

文章编号: 0258-7025(2006)09-1176-04

毛细管放电装置主开关结构对产生 软 X 射线激光的影响

赵永蓬¹, 李 岩¹, 谢 耀¹, 栾伯晗¹, 朱秋石¹, 程元丽¹, 王 骥¹, 杨大为²

(¹ 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; ² 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 流过毛细管的电流, 将直接影响箍缩过程中等离子体的状态, 进而影响软 X 射线激光的产生。由于主开关的导通电感将影响电流波形, 因此提出了使用不同结构的主开关电极来改变毛细管电流波形的方案, 以寻找最适合毛细管放电软 X 射线激光产生的电流波形。实验用三种不同结构的主开关电极, 观察了主开关导通电感的改变及其对电流波形的幅值和脉宽的影响。根据导通电感的估算结果, 利用脉冲功率理论, 计算了电流幅值和脉宽的改变情况, 并与实验结果进行了比较。实验观察了电流波形的改变对软 X 射线激光尖峰信号的影响。实验结果表明, 放电间隙为 3 cm 的圆环-圆盘型主开关最适合软 X 射线激光的输出。

关键词 X 射线光学; 毛细管放电; 布鲁姆林(Blumlein)传输线; 主开关; X 射线激光

中图分类号 TN 248.6 **文献标识码** A

Influence of the Main-Switch of the Capillary Discharge Setup on Soft X-ray Laser

ZHAO Yong-peng¹, LI Yan¹, XIE Yao¹, LUAN Bo-han¹,
ZHU Qiu-shi¹, CHENG Yuan-li¹, WANG Qi¹, YANG Da-wei²

¹National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China
²Atomic Energy Academy of Sciences of China, Beijing 102413, China

Abstract The current in the capillary can affect the state of the plasma in pinch process and affect the soft X-ray laser. The inductance of the main switch can change the current waveform. Therefore the scheme of changing current waveform is put forward with different main switches to find the best current waveforms, which are fit for soft X-ray pumped by capillary discharge. In the experiment, three kinds of main switches are used to observe the effect of inductance on the current duration and amplitude. The inductance of main switch is estimated and the current amplitude and duration are calculated with pulse power theory. The theoretical results are compared with the experimental data. With three different main-switches, the influence of current waveforms on soft X-ray laser spike is observed. The experimental results show that the ring-disk-shaped main switch, discharge distance of which is 3 cm, is fit for soft X-ray laser best.

Key words X-ray optics; capillary discharge; Blumlein transmission line; main switch; X-ray laser

1 引 言

由于等离子体的能量传输效率高, 产生 X 射线的工作物质一般都选择等离子体。只要选取适当的激光介质(包括材料、形状和结构)和相匹配的抽运

条件就可以得到产生粒子数反转和激光增益的最佳等离子体状态。产生 X 射线激光的关键是如何获得所需状态的高温、高密度等离子体^[1]。高功率激光聚焦照射固体靶是产生高温、高密度等离子体的

收稿日期: 2005-11-08; 收到修改稿日期: 2006-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(60038010)和国家 863 计划(863-804-7-10)资助项目。

作者简介: 赵永蓬(1973—), 男, 哈尔滨工业大学副教授, 博士, 主要从事紫外和软 X 射线激光研究。E-mail: zhaoy3@yahoo.com.cn

主要手段。1988 年美国小组建议用毛细管放电直接激发等离子体介质^[2]。与大型激光抽运相比,毛细管放电装置简单、造价低、可重复频率工作、能量转换效率高、增益体积大,更利于实现低能耗、台式软 X 射线激光系统。近 10 年来,国外有关毛细管快放电激励软 X 射线激光的研究取得了一系列突出成果,1994 年美国首先采用毛细管放电电子碰撞机制获得 46.9 nm 的激光输出^[3],1996 年输出能量达到 30 μJ ^[4],1999 年已达到 0.88 mJ^[5],并利用此激光获得了对等离子体状态进行诊断的应用成果。以色列小组^[6]、日本小组^[7]也分别在 1999 年和 2001 年获得了毛细管放电类氩氩 46.9 nm 软 X 射线激光输出。

为了进一步提高激光输出的能量,实验小组对激光输出的最佳条件进行了研究^[8]。实验发现,激光的产生与流过毛细管的主脉冲电流前沿形状有密切的关系。决定电流前沿形状的因素是多方面的,其中,传输线主开关的导通状况对其有相当大的影响。主开关电极结构的改变,会改变主开关导通后的电感,因而改变电流波形。电流波形的改变会对激光的产生有重要的影响。本文根据不同电流波形下激光尖峰信号产生的情况,证明了圆环-圆盘型电极有利于激光的产生。就主开关特性改变对电流波形的影响进行了理论分析。

2 不同主开关结构对电流波形的影响

布鲁姆林(Blumlein)传输线^[9]结构原理如图 1 所示。其中, S 为主开关, $-U_0$ 为充电电压, Z_1 为外筒-中筒传输线等效阻抗, Z_2 为中筒-内筒传输线等效阻抗, Z_3 为外筒-内筒传输线等效阻抗。假设阻抗匹配, Z_1 与 Z_2 线长度相等, 则负载阻抗 $R_L = Z_3 = 2Z_1 = 2Z_2$ 。

由高功率脉冲技术理论可知布鲁姆林传输线的传输矩阵为

$$T_r = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \times \begin{bmatrix} Z_2 + Z_3 - Z_1 & -2Z_1 & 2Z_1 \\ -2Z_2 & Z_1 + Z_3 - Z_2 & 2Z_2 \\ 2Z_3 & 2Z_3 & Z_1 + Z_2 - Z_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

当开关 S 闭合时, 在 Z_1 线上产生一个幅值为 $-U_0$, 从线的左端向右端传播的电压波 u_{10} 。电压波经过时间 T 到达右端, 在三条线上的电压波用传输矩阵方

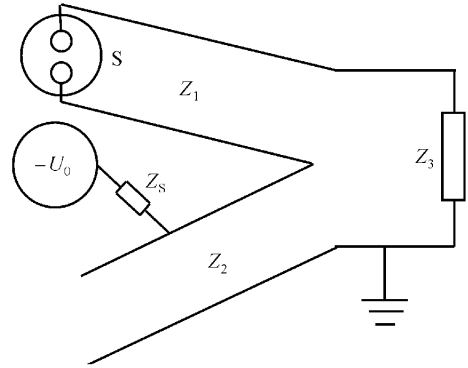


图 1 布鲁姆林传输线等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of Blumlein transmission line

程表示为

$$\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \end{bmatrix} = T_r \begin{bmatrix} u_{10} \\ u_{20} \\ u_{30} \end{bmatrix} = T_r \begin{bmatrix} -U_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{-U_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \begin{bmatrix} Z_2 + Z_3 - Z_1 \\ -2Z_2 \\ 2Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_0/2 \\ U_0/2 \\ -U_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

从 T 时刻开始, 出现沿 Z_3 线向右传播幅值为 $(-U_0)$ 的电压波 u_{31} , 若阻抗匹配, 则 u_{31} 被负载全部吸收, 没有反射。 Z_1 线上出现向左传播幅值为 $(-U_0/2)$ 的 u_{11} , 传到主开关处, 若忽略主开关导通电感, 则短路的反射系数为 -1 。则在 Z_1 线上又产生一个幅值为 $(U_0/2)$ 的右向行进波 u_{11} 。同样分析 Z_2 线可知会有幅值为 $(U_0/2)$ 的右向行进波 u_{21} 与 u_{11} 同时到达三线交接处。此时 Z_1, Z_2 线上无电压波存在, 在 Z_3 线上出现的幅值为 U_0 的电压波 u_{32} 与原来 Z_3 上的电压波 u_{32} (幅值 $-U_0$) 相叠加, 使 Z_3 线上电压为 0。由此可见, 负载上得到幅值 $-U_0$ 的电压脉冲, 脉宽为

$$\tau = 2T = 2(lL_1C_1), \quad (3)$$

其中 l 为传输线的长度, L_1, C_1 分别为传输线的等效电感和电容。

上述分析是理想情况, 分析实际装置时需要考虑负载阻抗不匹配和存在主开关导通电感的影响。由于毛细管被击穿导通后, 其阻抗很小, 所以远未达到阻抗匹配, 将在毛细管上产生振荡波形, 而不是方波。由于主开关电感存在, 毛细管获得的电压也不是 U_0 。下面根据实验中采用的主开关结构, 估算毛细管处的电流波形的幅值和周期的变化, 以便与实验结果比较。

实验使用了三种不同结构的主开关^[8], 如图 2 所示。图中的(a), (b), (c)三种主开关分别是圆环-

大圆盘型、圆环-小圆盘型、圆环-棒状型。三者的放电间距分别为2 cm, 3 cm, 2 cm。其中(a)和(b)是圆盘和圆环结构, 放电通道较多因而导通电感较小。(c)是棒状电极对圆环放电, 放电通道较少因而导通电感较大。(a)和(b)比较, (a)电极间距小, 因而导通电感小, 而其耐压性能比(b)差, 要保证在很高的电压下导通, 必须充入更高气压的气体。

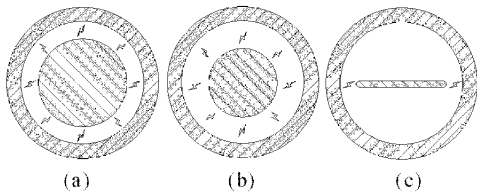


图 2 三种不同结构的主开关

(a) 圆环-大圆盘型; (b) 圆环-小圆盘型; (c) 圆环-棒状型

Fig. 2 Three main switches with different shapes

(a) ring-large disk-shaped;

(b) ring-small disk-shaped; (c) ring-rod-shaped

由脉冲传输线理论可知, 若传输线阻抗为 Z_0 , 主开关导通后阻抗为 Z , 则在主开关端的电压波反射系数

$$\rho = (Z - Z_0) / (Z + Z_0), \quad (4)$$

由于主开关导通后阻抗 $Z \neq 0$, 故 $\rho > -1$ 。结合上面分析可知, 当主开关导通时, 在 Z_1 线上产生的向右行进的电压波 u_{10} 将变为 ρU_0 , 其幅值小于 $-U_0$ 。此电压波在 Z_3 线上向右传输到负载, 所以负载两端的电压值小于 $-U_0$ 。根据放电通道数和电极间距, 估算(a), (b), (c)三个主开关导通电感约为28 nH, 42 nH和70 nH, 若认为电流角频率为 $\pi/100$ ns, 则相应的阻抗应为0.88 Ω , 1.32 Ω 和2.5 Ω 。传输线阻抗为8 Ω , 由公式(4)可知反射系数分别为-0.8, -0.72和-0.52。因此对应(a), (b), (c)三种主开关时, 毛细管峰值电流之比为1.5:1.38:1。实验中测得毛细管处主脉冲电流的峰值为28 kA, 31 kA, 22 kA, 三者之比为1.27:1.4:1。主开关(b), (c)的比值与理论值符合得较好, 而开关(a)与理论值相差较大, 其原因将在实验部分分析。

根据公式(3) C_1 与 l 均为传输线的固有参数。若 L_1 主要考虑主开关的导通电感, 则不同主开关产生的电压波周期之比等于其导通电感之比。由此可知, (a), (b), (c)三个主开关的电流半周期之比约为1:1.5:2.8。实验中测得三者的半周期分别为81 ns, 117 ns和133 ns, 比值为1:1.4:1.6。(a), (b)两开关情况下, 理论与实验值能够吻合, 开关(c)时与理论

值相差较大, 其原因将在实验部分分析。

总之, 理论和实验都表明, 增加主开关导通电感会使主脉冲电流幅值变小, 周期变大。

3 电流波形对激光产生的影响

使用主开关(a)得到了46.9 nm激光脉冲的输出, 如图3(a)所示。其中上侧为流过毛细管的电流波形, 下侧为X射线衍射(XRD)测得的软X射线辐射强度随时间的变化情况。根据前面的计算, 此时电流周期计算结果和实验相符, 而实验电流幅值小于理论值。这主要因为电流波形峰值附近有明显的凹陷, 影响了峰值的进一步增加。凹陷的产生主要与毛细管中的等离子体的充分箍缩有关。在激光产生时刻附近, 等离子体半径达到最小, 其等效电感变得很大, 该电感抑制主脉冲电流的增加, 而产生了明显的凹陷^[10]。X射线衍射信号波形中有较强的激光尖峰输出, 脉宽2 ns。当没有激光产生时X射线衍射输出信号是宽度几十纳秒的背景光, 而当激光产

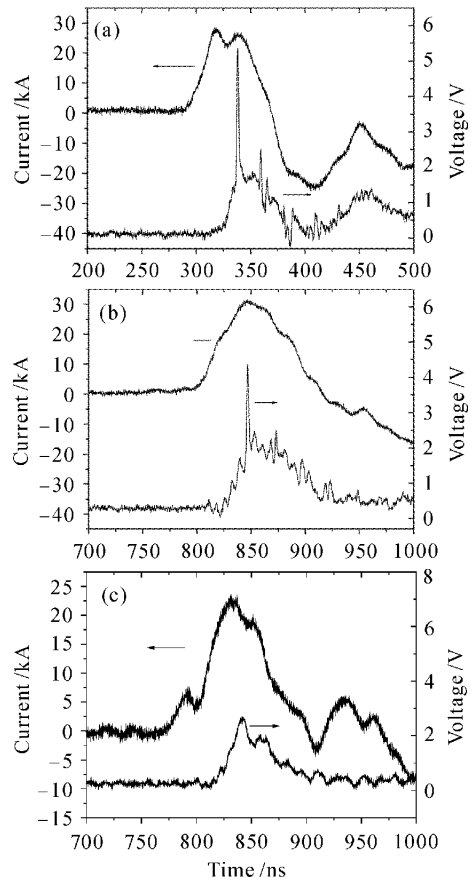


图 3 使用主开关得到的电流与 X 射线衍射波形

(a), (b), (c) 分别对应主开关(a), (b), (c)

Fig. 3 Waveforms of current and XRD with main-switch (a)-(a), (b)-(b) and (c)-(c) respectively

生时 X 射线衍射输出信号迅速增强,由于等离子体脉宽控制因此激光持续时间只有 2 ns。后来的实验证明,该主开关并不能使装置重复稳定地产生激光。换用了主开关(b),得到的实验结果如图 3(b)所示。此时电流峰值和半周期的实验值与理论值很好地吻合,并且该装置能够重复稳定地工作。

比较图 3(a),(b)的实验结果,分析了采用主开关(a)激光输出不稳定的原因。与主开关(b)相比,主开关(a)导通电感小,导致电流的脉宽较窄,致使毛细管内等离子体压缩过程更加剧烈,剧烈的压缩导致等离子体状态不稳定,经常达不到激光输出的要求,激光输出不稳定。

采用主开关(c)的实验结果如图 3(c)所示,此时电流峰值与理论符合,而半周期值与理论相差较大。这主要是由于布鲁姆林传输线固有预脉冲对脉冲形状的影响,使电流时间参数较难精确测定。同时它的存在,使电流波形很不规则,不利于激光输出。另外由于主开关电感的增加使主脉冲电流的幅值明显下降,已经不能达到有效箍缩等离子体产生激光输出的要求。因此该主开关的电感太大,不利于布鲁姆林线的能量传输,不利于激光的产生。

4 结 论

实验使用三种主开关电极,圆环-小圆盘型主开关由于导通电感大小合适,产生的主脉冲电流的峰值与脉宽较为理想,因而最有利于软 X 射线激光的输出。而适合在更高的毛细管气压下产生激光输出的主开关形状,还有待于在对主开关性能分析的基础上,在实验中继续分析探索。对于不同结构电极的比较,能够帮助寻找最佳的主脉冲电流波形,而且

对于高压下实现高能量的激光输出,以及测量激光增益,都有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Peng Huimin, Wang Shiji. X-Ray Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 234~255
彭惠民,王世绩. X 射线激光[M]. 北京:国防工业出版社, 1997. 234~255
- 2 J. J. Rocca, D. C. Beethe, M. C. Marconi. Proposal for soft-X-ray and XUV lasers in capillary discharges [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7):565~567
- 3 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
- 4 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
- 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 A. Ben-Kish, R. A. Nemirovsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers [C]. *SPIE*, 1999, **3776**:166~174
- 7 Gohta Niimi, Yasuashi 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
- 8 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
- 9 Wang Ying. High Power Pulse Electrical Source [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991. 34~53
王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京:原子能出版社, 1991. 34~53
- 10 B. M. Luther, Y. Wang, M. C. Marconi *et al.*. Guiding of intense laser beam in highly ionized plasma columns generated by a fast capillary discharge [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(23):235002-1~235002-4