

文章编号: 1001-4322(2000)05-0631-04

# 重复 Tesla 变压器型相对论电子束加速器的初步试验

丁 剑, 韩 文

(清华大学电机系气体放电与等离子体实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 研制了一台重复率 Tesla 型相对论电子束加速器。空心 Tesla 变压器对充油 Blumlein 传输线充电; 主开关为自击穿油间隙; 二极管为平面阴极有箔二极管。试验在重复率为 0.2 Hz 和 1 Hz 下分别进行。当重复率为 0.2 Hz 时, 加速器连续重复放电 70 次以上。二极管电压幅值 300 kV, 脉宽 30 ns, 上升沿约 5 ns。

**关键词:** 重复率相对论电子束加速器; Tesla 变压器; Blumlein 传输线

中图分类号: TL503.5

文献标识码: A

随着近代高技术领域, 如高功率微波、强激光技术的不断发展, 重复频率脉冲功率技术已成为脉冲功率技术领域的重要研究课题<sup>[1,2]</sup>。强流相对论电子束加速器(Relativistic Electron Beam Accelerator, 简称 REBA)按照对成形线充电方式的不同, 通常可以分为两种型式: Marx 发生器型和 Tesla 变压器型。由于 Marx 发生器体积大, 开关多, 难于实现重复运行, 因而用 Tesla 变压器作为一种初级电源来代替 Marx 发生器受到人们广泛关注。Tesla 变压器也称双谐振变压器, 工作时变压器原副边同时谐振, 产生高频高压, 对成形线充电。它具有开关少、触发控制简单可靠、体积小、易于实现重复率等特点<sup>[3]</sup>。目前俄罗斯在高功率微波中已研制出 Tesla 型重复率系列加速器和微波器件<sup>[4]</sup>。我国九院、国防科大、清华大学也相继开展了重复率 Tesla 型 REBA 研究。

本文介绍清华大学气体放电与等离子体实验室利用已有的一台 500 kV 高压纳秒脉冲发生器, 以它为基础成功地研制出了重复率的变压器型相对论电子束加速器, 设计了 L-C 恒流充电系统、二极管、同步控制和测量单元等, 并对其在重复率下的特性进行了初步研究<sup>[5]</sup>, 为进一步研究重复率 REBA 积累经验。

## 1 装置说明

重复率 REBA 由 L-C 变换器恒流充电回路、Tesla 变压器、Blumlein 传输线、二极管、开关、测量系统和控制系统构成, 其主要电路图如图 1 所示, 图中各部分简要说明如下。

### 1.1 恒流充电回路

设计了单相 L-C 变换器作为电压源-电流源变换器, 它是利用理想情况下 L-C 谐振时变换器输出电流与负载无关的原理来保持在充电过程中充电电流大小不变。它具有充电速度快、效率高、不怕短路等特点, 其工作原理如图 1 所示。该变换器的最大输出电流为 22 A。双套管变压器  $T_2$  的副边采用桥式整流的方式对电容 ( $0.56 \mu\text{F}$ , 50 kV) 充电。电容  $C_1$  充放电用可控硅 TH 控制, 当  $U_{C1}$  电压达到预定值时, 控制 TH 导通, 停止充电。选定重复率下两次放电的时间间隔为  $T$ , 90%  $T$  用于充电, 10%  $T$  停止充电, 即放电时间和相应等待充电的时间。

### 1.2 Tesla 变压器

采用空心 Tesla 变压器, 其原边和副边线圈的耦合系数  $k=0.6$ , 副边的绝缘强度大于 500 kV。根据电路分析的结论, 当满足条件  $L_1 C_1 = L_2 C_2$  时, 开关  $G_1$  导通后即在 Tesla 变压器回路中产生双谐振, 副

收稿日期: 1999-09-09; 修订日期: 2000-07-25

基金项目: 清华大学校内基金资助课题(JC05)

作者简介: 丁 剑, 男, 1974年3月出生, 硕士, 现在中国大唐电信公司成都通信部工作。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

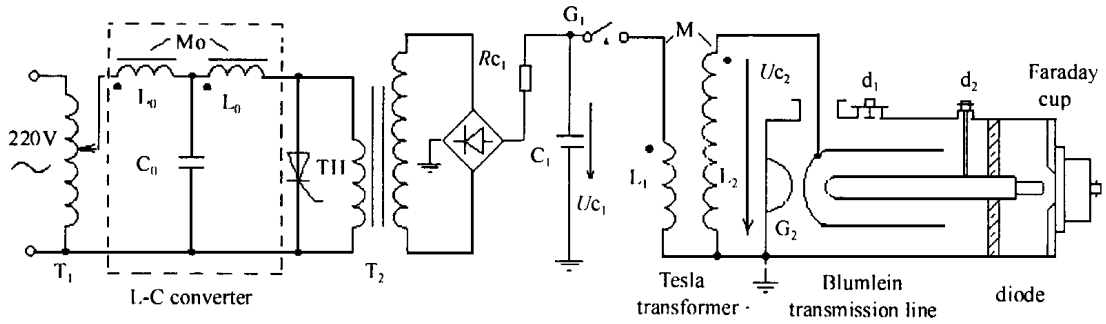


Fig 1 Basic electrical circuit of repetitive REBA

图1 重复率 REBA 系统主电路图

边电压在第二个峰值处达到最大值并对 Blumlein 传输线充电。

Blumlein 传输线等效电容为 1200pF, 经过对  $L_1$  的调节, 电路达到谐振条件, 其实际升压比达到 17~18. Tesla 变压器初级开关  $G_1$  是多极串联火花空气间隙, 工作范围 3~45kV, 能够满足重复率放电的要求。

### 1.3 Blumlein 传输线

采用了长 30m, 直径 360mm 的双同轴传输线作为成形线, 阻抗 50 $\Omega$ , 输出电压脉宽 30ns. 该 Blumlein 传输线的主开关  $G_2$  是自击穿油间隙, 工作时应调整间隙距离, 使其在  $U_{c2}$  最大值到来时导通, 从而达到最大的能量传输效率。

油开关  $G_2$  对于重复率运行是不利的, 主要问题是油间隙击穿, 其绝缘强度降低. 但是在本装置的低重复率 (0.2Hz 和 1Hz) 运行下, 仍有可能实现重复率工作。

### 1.4 二极管

设计了平面阴极有箔二极管. 阴极发射体为碳毡, 直径 5cm. 阳极箔为 30 $\mu$ m 厚的钛箔, 直径 7cm. 对二极管的静电场用模拟电荷法进行了计算, 结果表明, 设计的二极管电场分布合理, 不存在局部电场突变增大而不利于绝缘的畸变点, 电子发射和加速时的电场强度相对最大, 而且分布均匀, 有利于电子束的形成和加速。

为满足负载匹配的要求, 应使二极管等效阻抗为 50 $\Omega$ , 而二极管阻抗与阴阳极距离有关, 因此将阴阳极距离  $d$  设计成可调, 通过实验来确定. 最终确定  $d=19$ mm 时, 二极管阻抗接近匹配。

## 2 试 验

Tesla 变压器输出电压 (即 Blumlein 线充电电压)  $U_{c2}$  采用电容分压器  $d_1$  结合 Tek7623 示波器测量, 经过校订其分压比为 6500. 二极管电压  $U_d$  用硫酸铜电阻分压器  $d_2$  结合 OK-19 高压示波器测量, 该分压器的实验阶跃响应时间为 2.5ns, 满足纳秒脉冲测量要求. 二极管束流采用法拉第筒测量, 其灵敏度 185A/V, 在输入方波电流时的输出电压上升时间 4ns, 满足纳秒电流测量要求。

试验电路原理如图 1 所示, 图 2 为单次放电时 Tesla 变压器输出电压波形. (a) 为开关  $G_1$  导通后  $G_2$  不导通时 Tesla 变压器输出到 Blumlein 线中筒的电压波形, 即加在  $G_2$  两端的高频高压  $U_{c2}$ . 用分压器  $d_1$  和示波器测量, 幅值  $U_{c2}=320$ kV, 周期为 19.5 $\mu$ s. (b) 为油间隙  $G_2$  击穿时变压器副边电压波形,  $G_2$  在  $U_{c2}$  到达幅值时击穿, 这也是 Tesla 变压器对 Blumlein 成形线充电的波形。

试验是在重复率为 0.2Hz 和 1Hz 下分别进行. 图 3 为 Tesla 变压器重复率运行输出的电压波形. (a) 为电压 320kV、重复率 0.2Hz、重复放电 70 多次的波形, 示波器时标为 5s/div. (b) 为电压 320kV、重复率 1Hz、重复放电 10 多次的波形, 示波器时标为 1s/div. 图 4 为连续放电条件下 (0.2Hz) 二极管的电压电流波形. 示波图的扫描频率为 10MHz, 电压幅值 300kV, 半高宽 30ns, 束流 1.3kA。

## 3 结 论

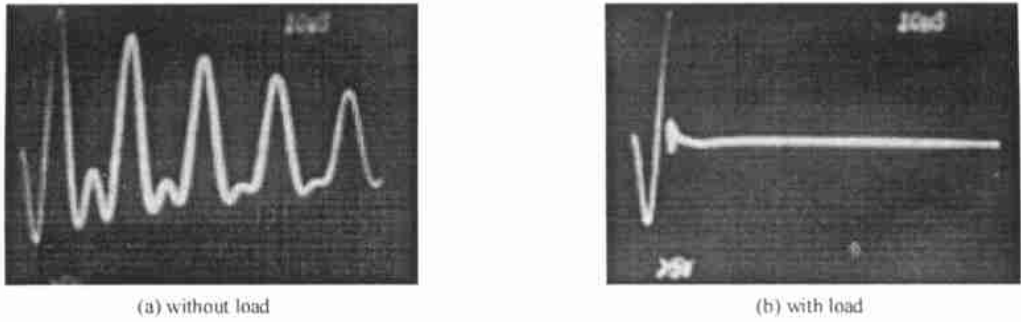


Fig 2 Oscillogram of output voltage of Tesla transformer under single operating  
图2 Tesla 变压器输出电压波形

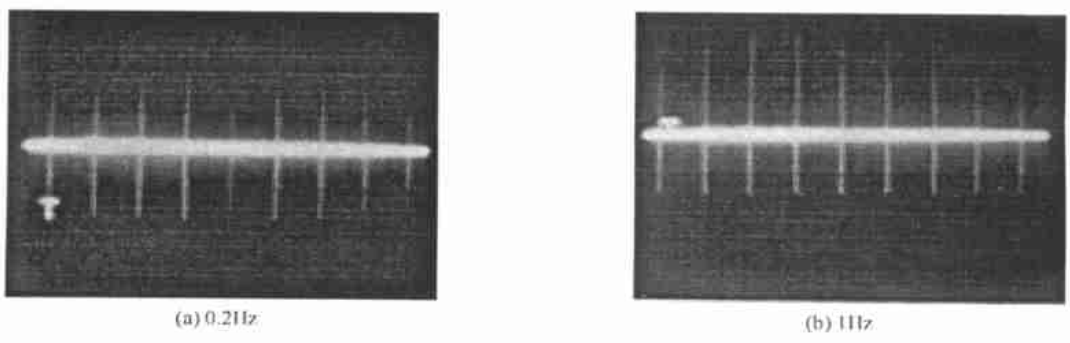


Fig 3 Oscillogram of output voltage of Tesla transformer under repetitive operation  
图3 Tesla 变压器重复率运行输出电压波形

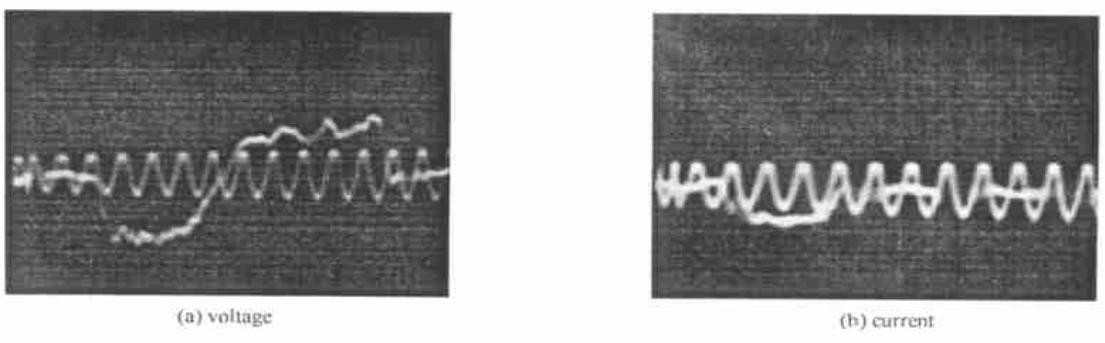


Fig 4 Oscillogram of voltage and current of diode under repetitive operation  
图4 连续放电条件下二极管的电压、电流波形

- (1) Tesla 变压器在0.2Hz 和1Hz 条件下均能长时间稳定运行。
- (2) 重复率相对论电子束加速器在0.2Hz 重复率下系统正常运行, 油开关在 Blumlein 线充电电压峰值处击穿, 连续运行70余次, 二极管和束流均保持稳定。当 Tesla 变压器原边电压为17.2kV 时, 输出电压为320kV, 二极管电压300kV, 脉宽30ns, 上升沿5ns, 二极管束流1.3kA, 脉宽30ns, 上升沿10ns。
- (3) 重复频率为1Hz 时, REBA 系统放电10余次以后不能持续正常重复运行, 其主要原因是主开关为油开关, 在每秒一次放电的情况下, 变压器油绝缘强度不能及时恢复, 造成下一次在电压峰值到来之前就击穿。
- (4) 二极管阳极为30μm 厚的钛箔, 由于束流较小, 在试验过程中, 阳极箔累计放电约400次未损坏。
- (5) 本试验装置若将主开关改为充气开关, 二极管改为无箔二极管, 可提高重复率, 能较长时间运行。

**参考文献:**

- [1] 王乃彦 新兴强激光[M]. 北京: 原子能出版社, 1992. 8~ 14.
- [2] Benford J N, Cooksey N J, et al. Techniques for High power Microwave sources at High Average power. *IEEE Trans On PS*, 1993, **21**: (4): 388~ 392.
- [3] Clark M C, Earley L M, et al. A repetitively-pulsed virtual cathode oscillator (VCO) [J], 1985, **30**(9): 1612~ 1613.
- [4] Yalandin M I, Smirnov G T, et al. High-power repetitive millimeter range back-wave oscillators with nanosecond relativistic electron beam [A], Proc. 9th IEEE Int. Pulsed power conf. [C], California, 1993. 388~ 391.
- [5] 丁剑. Tesla 变压器型相对论电子束加速器的研制[D]. 北京: 清华大学, 1999年6月.

## **Preliminary Experiments of a Repetitive Relativistic Electron Beam Accelerator Using Tesla Transformer**

DING Jian, HAN Min

*(Gas Discharge and Plasma Laboratory, Department of Electrical Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

**ABSTRACT:** A repetitive Tesla-type relativistic electron beam accelerator was constructed and tested. A Tesla transformer with air core was adopted in the accelerator for charging of oil-filled Blumlein transmission line. The diode with flat cathode and meter foil anode was constructed. The main switch of the accelerator is a self-breakdown oil spark gap. Preliminary experiments were performed under repetition rate 0.2 Hz and 1 Hz. At 0.2 Hz, relativistic electron beam accelerator continuously operated for over than 70 shots. The voltage amplitude of diode of 300 kV, the pulse width (FWHM) of 30 ns and the rise-time of 5 ns were obtained.

**KEY WORDS:** repetitive relativistic electron beam accelerator; Tesla transformer; Blumlein line