

# 自由电子激光器虚火花放电 高压电源的改进\*

陈建芳 王明常 张立芬 黄羽 陆宾

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 提出了对虚火花放电高压电源进行改进的方案。给出了实验装置,并从理论上分析了它的可行性。由此可大大减小传统的拉曼自由电子激光器的外形尺寸,使其小型化和广泛应用成为现实。

**关键词** 自由电子激光器,虚火花放电,脉冲形成线

目前国际上研究自由电子激光器的热点转向短波长、小型化和实用化。研制紧凑、实用的自由电子激光器装置是当前这个领域的工作重点。传统的拉曼自由电子激光器由 Marx 发生器、脉冲形成线、二极管、波荡器等部分组成。本实验室已改进过的脉冲形成线长约 1.6 m,在整个装置中所占体积较大,它只作为一条水同轴电缆而不再压缩 Marx 发生器输出的脉冲<sup>[1]</sup>。实际上,将 Marx 发生器产生的高压长脉冲输出直接耦合到二极管以产生强流电子束的方法在国外早有报道<sup>[2,3]</sup>。Martin 和 Clark 曾将一台低感 Marx 发生器直接接到真空二极管上,以 1.5 MV 的加速电压,得到脉宽为 0.5~1.5  $\mu\text{s}$ ,束流强度高达 60 kA 的电子束,效率高达 51%。据此,我们去掉脉冲形成线,将 Marx 发生器产生的高达 300 kV 脉冲电压经触发放电后直接加到多隙虚火花放电室,驱动虚火花放电以产生强流电子束,自由电子激光器的体积将会大大减小。

新型台式拉曼自由电子激光器由 Marx 发生器、虚火花放电电子束源、小周期波荡器等部分组成<sup>[4]</sup>。由中国科学院上海光机所研制成功的高功率、强流密度、低发射度、高亮度虚火花电子束源,是国际上继美国马里兰大学 Destler 研究小组之后又一成功运转的装置。相对于光阴极电子枪,虚火花放电装置不需要高真空度,产生的电子束质量好,束流强度大大提高,而且放电是在阴-阳极小孔通道中进行,放电粒子不直接轰击阴-阳极,因而虚火花放电室的使用寿命很长。它为我们发展高效率、短波长、小型化拉曼自由电子激光器提供了优质电子束源。研制出的新型小周期波荡器,由带铁芯的双绕螺旋片组成,产生周期性圆极化磁场。已将原 2.2 cm 周期缩短为 1 cm,磁场在 0~0.3 T 之间可调。因此,若能进一步将虚火花放电高压电源进行改进,去掉 Blumlein 传输线,变脉冲线加速器驱动虚火花放电为 Marx 发生器高压脉冲直接驱动虚火花放电,则台式拉曼自由电子激光器的设想不久即可实现。

\* 国家自然科学基金(69337010)资助项目。

## 1 实验方案

虚火花放电是在一种特殊的轴对称结构的虚火花放电室中发生的高电压(10 kV~1 MV)、低气压(1~100 Pa)的气体放电现象。在具有共同中心放电通道的空心阴极和平板阳极之间交替插入绝缘盘和中间电极即构成多隙虚火花放电室。该放电室有很强的束流和很窄的直径,归一化亮度很高。我们所采用的虚火花放电室由一个空心阴极、九个中间电极、绝缘圆盘及一个阳极构成。虚火花放电室一端通过气阀与氮气瓶连接,另一端与真空泵相连,放电室的压强由一台真空自动控制仪测量,并通过压电陶瓷调节进气阀的大小来控制。对虚火花放电高压电源改进后的实验装置如图1所示。高压直流电源对十级 Marx 发生器并联充电,单级充电电压为  $U_0$ , 外触发使 Marx 自建立串联放电,产生  $10U_0$  (即 300 kV) 的高电压宽脉冲,该脉冲不经过传统的脉冲形成线而直接加到多隙虚火花放电室的空心阴极。虚火花放电室的阴-阳极距离为 10 cm,有效隙距为 2 mm,共同中心放电通道直径为 4 mm,工作在低气压的空心阴极由于正的空间电荷的注入和其内部的电子电离及雪崩,引起空心阴极效应和阴极孔附近的爆炸电子发射以及多隙电极系统的静电聚焦效应的产生,从而导致多隙逐级电压击穿,于是一个磁自箍缩的强流密度、低发射度的电子束会从阳极孔射出并进入漂移管沿轴线传输。

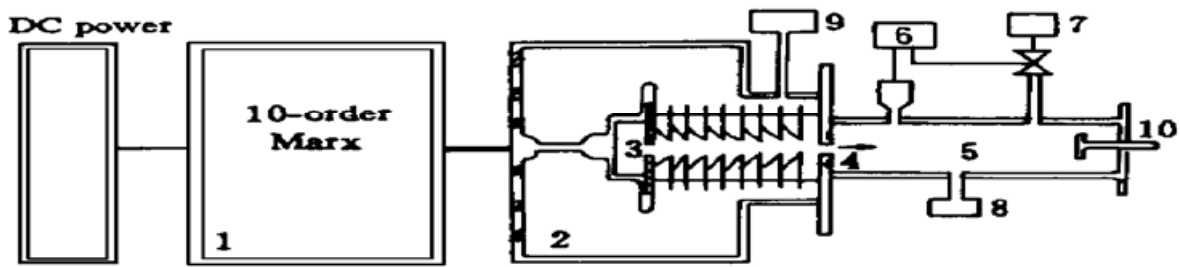


图1 虚火花放电高压电源改进后的总体实验装置

1: Marx 发生器; 2: 高真空室; 3: 虚火花放电室; 4: 出射电子束; 5: 漂移管; 6: 自动压强控制系统;  
7: 气源; 8: 机械泵; 9: 复合真空扩散泵; 10: 可移动测量装置

Fig. 1 General experimental device of improved high-voltage power of pseudospark discharge

1: Marx generator; 2: high vacuum chamber; 3: ps chamber; 4: ejected e-beam; 5: drift tube; 6: automatically pressure-controlling system; 7: gas source; 8: mechanical pump; 9: diffusion pump; 10: movable measurement setup

## 2 理论分析

若去掉 Blumlein 线,则 Marx 发生器产生的高压脉冲直接驱动虚火花放电,其等效电路如图2所示。 $C_m$  为 Marx 发生器串联电容,  $L_m$  为回路电感。

首先应计算出回路的串联放电电阻  $R_s$  及 Marx 发生器输出端对地的等效电阻  $R_a$ 。

图3所示为本实验室以前拍摄的 Marx 发生器向 Blumlein 线充电(虚火花开路时)的电压波形,该电压波形满足公式<sup>[5]</sup>

$$\tau = \frac{1}{\alpha_1} = R_a(C_m + C_B) \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{\ln \frac{\Delta V_B(t_1)}{\Delta V_B(t_2)}}{t_2 - t_1} = \frac{R_s + R_e}{2L_m} \quad (2)$$

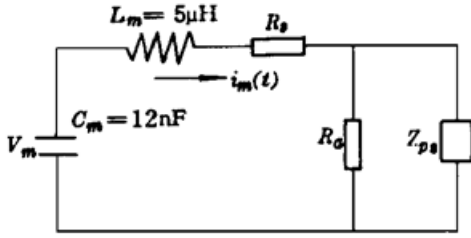


图2 直接驱动虚火花放电的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit for directly-driven pseudospark discharge

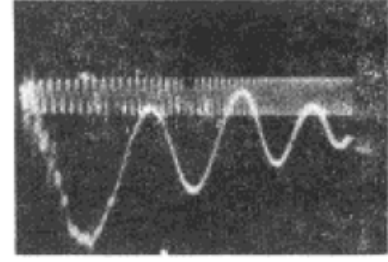


图3 Marx 发生器对脉冲形成线充电的电压波形

Fig. 3 Voltage waveform of pulse line charged by a Marx generator (100 ns/div)

$$R_e = \frac{C_B(1+k)}{k} \quad (3)$$

其中,  $k = \omega^2 R_a^2 C_B^2$ ,  $\tau$  为衰减时间常数,  $C_B$  为 Blumlein 线的总电容, 其值为 6 nF。  $\alpha_1, \alpha_2$  为回路方程的特征根,  $R_e$  为简化后的等效电路中的串联电阻值。由上式可计算出  $R_s$  为 3.8  $\Omega$ ,  $R_a$  约为 500  $\Omega$ 。

去掉水传输线以后, 当 Marx 发生器电压建立, 虚火花开关尚未导通时, Marx 发生器通过电容放电的等效电路如图 2 所示, 此时虚火花开关可视为开路。电路方程为

$$V_m = \frac{1}{C_m} \int_b^t i_m(t) dt + R_s i_m(t) + L_m \frac{di_m(t)}{dt} + R_a i_m(t) \quad (4)$$

由于  $R_s + R_a > 2\sqrt{\frac{L_m}{C_m}}$ , 故为非振荡情况, 此时电流为

$$i(t) = \frac{V_m}{L_m \sqrt{a^2 - 4b}} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}) \quad (5)$$

其中  $a = \frac{R_s + R_a}{L_m}$ ,  $b = \frac{1}{L_m C_m}$ ,  $r_{1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2}$ 。

由于 Marx 发生器直接与虚火花开关连接, 则加到虚火花开关上的电压上升很快, 在很短时间内就达到了峰值, 而不像改进前那样 Marx 发生器与 Blumlein 线连接, 输出电压平稳上升, 经 1  $\mu$ s 才达到峰值。由以上方程可推出电压上升到峰值的时间约为 64 ns, 电压峰值约为 300 kV。

在高电压下, 虚火花开关中气体开始电离, 形成等离子体。工作在低气压的空心阴极由于正的空间电荷的注入与其内部的电子电离及电子雪崩, 引起空心阴极效应发生, 逐极放电很快从阴极向阳极传播, 场强逐渐增强而导致多隙逐级电压击穿。最后发生类似于真空二极管的击穿过程, 从虚火花放电室的阳极口射出强自收缩的脉冲电子束和离子束, 产生很大电流。虚火花放电后的等效电路见图 4。

由于  $R_s + Z_{ps} < 2\sqrt{L_m/C_m}$ , 故为阻尼振荡情况。可求出此时的电流表达式为

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega \cdot L_m} e^{-\delta t} \sin(\omega \cdot t) \quad (6)$$

其中,  $\delta = (R_s + Z_{ps})/(2L_m) = 1.24 \times 10^6$ , 根据本实验室以前测出的虚火花放电电压、电流波形可大致估算出  $Z_{ps}$  最小约为 10  $\Omega$ ;  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_m C_m}$ ,  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 3.89 \times 10^6$ 。

由此得到的虚火花放电电流波形如图 5 所示。当  $t = 0.32 \mu$ s 时, 达到电流峰值为 10 kA, 电流脉冲半高宽约为 640 ns<sup>[6]</sup>。

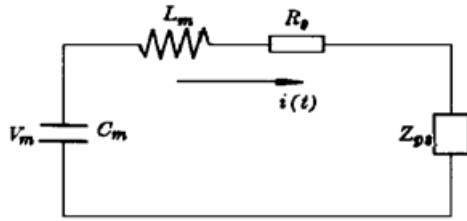


图 4 虚火花放电以后的等效电路

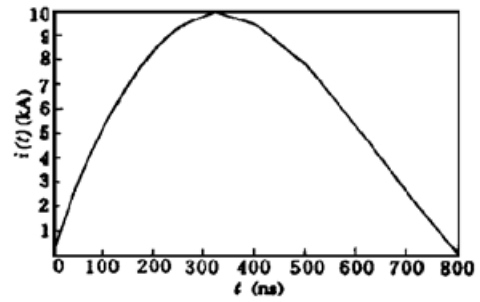


图 5 虚火花放电的电流波形

Fig. 4 Equivalent circuit after pseudospark discharge Fig. 5 Current waveform of pseudospark discharge

### 3 讨 论

由计算得出,对虚火花放电高压电源进行改进后,当 Marx 发生器输出峰值电压  $V_m$  为 300 kV 时,虚火花开关放电电流最大可达 10 kA,电流脉冲半高宽为 640 ns,电子束流最大可大于 1 kA。

今后进行小型化自由电子激光器的工作时我们还将对 Marx 发生器回路一些参数进行改进,如做成低电感放电回路或增大电容值,则 Marx 发生器的特性阻抗将增大,从而可获得更大的电子束流,归一化亮度也将进一步得到提高。必要时我们还可提高 Marx 发生器的输出电压以增大虚火花放电电流值。因此,上述方案对小型化自由电子激光器的实现具有重要意义。

**致谢** 对中国原子能科学研究院曾乃工教授提供的帮助深表谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Zhu Junbiao, Wang Mingchang, Wang Zhiji. Design of a new pseudospark-produced high-brightness electron beam source. *Chinese J. Lasers*, 1994, **B3**(5): 427~ 433
- 2 A. Brasch, F. Lange. *Naturwissenschaften*, 1930, **18**: 796~ 799; *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma Red.*, 1931, **70**: 10~ 14
- 3 T. H. Martin, R. S. Clark. Pulse microsecond high-energy electron beam accelerator. *Rev. Sci. Instrum.*, 1976, **47**(4): 460~ 463
- 4 王明常,王之江. 台式拉曼自由电子激光器建议. *光学学报*, 1995, **15**(7): 841~ 844
- 5 杨大为,王乃彦,张奎方等. 强流脉冲电子加速器充电调整. *全国高功率粒子束文集*, 1995
- 6 W. W. Destler, Z. Segalov, J. Rodgers *et al.*. High power, high brightness electron beam generation in a pulse-line driven pseudospark discharge. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15): 1739~ 1741

## Improvement of High-voltage Power of Pseudospark Discharge of Free Electron Lasers

Chen Jianfang Wang Mingchang Zhang Lifen Huang Yu Lu Bin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** A proposal of the improvement of high-voltage pulse of pseudospark discharge is given. The experimental device is presented and its possibility is analyzed theoretically. Thus the outline dimension of the traditional free electron laser (FEL) will be reduced greatly, which makes the compact FEL practical.

**Key words** free electron laser, pseudospark discharge, pulse forming line