

重复频率电子束源技术研究

张永辉 陈洪斌 康强 曹绍云 常安碧

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了一台自行研制的基于 Blumlein 双形成线和脉冲变压器的调制器型脉冲发生器,该发生器可以输出 300kV 高压脉冲,输出特性阻抗 100Ω,脉冲宽度 500ns,能在重复频率 100Hz 下稳定运行.以此为实验平台,进行了重复频率电子束源技术研究,并得到了电压 300kV、脉宽 500ns、重复频率 50Hz 的电子束输出.

关键词 电子束源 重复频率 Blumlein 形成网络 脉冲变压器 二极管

从 60 年代末期到 80 年代末期,为了满足各种与军方相关的应用,如核武器效应模拟、粒子束武器、自由电子激光及惯性约束聚变等的需要,强流脉冲加速器技术得到了长足发展.其重点是获取高的峰值功率^[1,2].近年来随着各种新概念武器发展的需要,对脉冲功率技术的要求越来越高,不但要求整个系统有高的峰值功率,更要求有高的平均功率.研究高功率高重复频率的电子束源技术是发展重复频率高功率微波源的基础和关键.其次,这样的电子束源还将在上述其他方面有很好的应用前景.在这方面,世界各国都不遗余力地进行着研究,其中美国和以色列联合研制的车载式 HPM 源,电子束源指标为电压 500kV、束流 5kA、脉宽 50—500ns 分十档可调、重复频率 100Hz.从 80 年代开始以来,在中国也开展了一系列高功率脉冲功率技术研究,并取得了一定的研究成果.而高重复频率电子束源技术的研究却起步较晚,为了研究二极管重复脉冲发射特性和在特定功率下脉冲宽度 τ 与重复频率 f 之间的关系,我们开展了 300kV 重复频率电子束源技术研究.本文拟从以下 4 个方面对该电子束源进行介绍.

1 总体设计

设计指标如下:

脉冲电压:300kV

脉冲宽度:500ns

脉冲电流:3kA

重复频率:10—100Hz

对于脉冲宽度较宽且工作频率较高的加速器,采用调制器型结构是最佳的方案^[3].这种结构的优点是:开关数量少易于实现控制,线路简单可使其结构紧凑,用脉冲

2001-12-24 收稿,2002-03-04 收修稿

国家 863 激光技术领域课题(863-410-7-3)及中国工程物理研究院应用电子学研究所(SJ011008)资助

变压器可以实现高重复频率工作等. 其原理框图如图 1 所示.

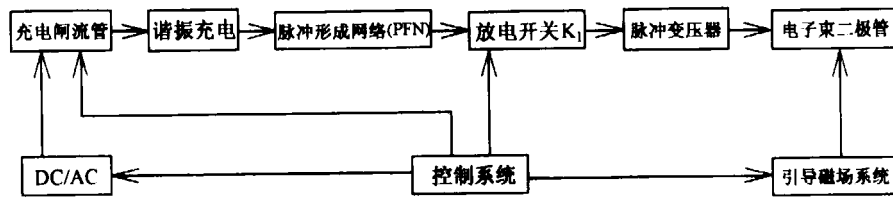


图 1 脉冲发生器原理框图

控制系统输出触发信号触发充电闸流管使其导通, 高压直流电源通过谐振充电电感将脉冲形成网络充电到预定电压后, 触发放电开关 K_1 使其导通, 这样, 在脉冲形成网络形成近似矩形的方波信号经高压脉冲变压器升压后作用于二极管, 从而使二极管产生电子束.

2 脉冲形成网络

理想的脉冲形成网络是能形成矩形脉冲信号, 这要求用无穷级谐振网络来满足矩形脉冲的傅里叶级数展开式, 即

$$\frac{E_0}{\rho} \sum_{n=1}^{+\infty} b_{2n-1} \sin(2n-1) \frac{\pi}{\tau} t = E_0 \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{\frac{C_{2n-1}}{L_{2n-1}}} \sin \frac{t}{\sqrt{L_{2n-1} C_{2n-1}}} \quad (1)$$

式中 $b_n = \frac{4}{(2n-1)\pi}$, 级电容与级电感可表述为:

$$C_{2n-1} = \frac{b_{2n-1} \tau}{(2n-1)\pi \rho} = \frac{4\tau}{(2n-1)^2 \pi^2 \rho}$$

$$L_{2n-1} = \frac{\rho \tau}{(2n-1)\pi b_{2n-1}} = \frac{\rho \tau}{4}$$

其中脉冲宽度 $\tau = 2n \sqrt{LC}$, 形成线阻抗 $\rho = \sqrt{L/C}$.

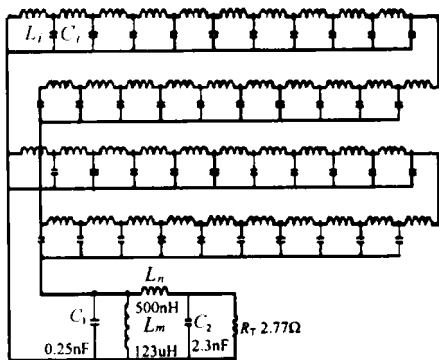


图 2 Blumlein 形成网络等效电路图
形成网络每节参数: $L_i = 69\text{nH}$, $C_i = 9\text{nF}$

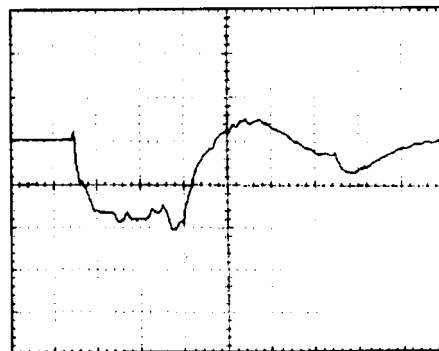


图 3 脉冲形成网络输出电压波形
30kV/div, 200ns/div.

从(1)式或(2),(3)式可以看出,要得到理想矩形脉冲需要无穷级谐振网络,这在实际应用中是不可能的.但有一种趋势,即谐振网络级数越多,负载输出波形就越接近于矩形.

本实验中 Blumlein 脉冲形成网络(PFN)采用双形成线并联工作. Blumlein 线特性阻抗 2.77Ω ,由 10 级组成,脉冲宽度 500ns. 放电开关 K_1 采用 EEV 公司生产的 CX1725 闸流管.

图 2 所示为 Blumlein 形成网络的等效电路图. 图中参数为理想状态值,实际调试中由于引线阻抗影响,形成线输出脉冲波形前后沿较大,但在应用中已基本满足要求,输出脉冲幅值为 50kV. 典型输出波形如图 3 所示.

3 重复频率脉冲变压器

为优化电路和运行可靠并考虑到热阴极二极管的要求,变压器次级采用双绕组结构^[4],利用两个并联的高压线圈构成灯丝电流回路,实现绕组高压脉冲放电和低压交流供电的双重功能. 变压器前级采用并联 Blumlein 线作为 PFN,设计要求脉冲形成线任意一路单独运行或两路并联时脉冲变压器都能正常工作,确保两种阻抗的二极管均产生较好的电子束流. 这种两级双绕组四段并联结构具有以下一些特点:(1)绕组终端(高压)都在窗口中间,保证了电场均匀过渡,同时也降低了对铁心的绝缘压力;(2)可以实现两路脉冲源对变压器交替工作,提高低功率调制器的重复能力;(3)既降低了漏感和分布电容,同时变压器的重量体积都得到了优化.

该双绕组脉冲变压器现已达到如下技术指标:

输入电压幅值: $U_{1m} = 50\text{kV}$; 输出电压幅值: $U_{2m} = 300\text{kV}$

脉冲电流峰值: $I_{2m} = 3\text{kA}$

脉冲宽度 ($U_{2m0.5}$): $\tau \geq 500\text{ns}$

前沿 ($U_{2m0.1} \sim U_{2m0.9}$): $t_r \leq 150\text{ns}$; 后沿 ($U_{2m0.9} \sim U_{2m0.1}$): $t_f \leq 200\text{ns}$

重复频率: $f = 100\text{Hz}$.

4 重复频率二极管

4.1 二极管理论模型

重复频率强流电子束二极管是产生高功率电子束的关键部件. 对于磁浸没无箔二极管,由于外加轴向磁场的作用,使得二极管的物理过程更加复杂. 二极管物理过程主要包括电子的运动、爆炸发射形成的阴极等离子体的运动、二极管内电磁场的变化等,要给出这些物理过程的解析解有很大难度. 有关无箔二极管的理论研究大多是在理想条件下利用一系列简化处理进行分析,给出二极管行为的一些定性规律,这些规律有助于二极管的工程设计和对实验结果进行分析.

无箔二极管理论模型主要有两种,第一种是实心束无箔二极管,即二极管阴极产生的

电子束是实心的.按照该模型,二极管空间电荷限制电流可由下式近似给出:

$$I_l = \frac{m_0 c^3}{e} \frac{(\gamma_0^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2\ln(R_A/r_2)}, \quad (4)$$

式中 R_A 和 r_2 分别是漂移管阳极半径和阴极外半径, $\gamma_0 = 1 + eV_0/m_e c^2$, 其中 V_0 为二极管阴阳极间隙电压, m_e 为电子质量, c 为光速, e 为电子电荷量.

第二种模型是环形束无箔二极管,即二极管阴极产生的电子束是空心的,在引导磁场的作用下沿着漂移管的内侧以螺旋状向前运动.该二极管模型产生的空间电荷限制电流为

$$I_l = (\gamma_0^{2/3} - 1)^{3/2} \frac{m_0 c^3}{e} \left(1 + 2\ln \frac{R_A}{r_2} - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)^{-1}, \quad (5)$$

式中 r_1, r_2 分别是二极管阴极内、外半径.

这两种模型的无箔二极管都需要外加引导磁场以控制束流的扩散,引导束流传输并进入微波器件中的互作用区.第二种模型的二极管产生的环形电子束空间电荷限制电流明显大于实心束模型.因此,在微波器件实验中常常使用环形电子束,一方面是因为环形电子束可以传输大的电流强度,另一方面是因为环形电子束可以以更高的效率在微波器件中进行束波互作用.

在我们的设计中,采用第二种理论模型,即基于引导磁场和环形电子束的空间电荷限制电流模型进行理论计算.这种磁浸没阴极发射的电子束流沿磁力线方向运动,但束流受空间电荷限制电流的限制.

4.2 二极管实验研究

在实验中我们仍然沿用传统的场发射技术.但为了克服二极管加速间隙受到阴极等离子体的影响而产生闭合现象,首先要选取一种发射电子效率高、形成表面等离子体密度小的阴极材料;其次要对二极管的阴阳极结构进行优化设计,一方面是考虑使阴极形成低密度或不形成等离子体,以提高二极管间隙的恢复速率^[5];另一方面主要是考虑二极管的耐压问题^[6-9].为了束流引出和外加磁场方便,实验中采用径向绝缘二极管,主要是考虑避免阴极杆发射的电子打到绝缘子上,引起绝缘子寿命缩短的现象.传统的轴向绝缘二极管,由于阴极杆发射电子或阴极回流电子轰击绝缘子表面造成绝缘子表面闪络并使绝

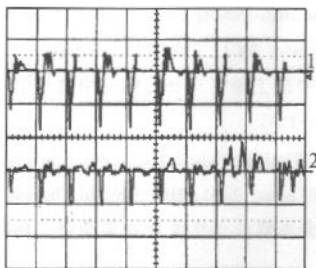


图 4 二极管电压电流重复波形
1 电压, 2 电流.

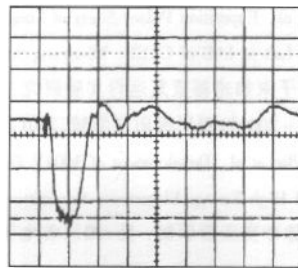


图 5 电流展开波形
500ns/div, 300A/div.

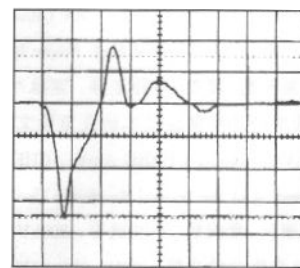


图 6 电压展开波形
500ns/div, 90kV/div.

缘子寿命减短和造成真空污染。而径向绝缘二极管不但克服了上述缺点,而且提高了绝缘子的表面闪络耐压,减小了二极管几何尺寸

利用该实验平台,我们进行了青铜、铝和石墨阴极研究,结果发现,青铜与铝阴极在高重复频率下工作时发射很不稳定,而且烧蚀比较严重;而石墨阴极相对来说烧蚀比较轻微,而且已经达到了重复频率 50Hz。

由于脉冲宽度的影响,二极管状态恢复受限,因此,重复频率过高时二极管常常会出现短路现象。目前,我们做到的水平是:电压 300kV、重复频率 50Hz,典型波形如图 4—6 所示。

由于形成网络采用的是谐振充电,所以第一组波形幅值较低。其中图 5、图 6 分别是图 4 中第七组脉冲的电压、电流展开波形。由实验波形可以看出,二极管虽实现了 50Hz 重复运行,但其电压、电流都欠稳定。尤其是最后几个脉冲,由于二极管内热量聚集及等离子体的影响,电流波形变得极不稳定,该工作现还在进行。

5 结束语

经过理论设计及实验运行,加速器形成网络及脉冲变压器部分已实现了 300kV、100Hz 的重复运行。重复频率电子束二极管由于阴极等离子体的影响虽未达到指标要求,但也实现了电压 300kV、重复频率 50Hz 的电子束输出。

这一工作的开展不但促进了国内重复频率电子束源技术的研究进程,而且研究探索了形成线、脉冲变压器及二极管等关键技术,为今后研制更高功率的重复频率脉冲功率源奠定了技术基础。

在该项工作的研究过程中得到了陈裕涛研究员和胡克松研究员的精心指导,同时也得到了江金生研究员的指导,在此向他们表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 1 Neau E L. High Average Power High Current Pulsed Accelerator Technology. NTIS No:DE95011603/HDM, 1995
- 2 Gennady A M. Vacuum Discharge Effects in the Diodes of High-Current Electron Accelerators. IEEE Trans. on Plasma Sci. 1991, 19(5):683—689
- 3 CHANG An-Bi, TAN Jie, MA Qiao-Sheng et al. Repetition Pulses Study of Long Pulse High-Density Electron Beam Accelerator. In: Proceeding of High Power Microwave Lab in IAE of CAEP. Mianyang Science city, 2001, 130—135(in Chinese)
(常安碧,谭杰,马乔生等.宽脉冲强流电子束加速器重复运行实验研究.见:中国工程物理研究院应用电子学研究所高功率微波技术研究室论文集(1998~2001),四川绵阳科学城,2001,130—135)
- 4 KANG Qiang, CHANG An-Bi, CHEN Hong-Bin et al. Development of 300kV Double Windings Pulsed Transformer. In: Proceeding of the Second Academic Conference of High Energy Electronics Committee of SiChuan. 2001, 186—189(in Chinese)
(康强,常安碧,陈洪斌等.300kV双绕组脉冲变压器研制.见:四川省电子学会高能电子学专业委员会第二届学术交流论文集,2001,186—189)
- 5 Miler R B. An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams [M]. New York and London:Plenum Press, 1982
- 6 Gennady A M. Vacuum Discharge Effects in the Diodes of High-Current Electron Accelerators [J]. IEEE Trans. on Plasma Sci. 1991, 19(5):683—689

- 7 Jaitly N C, Sudarshan T S. Novel Insulator Designs for Superior DC Hold-Off in Bridged Vacuum Caps [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1987, 22(6):801—810
- 8 Miller H Craig. Flashover of Insulators in Vacuum Review of the Phenomena and Techniques to Improve Holdoff Voltage [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(4):512—527
- 9 McClenahan C R, Martinez L E, Pena G E et al. Repetitive, Electron-Beam Diode Development. NTIS No:DE93019017HDM, 1993

Development of Repetition Frequency Electron-Beam Generator Technology*

ZHANG Yong-Hui CHEN Hong-Bin KANG Qiang CAO Shao-Yun CHANG An-Bi

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract A modulator type pulse generator which is based on Blumlein Pulse Forming Net and pulsed transformer, constructed by us is described in this paper. This generator can deliver pulse of 300kV to a load, and it has an output impedance of 100Ω and a pulse width of 500ns. It can operate steadily at pulse repetition rates as high as 100Hz. Three kinds of cathodes are studies on this pulse generator, and the diode can deliver electron-beam pulse of nearly 300kV, pulse width 500ns and repetition frequency 50Hz.

Key words electron-beam, repetition frequency, Blumlein PFN, pulsed transformer, diode

Received 24 December 2001, Revised 4 March 2002

* Supported by Laser Technology of Nation 863 Project (863 - 410 - 7 - 3) and Institut of Applied Electronics, CAEP (SJ011008)