X 光激光的影响

张兴强 程元丽 王 骐 赵永蓬

(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 毛细管放电软 X 光激光方案是实现小型、台式、高效、经济适用的 X 光激光器的新途径。为获得稳定而较大的激光能量,对激光输出所依赖的众多参数进行优化是实验研究不可或缺的步骤。主开关结构决定着主脉冲电流的波形,继而影响激光输出。经过对三种主开关结构进行实验研究,结果表明:改进的并联金属棒支座圆环-小圆盘型主开关的导通电感比较合适,可产生较好的主脉冲电流。主脉冲电流和激光输出的平均值比改进前分别提高了 4% 和 31%,而出光率比最初的金属圆筒支座圆环-大圆盘型主开关提高了 60%。改进的主开关在获得稳定而较大输出能量的情况下仍然继承了金属圆筒支座圆环-小圆盘型主开关的高耐压性,同时保持了激光束较小的脉宽。

关键词 激光技术;主开关;毛细管放电;软 X 光激光;出光率

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0324

Impact of Modified Main-Switch on Capillary Discharge Soft X-ray Laser

Zhang Xingqiang Cheng Yuanli Wang Qi Zhao Yongpeng

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The capillary discharge soft X-ray laser scheme is a new way for generating small-size, table-top, high-efficient and cost-effective X-ray laser. In order to obtain stable and high laser energy, it is necessary to optimize parameters related with laser output. The configuration of the main-switch directly determines the waveform of the main current which in turn influences laser output. By means of the study of three types of main-switch, it shows that the circuit inductance of the modified ring-small disk main-switch supported by parallel metal bars is feasible to achieve appropriate main current. It is also concluded that the average main current and average laser energy are increase by 4% and 31% respectively than those before modification, while the lasing probability is increased by 60% than that of the original ring-large disk main-switch supported by circular metal pipe. Furthermore, under condition of larger and stable laser energy output, the modified main-switch still inherits the high-voltage resistance of ring-small disk main-switch supported by circular metal pipe, and keeps laser beam with narrow pulse width.

Key words laser technique; main-switch; capillary discharge; soft X-ray laser; lasing probability

1 引言

大功率、短脉冲、高能量激光器抽运是获得 X 光激光介质(高温高密度等离子体)的常用方法。毛细管放电抽运软 X 光激光方案的实现^[1]改变了这一传统格局,开辟了小型、台式、高效、经济适用的

软 X 光激光研究^[2~8]及应用^[9,10]的新途径。提高激光的输出能量是各种新型激光器研究中无法回避的难题,即使是定型的产品也不例外,对毛细管放电软 X 光激光器来说亦如此。

毛细管放电软 X 光激光装置^[11]虽然简单,但产

收稿日期:2008-02-25;收到修改稿日期:2008-05-21

基金项目:国家自然科学基金(60038010)、国家 863 计划(863-804-7-10)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,现从事毛细管放电软 X 光激光和毛细管放电 EUVL 光源研究。

E-mail: zhangxingqiang_student@sina.com

导师简介:王 骐(1942-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事短波长激光和 X 光激光技术方面的研究。

E-mail: qiwang@hope.hit.edu.cn

生激光介质的依赖参数较多,找出获得较大激光输出的最佳放电条件十分必要。实验表明,激光输出与流经毛细管的主脉冲电流及其上升沿紧密相关,而影响电流及其上升沿的因素很多,其中主开关的结构差异会使整个回路的导通电感不同,继而影响电流波形,最终决定激光的输出。本文研究了三种主开关结构对激光输出的影响,通过分析实验现象,试图找出主开关结构改进与激光输出的内在联系。

2 主开关电极支座的影响

文献[6]从理论上分析了不同主开关结构(图 1 圆圈所示)对电流波形的影响,随后通过实验确定了其影响程度。结论表明:“圆环-小圆盘型主开关结构由于导通电感合适,产生的主脉冲电流的峰值和脉宽较为理想,因而有利于软 X 光激光的稳定输出。”

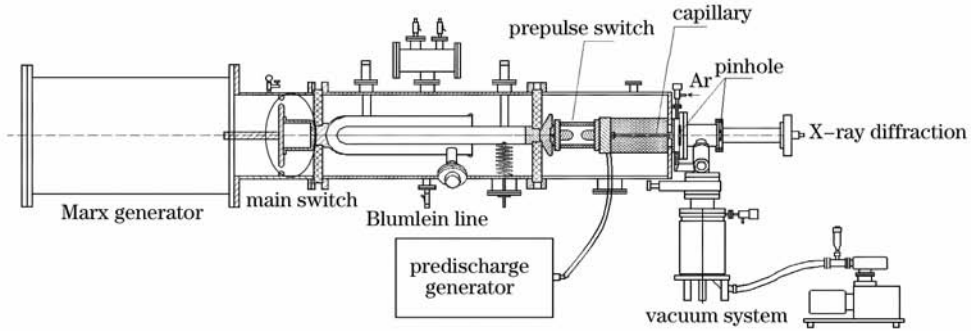


图 1 毛细管放电软 X 光激光装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capillary discharge soft X-ray laser

文献[6]中三种主开关结构为:圆环-大圆盘型图(2(a))、圆环-小圆盘型(图 2(b))和圆环-棒状型。它们的圆环电极连接在外筒上,中间的大圆盘、小圆盘和棒状电极则安装在金属圆筒支座上。定性分析说明,主开关导通时整个回路电感的减小会使主脉冲电流增大,上升沿变快。文献[6]也给出图 2(a)的激光信号比(b)的大,但是前者的输出极不稳定。为了在激光输出稳定[(b)的情形]的前提下尽可能提高激光的能量,必须减小回路的导通电感,为此将(b)的圆筒支座换成四根金属棒并联的支座,如图 2(c)所示。根据金属导体的电感计算,改进支座的主开关电感减小了 15%,回路的导通电感为 35.7 nH,图 2(a),(b),(c)的导通电感之比为 1 : 1.5 : 1.275,计算表明:(a),(b),(c)的电流之比为 1.11 : 1 : 1.04。

3 实验结果及分析

利用图 2 三种主开关结构进行实验,测得主脉冲电流和相应激光输出值如图 3 所示。实心的方块、圆形和三角形分别表示图 2(a),(b),(c)三种主开关输出的主脉冲电流,空心的方块、圆形和三角形分别表示相应的激光输出。从图中可见,主开关(a)的输出电流大但不稳定,20 次实验中只有 8 次激光输出,且输出值波动大;(b)的电流和激光输出值都较小,但输出比较稳定;(c)的电流和激光输出比(b)的都大,而稳定性居于(a),(b)之间。

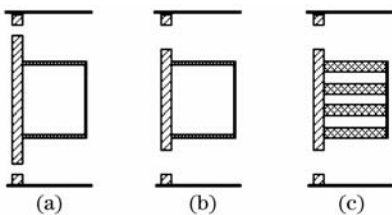


图 2 三种主开关结构

Fig. 2 Configuration of three types of main-switch

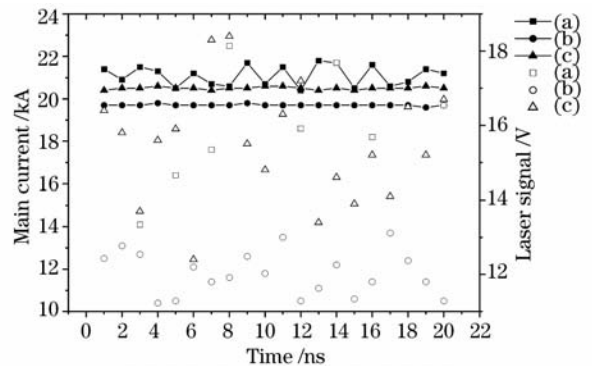


图 3 三种主开关的实验值

Fig. 3 Experimental data of three types of main-switch

在统计分析的基础上,随机抽取三种主开关的实验波形如图 4 所示,其中(a)(图 2(a))的主脉冲电流和激光信号大,电流上升沿快,半周期短;(b)

(图 2(b))的主脉冲电流和激光信号小,电流上升沿慢,半周期长;(c)(图 2(c))的主脉冲电流、激光信号、电流上升沿及半周期处于(a),(b)之间。统计分析和实验现象都表明:(c)是(a),(b)之间的一种过渡状态。

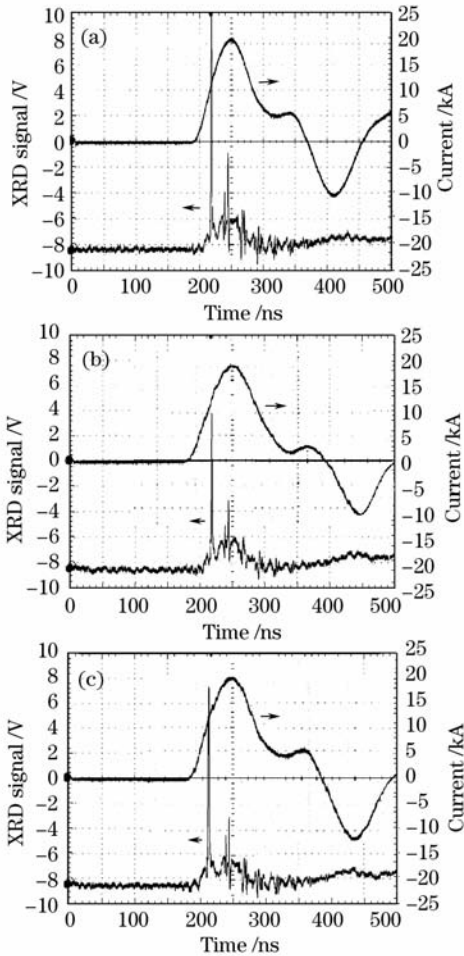


图 4 主脉冲电流波形和激光信号

Fig. 4 Waveforms of main pulse current profile and laser signal

为便于比较与分析,将实验数据整理成表 1。从表中可以看出:主开关(a)、(b)、(c)的电流平均值分别为 21.1 kA, 19.7 kA 和 20.5 kA,三者之比为 1.07 : 1 : 1.04。电流的差异主要来源于电路的导

通电感,而主开关的电感又是电路设计的重要一环。(a),(b)的导通电感与圆环-圆盘电极之间的放电间距和放电通道有关,一旦制成,不易调节。主开关(a)的放电间距小,导通电感小,从而导致放电电流大,电流上升沿快,而(b)正好相反,如此产生的后果就是上面观察到的实验现象。如果以激光输出稳定但输出值较小的主开关(b)为基础,对主开关支座进行改进,可以使整个回路的导通电感减小,主脉冲电流增大,上升沿变快。支座改进后,电流实验值(1.07 : 1 : 1.04)与理论值(1.11 : 1 : 1.04)十分接近。表 1 中的电流上升沿也验证了改进的效果。

从表 1 中可见,主开关(a),(b),(c)的激光输出平均值分别为 18.6 V, 11.8 V 和 15.5 V,出光率分别为 40%, 100% 和 ~100%。对于实用化的激光器来说,只有在保证激光输出稳定的前提下,才会考虑提高输出能量或改善其他指标,因此主开关改进以(b)为原型。

激光脉宽的差别与电流的上升沿有关。毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光的增益介质是 Ar^{8+} 的 3p-3s $J=0-1$ 跃迁的自发辐射放大(ASE),等离子体状态决定着激光的产生,而主脉冲电流又制约着等离子体所处的状态。对于所采用的电子碰撞抽运激光机制来说,产生软 X 激光的必要条件是等离子体内含有高丰度的 Ar^{8+} 和激光上、下能级的粒子数反转。为此可确定产生激光的最佳等离子体状态为:电子密度约 10^{19} cm^{-3} ,电子温度约 60 eV。较快的上升沿可以快速箍缩等离子体,使等离子体较快达到产生激光的状态,从图 4 可以直接看出(a),(b),(c)的出光位置不同,表 1 中(a)比(b)的平均出光位置提前了 1.13 ns,更靠近主脉冲上升沿的起始位置,(a),(b),(c)出光位置的差异反映了箍缩作用的快慢,从而也反证了上升沿的差异。结合激光输出的大小,可以看出:主开关(a)的电流峰值大、上升沿快,等离子体的箍缩作用比较充分、完全, Ar^{8+} 的丰度高,处于激光上能级的粒子数布居相应

表 1 主脉冲电流和激光输出参数

Tab 1 Parameters of main pulse current and laser output

Main-switch	Average current/kA	Average current rise time/ ns	Average position of laser / ns	Average laser output / V	Average laser pulse width / ns	Lasing probability
(a)	21.1	53.4	17.84	18.6	1.7	40%
(b)	19.7	57.2	18.97	11.8	1.6	100%
(c)	20.5	55.9	18.13	15.5	1.63	~100%

较多,因此激光的峰值大,但高丰度 Ar^{8+} 等离子体的持续发光导致激光的脉宽较宽。有时太快的上升沿使等离子体在箍缩过程中发生振荡,等离子体内部固有的一些不稳定性得以放大,这对增益介质的获得极为不利,故偶尔不出现激光信号。由此可见,主开关(a)输出激光的背景是高丰度 Ar^{8+} 的持续发光,而(b)则是少量 Ar^{8+} 在短暂时间内发光。

由于主开关(b)的激光输出非常稳定,以其作为改进的基础。通过减小支座的电感以降低整个回路的导电电感,使主脉冲电流增大、上升沿变陡,从而加快等离子体的箍缩过程,以便获得稳定而较大的激光输出。此外(b)的圆环-小圆盘电极的放电间距较大,可以承受较高的电压,这样改进的主开关(c)不仅继承了(b)出光稳定性高、光束脉宽较小^[6]等特点,而且耐压性能也好。

4 结 论

通过改进圆环-小圆盘型主开关的电极支座,主脉冲电流和激光输出平均提高了 4% 和 31%。与圆环-大圆盘型主开关相比,激光的出光率提高了 60%。毛细管放电软 X 光激光的依赖参数较多,要想获得稳定而较大的激光输出必须在所有参数中协调并优化。

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 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

- 3 A. Ben-Kish, R. A. Nemirovsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers [J]. *SPIE*, 1999, **3776**: 166~174
- 4 G. Niimi, Y. Hayashi, M. 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
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 Zhang Xingqiang, Cheng Yuangli, Wang Qi *et al.*. Influence of delay time on Ne-like Ar 46.9 nm soft-X-ray laser in capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 363~366
张兴强, 程元丽, 王骥 等. 延时对毛细管放电类氩 46.9 nm 软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 363~366
- 9 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]. *Physics of Plasmas*, 2003, **10**(5): 2031~2038
- 10 Maria G. Capeluto, Georgiy Vaschenko, Michael Grisham *et al.*. Nanopatterning with interferometric lithography using a compact $\lambda = 46.9$ nm laser [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2006, **5**(1): 3~7
- 11 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. 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