

文章编号: 1001-3806(2002)01-0041-03

## 台式毛细管放电 X 光激光装置调试实验\*

刘 鹏 王 骐

杨大为

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

摘要: 对自行研制的台式毛细管放电 X 光激光装置进行了系统调试, 在充氩气毛细管负载下, 输出电流 38kA, 电流脉冲前沿 40ns, 并对有关问题进行了讨论。并在这个装置上开展充氩气毛细管放电荧光光谱实验研究。

关键词: 毛细管放电; 等离子体; X 光激光; Blumlein 线; 调试

中图分类号: O434.19; O53 文献标识码: A

### Adjustment for a capillary-discharge-pumped table-top X-ray laser

Liu Peng, Wang Qi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Yang Dawei

(Atomic Energy Academy of Sciences of China, Beijing, 102413)

**Abstract:** Some problems present in the process of adjustment for a self-developed capillary-discharge-pumped table-top X-ray laser have discussed in the paper. Under the condition that the capillary charge filled with Ar gas, a significant result has been obtained with output current of 38kA, current pulse rising edge of 40ns. At present, experimental study on Ar-filled capillary discharge fluorescence spectra is proceeding on the setup.

**Key words:** capillary discharge; plasma; X-ray laser; Blumlein line; adjustment

## 引 言

在毛细管中通过高电压、大电流、快脉冲放电, 将形成等离子体放电通道, 并产生 Z 箍缩效应。毛细管放电最初是为研究 X 射线光谱、X 射线光刻和 X 射线显微术而发展的, 后来在 X 射线激光方面得到了应用。毛细管放电激励 X 光激光研究方案具有低激发阈值、高效率、小尺寸、低价格等优点, 国外已进行了大量研究<sup>[1~7]</sup>, 但许多具体细节并未公开发表。为了以后进行 X 射线激光研究, 我们研制了一台毛细管放电 X 光激光装置, 其主要设计指标为: 放电电流大于 37kA, 脉冲前沿 30ns, 脉冲半高宽 35ns, 近似正弦波形。已进行了放电装置的系统放电调试, 并获得了稳定的放电电流输出, 这对充氩气毛细管放电荧光光谱实验及激光实验研究都具有重要意义。

## 1 台式毛细管放电 X 光激光装置

如图 1 所示, 台式毛细管放电 X 光激光装置中 1 是 Marx 发生器, 2 是主开关, 3 是 Blumlein 传输线, 4 是真空系统, 5 是测试设备, 6 是过渡室, 7 是阵列窗, 8 是差分室, 9 是毛细管, 10 是放电室, 11 是回流器, 12 是接地电感, 13 是水枕, 14 是电阻分压器。

### 1.1 Marx 发生器

Marx 发生器又称冲击电压发生器, 其工作原理是储能电容器先并联充电, 然后通过火花隙开关串联放电, 从而使电压倍加起来, 以获得更高的脉冲电压输出。Marx 发生器由 10 级电容器组成, 每级电容由两台油介质电容器(0.047μF, 30kV) 并联而成。采用正负充电方式, 5 个火花隙开关的导通由外加触发电压控制。Marx 发生器串联电容为 9.4nF, 串联电感约 10μH, 串联放电电阻约 5Ω。整个 Marx 发生器固定在绝缘支架上, 并装入充以氮气的钢筒内。

### 1.2 Blumlein 传输线

Blumlein 传输线由 3 个同轴圆筒组成, 中间圆筒接到 Marx 发生器高压输出端, 外筒通过接地电感

\* 国家自然科学基金重点资助项目。

作者简介: 刘 鹏, 男, 1972 年 1 月出生。博士研究生。  
研究方向是短波长激光、X 射线激光。

收稿日期: 2000-10-16; 收到修改稿日期: 2001-02-27

与内筒相连,用于保证中筒与内筒之间的充电,内筒接毛细管负载。以去离子水作绝缘介质,电阻率  $\rho \approx 1 \sim 2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ , 相对介电常数  $\epsilon_r = 80$ , 两端分别用绝缘隔板与 Marx 发生器和毛细管隔开。内筒、中筒和

外筒半径分别为 43mm, 94.5mm 和 205mm。Blumlein 线阻抗采取等阻抗形式,  $Z_1 = Z_2 = 5\Omega$ ;  $Z_B = Z_1 + Z_2 = 10\Omega$ ; 输出脉冲半高宽  $\tau = 35\text{ns}$ 。Blumlein 线等效电容  $C_B = C_1 + C_2 = 7.3\text{nF}$ 。

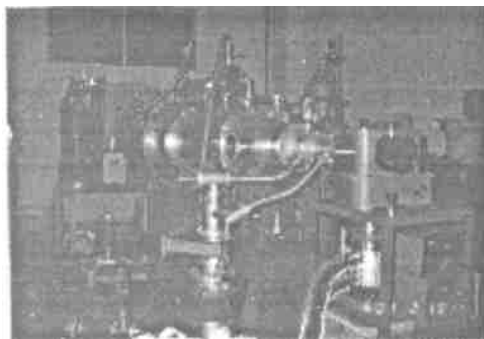
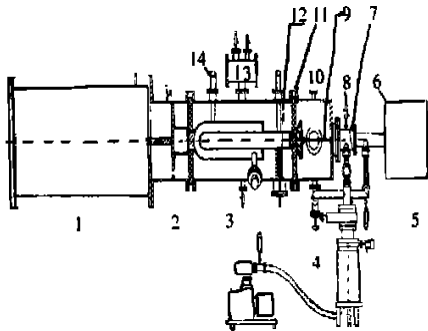


Fig. 1 Schematic diagram and photo of the capillary discharge setup for table-top X-ray laser

### 1.3 主开关

主开关安置在中筒与外筒之间。高压电极为直径  $f300\text{mm}$  的圆盘, 端面半径为  $R = 10\text{mm}$  的曲面。接地电极为直径  $f340\text{mm}$  的圆环, 端面半径也为  $10\text{mm}$ , 电极间距  $d = 20\text{mm}$ , 主开关内充  $\text{SF}_6$  气体。大的电极面积易形成多通道。主开关击穿电压应当调到与 Blumlein 传输线输出幅度相一致, 为了有效和安全运行, 一般调整到 Blumlein 传输线输出电压的 95% 左右, 这可根据 Blumlein 传输线电压波形, 通过调节主开关工作气压来实现。

### 1.4 毛细管

放电毛细管采用聚乙烯材料制成, 其内径为  $f4\text{mm}$ , 外径为  $f14\text{mm}$ , 实验中要求毛细管长度可变。毛细管内工作时要预先抽真空, 不同长度的毛细管的密封问题很难解决。同时还要求不同毛细管放电时回路电感基本不变。为此, 我们采用在长毛细管中插入铜棒的方法, 改变铜棒电极的长度, 即改变了毛细管放电的长度, 又保持放电回路电感变化很小, 这样使固定安装毛细管结构设计上大为简化, 省去了加工多个毛细管及固定装置的麻烦。

### 1.5 测量系统

Marx 发生器对 Blumlein 线充电波形、主开关波形、Blumlein 线电压波形及预脉冲波形等利用电阻分压器再经 TDS684A 低压示波器来测量。电阻分压器采用两级分压, 第 1 级采用  $\text{CuSO}_4$  溶液作分压电阻, 第 2 级采用金属膜电阻, 总分压比  $K = K_1 \cdot K_2$ 。毛细管负载放电电流波形用回流器再经 TDS684A 低压示波器来测量。回流器采用不锈钢薄膜, 其长  $160\text{cm}$ , 宽  $32.5\text{mm}$ , 膜厚  $20\mu\text{m}$ , 电阻率  $\rho = 7.73 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ , 回流器电阻  $R = 0.78\text{m}\Omega$ , 灵敏

度  $12.8\text{kA/V}$ 。

## 2 毛细管放电 X 光激光装置的调试

在对 Marx 发生器进行了系统调整的基础上, 进行了 Marx 发生器对 Blumlein 线的充电实验, 没有发生任何高压放电击穿现象, 测得在不同工作电压下的有关参数, 脉冲高压电源系统工作正常。对 Blumlein 线在不同负载的输出特性进行了调试。

### 2.1 纯电阻负载情况下的调试

Blumlein 线输出阻抗为  $10\Omega$ , 其负载阻抗应与其匹配, 为此, 我们设计了内充  $\text{CuSO}_4$  水溶液的电阻负载, 调节  $\text{CuSO}_4$  水溶液的浓度可改变其电阻值, 以满足阻抗匹配的条件。Blumlein 线在匹配的电阻负载下, 应将其储存的能量全部转移给负载, 被电阻性负载所吸收, 输出单个具有一定前后沿的脉冲波形。图 2 是实测的脉冲电流波形。电阻性负载下调整的目的是测试该装置的主要输出指标及验证设备的性能。

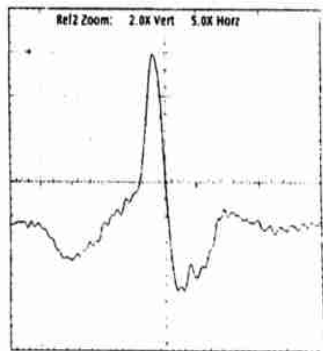


Fig. 2 Waveform of output current at resistance charge

### 2.2 充气毛细管负载下的调试

Blumlein 线的负载并不是阻抗不变的水电阻, 而是充以  $66.7 \sim 93.3\text{Pa}$  氙气的毛细管。毛细管的阻抗特性不是纯电阻负载, 幅值较低的预脉冲电压已将毛细管中低气压气体电离为等离子体, 等离子体电阻率很低, 而细长的等离子体柱的电感却较大,

因此, 毛细管负载实际相当于一个电感  $L(t)$  和电阻  $R(t)$  相串联。阻抗  $Z(t) = \omega L(t) + R(t)$ , 且  $R(t) \ll \omega L(t)$ 。  $L(t)$  和  $R(t)$  是随时间变化的。随着电流的增加, 等离子体柱的直径减小, 电感值  $L(t)$  增大; 而此时等离子体的电离度增加, 电阻率减小, 电阻  $R(t)$  随之减小。在等离子体壳塌缩后, 等离子体柱的直径增大, 电感值减小, 电阻值增大。

在充以低气压的毛细管负载下, 由 Blumlein 线的电容、毛细管等离子体柱的电感及电阻, 构成  $G-L-R$  振荡回路。因此, 通过毛细管的电流应为阻尼衰减振荡波形, 因为只有在电阻上才能消耗能量。由于  $R(t) \ll \omega L(t)$ , 故将通过多次振荡后, 才能将存储在 Blumlein 线上的能量损耗掉。对泵浦 X 射线激光有用的只是第 1 个电流脉冲, 毛细管吸收的有用能量仅为 Blumlein 线储存能量的百分之几。图 3a 为实际测得的在充 66.7Pa 氙气的毛细管中放电电流波形, 图 3b 为第 1 个脉冲电流波形, 与上述分析结果相符。从图中可见, 放电电流幅值达 38kA, 上升前沿约 40ns。实测电流波形的半高宽比

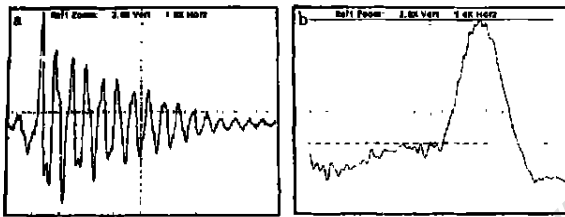


Fig. 3 a—waveform of capillary discharge current b—waveform of 1<sup>st</sup> pulse current

电压波形有所展宽, 这是因为在电压上升前沿阶段, 等离子体处于低电离态, 等离子体电阻率较高; 但当电压达到峰值后处于下降沿阶段, 等离子体已达到高电离态, 其电阻率减小, 虽然此时电压逐渐降低,

但电流仍然较大, 毛细管的电感也阻止电流的减小, 因此, 电流脉冲宽度有所展宽。

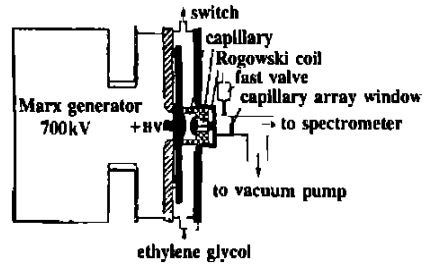


Fig. 4 Capillary discharge setup of Rocca

根据最新报道<sup>[7]</sup>, Rocca 小组已将类氙氙 46.9nm X 光激光输出能量提高到平均 0.88mJ。其毛细管放电装置如图 4 所示, 放电参数为: 放电电流 26kA, 电流脉冲前沿 40ns, 毛细管长度 34.5cm。我们的装置输出参数已达到了 Rocca 小组的装置水平。在这个装置上正在开展充氙气毛细管放电荧光光谱的实验研究。为实现毛细管放电 X 光激光的输出, 根据实验研究的需要, 还要进一步对该装置进行完善和改进, 如外加可调预脉冲装置, 外加可调轴向磁场装置等。

参 考 文 献

[1] Rocca J J, Beethe D C, Marconi M C. *Opt Lett*, 1988, 13(7): 565~567.  
 [2] Steden C, Kunze H J. *Phys Lett A*, 1990, 151(9): 534~537.  
 [3] Shin H J, Kim D E, Lee T N. *Phys Rev E*, 1994, 50(2): 1376~1382.  
 [4] Rocca J J, Tomasel F G, Marconi M C *et al.* *Phys Plasma*, 1995, 2(6): 2547~2554.  
 [5] Rocca J J, Shlyaptsev V N, Tomasel F G *et al.* *Phys Rev Lett*, 1994, 73(16): 2192~2195.  
 [6] Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A *et al.* *Phys Rev Lett*, 1996, 77(8): 1476~1479.  
 [7] Maxxhietto C D, Benware B R, Rocca J J. *Opt Lett*, 1999, 24(16): 1115~1117.