

文章编号: 0258-7025(2001)12-1071-04

# 抽运 X 光激光的台式毛细管快放电装置\*

刘 鹏 余祺琪 王 骥

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)

**提要** 根据电子碰撞机制类氦毛细管放电机理,在一台最大输出电压 300 kV 的 Marx 发生器基础上设计了一套完整的毛细管放电装置。对该装置进行了系统调试,在充氩气 10 cm 长毛细管负载下,输出电流 38 kA,电流脉冲前沿 40 ns。目前已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 传输线

**中图分类号** O 434.1 ;TN 248 **文献标识码** A

## A Device in Capillary Discharge Pumped Table-top X-ray Laser

LIU Peng<sup>1</sup> YU Qi-qi<sup>1</sup> WANG Qi<sup>1</sup> YANG Da-wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*  
<sup>2</sup>*Atomic Energy Academy of Sciences of China, Beijing 102413*

**Abstract** According to the mechanics of capillary discharge by electron collision excitation regimes in Ne-like Ar, a capillary discharge device was designed on a Marx generator whose maximum output voltage is only 300 kV. The test was systematically proceed. At capillary charge filled with Ar gas, output current of 38 kA, current pulse rising edge of 40ns was attained. At present, the experiment study of fluorescence spectra was developing on capillary discharge in Ne-like Ar.

**Key words** capillary discharge, plasma, X-ray laser, Blumlein line

## 1 引 言

近年来出现的毛细管放电激励 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,为短波长激光研究工作带来一种全新的概念。

毛细管放电即是在毛细管中通过高电压、大电流、快脉冲的放电电离管内气体(如氩气),电流通过等离子体,由于洛仑兹力作用,等离子体鞘向轴心箍缩,产生一个会聚的等离子体壳层。在会聚过程中磁能转换为等离子体的动能和电子的热能,因此等离子体的电子温度迅速增加,形成高温、高密度等离子体柱。如果等离子体塌缩过程比较快,离子温度较低,而电子温度相当高,这对电子碰撞激发机制来说,是很理想的状态。这时就有可能达到产生激射所需的等离子体条件,从而产生辐射放大的软 X 射

线激光。

1988 年美国 Colorado 大学 J. J. Rocca<sup>[1]</sup>小组建议用毛细管放电抽运获得软 X 射线激光,随后 Steder<sup>[2]</sup>,Edison<sup>[3]</sup>以及韩国 Lee 小组<sup>[4]</sup>等相继进行了类氢碳复合机制毛细管抽运软 X 射线激光实验,实验观察到类氢碳 H<sub>α</sub> 线的放大。但由于复合机制本身对等离子体中电子温度与电子密度要求条件很严格,很难保证等离子体的快速冷却,增益长度积 GL 值一般较小,很难做到较大能量输出,因而实用性小。1994 年 J. J. Rocca<sup>[5]</sup>小组改用电子碰撞机制在长 12 cm 直径 4 mm 的毛细管等离子体中观察到了波长 46.9 nm,增益长度积 GL = 7.2 的类氦氩 X 射线辐射放大。经过进一步努力,1996 年 J. J. Rocca 小组实现了类氦氩 3p-3s J = 0-1 跃迁的增益饱和输出<sup>[6]</sup>,其最大增益长度积达到了 27.7,输出能量 30 μJ,在第五届 X 射线激光国际会议上被誉为最接近实用的台式软 X 射线激光装置。

显然,脉冲电压的幅值和前沿是至关重要的。只有足够大的电压才能产生足够大的强电流对等离

\* 国家自然科学基金(69588002)及 863 青年基金资助项目。

收稿日期 2000-09-18;收到修改稿日期 2000-11-27

子体进行有效箍缩,达到产生软 X 射线激光所需的电子温度和电子密度。而足够快的脉冲前沿将使等离子体尽可能快地与管壁分离,减少了管壁上的能量损耗,利于获得较高的电子温度,同时也使能量在箍缩过程中大部耦合到等离子体中。

## 2 毛细管放电 X 光激光装置设计

对 J. J. Rocca 所发表的文章及相关文献进行综合分析,毛细管放电装置的主要参数是:放电电流大于 37 kA,脉冲前沿 30 ns,脉冲半高宽 35 ns,近似正弦波形。我们装置的设计也是以这些参数为设计指标。由于现有的一台 Marx 发生器输出电压最高仅为 300 kV,为此我们采用 Blumlein 线作为储能和脉冲成形元件,其好处在于:

(1) Blumlein 线电压传输效率高,弥补了现有 Marx 发生器输出电压较低的不足,以保证输出电流大于 37 kA 的要求。

(2) 脉冲形成线可产生快的脉冲前沿,以满足对等离子体快速箍缩的要求。

(3) Blumlein 线在充电过程中,在毛细管电极上自然产生预脉冲电压,以利于形成初始低电离态等离子体。改变接地电感大小,可改变预脉冲幅值,无需另外设计预脉冲产生器。

图 1 为毛细管放电 X 光激光装置示意图。

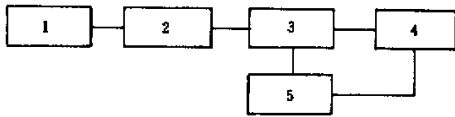


图 1 毛细管放电 X 光激光装置示意图

- 1: Marx 发生器; 2: Blumlein 线及主开关;
- 3: 毛细管放电室; 4: 测量系统; 5: 真空系统

Fig. 1 Diagram of capillary discharge pumped X-ray laser device

- 1: Marx generator; 2: Blumlein line and switch;
- 3: capillary discharge cell; 4: measurement system; 5: vacuum system

### 2.1 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,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并联而成,Marx 发生器串联电容为 9.4 nF。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 发生器串联电容约 10 μH,串联放电电阻约 5 Ω。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。

### 2.2 Blumlein 线

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  $\tau = 35$  ns。Blumlein 线的绝缘介质为去离子水。电阻率  $\rho \approx 1 \sim 2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ , 相对介电常数  $\epsilon_r = 80$ 。Blumlein 线等效电容  $C_B = C_1 + C_2 = 7.3 \text{ nF}$ 。

Blumlein 线结构如图 2 所示,其结构尺寸为:

外筒外径:  $R_{out} = 205 \text{ mm}$ ; 外筒内径:  $R_{in} = 200 \text{ mm}$ ; 中筒外径:  $r_{2out} = 94.5 \text{ mm}$ ; 中筒内径:  $r_{2in} = 91 \text{ mm}$ ; 内筒外径:  $r_{1out} = 43 \text{ mm}$ ; 内筒内径:  $r_{1in} = 40 \text{ mm}$ 。

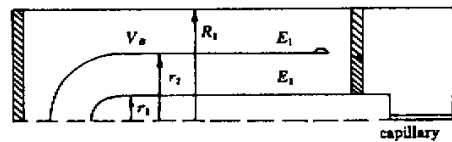


图 2 Blumlein 线结构示意图

Fig. 2 Diagram of Blumlein line structure

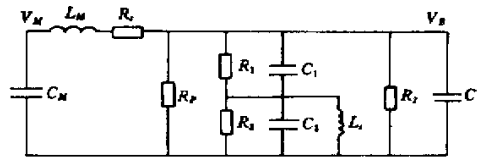


图 3 Marx 发生器向 Blumlein 线充电的等效线路

Fig. 3 Equivalent circuit of Marx generator charging to Blumlein line

### 2.3 Marx 向 Blumlein 线充电过程分析与计算

Marx 发生器向 Blumlein 线充电的等效线路如图 3 所示。

对图 3 电路方程进行拉普拉斯变换,可求出 Blumlein 线充电电压解析表达式<sup>[7]</sup>为

$$V_B(t) = \frac{V_M \cdot \omega_B^2}{(\beta - \alpha)^2 + \omega^2} \times \left\{ e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t} \left[ \cos(\omega \cdot t) + \frac{\beta - \alpha}{\omega} \sin(\omega \cdot t) \right] \right\}$$

它是用拉氏变换特征方程的特征根表示的,其中  $\alpha, \beta$  为特征根的现实部,  $\omega$  为虚部。按此公式计算出 Blumlein 线上充电电压波形如图 4 所示。

我们关心的是第一个峰的幅值及对应的时间

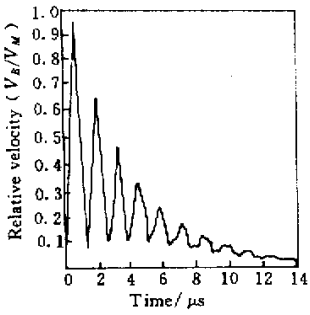


图 4 Blumlein 线充电电压波形

Fig.4 Waveform of Blumlein line charging voltage

$$t_r = \frac{\pi}{\omega} \approx 637 \text{ ns}; V_{Bmax} = 0.96 V_M$$

### 2.4 主开关

主开关安置在中筒与外筒之间。高压电极为  $\phi = 300 \text{ mm}$  的圆盘, 端面半径为  $R = 10 \text{ mm}$  的曲面。接地电极为  $\phi = 340 \text{ mm}$  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。

输出电压波形的上升前沿与开关的时间常数及驱动阻抗有关。

$$\text{电感项时间常数: } \tau_L = \frac{L}{nZ};$$

$$\text{电阻项时间常数: } \tau_R = \frac{88}{(nZ)^{1/3} E^{4/3}} (\rho/\rho_0)^{1/2}.$$

其中  $n$  为火花通道数,  $Z$  为开关驱动阻抗,  $E$  为开关工作场强,  $\rho$  为所充气体密度。

开关总的时间常数:  $\tau = \tau_L + \tau_R$ 。输出脉冲上升时间:  $t_r = 2.2\tau$ 。

对该开关如  $n = 1$  则  $t_r = 37 \text{ ns}$ ;  $n = 2$  则  $t_r = 18 \text{ ns}$ 。

### 2.5 毛细管设计

放电毛细管采用聚乙烯材料制成, 内径为  $\phi = 4 \text{ mm}$ , 外径为  $\phi = 14 \text{ mm}$ , 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上大为简化, 省去了加工多个毛细管及固定装置的麻烦。

## 3 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。

### 3.1 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硫酸铜水溶液的电阻负载, 调节硫酸铜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 5 是实测的脉冲电流波形。电阻性负载下的调整的目的是测试该装置的主要输出指标及验证该设备的性能。

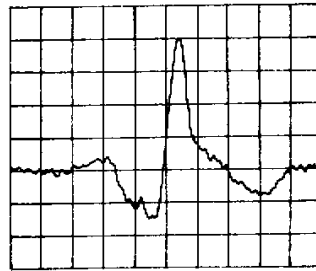


图 5 电阻负载下的输出电流波形

Fig.5 Output current waveform on electric resistance charge

### 3.2 充氩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  $66.66 \sim 93.92 \text{ Pa}$  氩气的毛细管。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  $Z = \omega L(t) + R(t)$ , 且  $R(t) \ll \omega L(t)$ 。  $L(t)$  和  $R(t)$  是随时间变化的。

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  $C-L-R$  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。对抽运 X 射线激光有用的只是第一个电流脉冲, 毛细管吸收的有

用能量仅为 Blumlein 线储存能量的百分之几。图 6(a) 为实际测得的在充 66.66 Pa 氙气的 10 cm 长毛细管中放电电流波形, 图 6(b) 为第一个脉冲电流波形, 与上述分析结果相符。从图中可见, 放电电流幅值达 38 kA, 上升前沿约 40 ns。

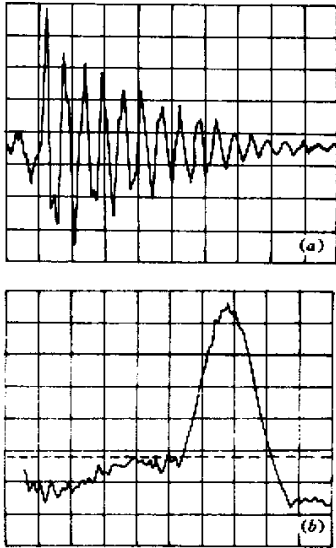


图 6 毛细管放电电流波形(a)和第一个脉冲电流波形(b)

Fig.6 Capillary discharge current waveform(a) and first pulse current waveform(b)

根据最新报道<sup>[8]</sup>, Rocca 小组已将输出 X 光激光能量提高到平均 0.88 mJ。毛细管放电参数为: 放电电流 26 kA, 电流脉冲前沿 40 ns, 毛细管长度 34.5 cm。我们的装置输出参数完全达到了 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和可调轴向磁场装置等。

### 参 考 文 献

- 1 J. J. Rocca, D. C. Beethe, M. C. Marconi. Proposal for soft-x-ray and XUV lasers in capillary discharges. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7):565~567
- 2 C. Steden, H. J. Kunze. Observation of gain at 18.22 nm in the carbon plasma of a capillary discharge. *Phys. Lett. A*, 1990, **151**(9):534~537
- 3 N. Edison, P. E. Young, N. Holmes *et al.*. Characterization of a capillary-discharge plasma. *Phys. Rev. E*, 1993, **47**(2):13051308
- 4 Hyun-Joon shin, Dong-Eon kim, Tong-Nyong Lee. Soft-x-ray amplification in a capillary discharge. *Phys. Rev. E*, 1994, **50**(2):1376~1382
- 5 J. J. Rocca, V. N. shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16):2192~2195
- 6 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. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(8):1476~1479
- 7 Yang Dawei. Charging test of the intense electron beam acceleration. *Atomic Energy Science and Technology* (原子能科学与技术), 1982, (2):125~129 (in Chinese)
- 8 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. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117