运用谐振触发方式的 RSD 脉冲电源*

胡乾　余岳辉　彭昭廉　李焕炀　杜如峰
华中科技大学电子科学与技术系(武汉 430074)

摘　要:本文提出了一种运用谐振原理的可重复 RSD 脉冲电源。分析电路的工作特性并对其重要元件磁开关进行了重点设计,给出了实验结果,最后提出了几种改进电路参数的方法。

叙　词:RSD　脉冲电源　磁开关　谐振

1　前言

本世纪末 70 年代后期,随着核物理技术、电子束、加速器、激光技术、放电理论和等离子体技术等的研究和日益广泛的应用,脉冲功率技术得到迅速的发展,现已成为一门十分完整的先进科学技术。所谓脉冲功率技术主要是指将很大的能量(通常是几百千焦耳至几十兆焦耳)储存在储能元件中(通常为电容器、电感器等),然后通过快速开关将此能量在极短的时间内释放到负载,以得到较高的功率。传统的可控硅开关器件基于门极触发,延缓了导通过程,加大了功耗,对于需要高幅值的脉冲电源来说是非常不利的。前苏联 I. V. Grekhov 教授等研制了一种基于等离子体触发的新型功率器件——RSD(Reversely Switched Dinistor),该器件具有开通时间短(纳秒级)、开通电流大(数百千安)等优点。本文利用我们新近研制出的芯片直径为 ϕ38 和 ϕ24 两种规格的 RSD 进行了 50Hz 脉冲发生试验,得到了重复频率下的 RSD 脉冲电源开通实验结果,对于进行更高频率的试验研究具有指导意义。

2　RSD 的结构与开通特性

RSD 器件是由数千个非对称晶闸管和晶体管单元交错排列

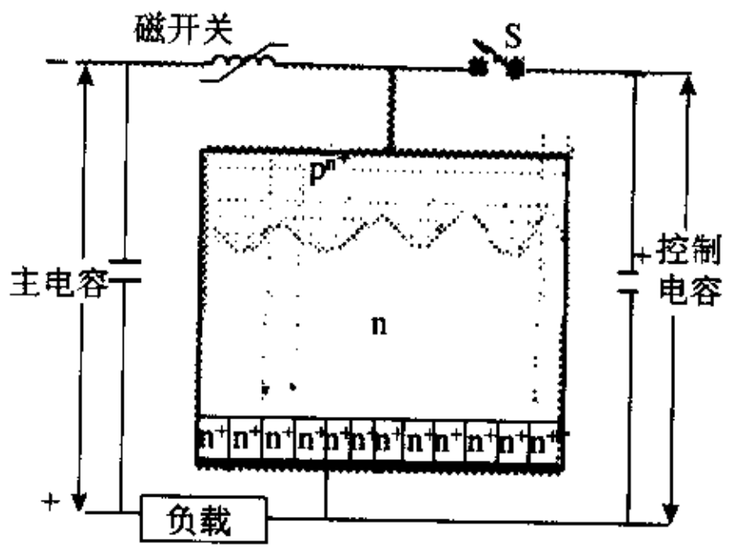


图 1　RSD 的基本结构和开通模式

组成(如图 1 所示),每个单元的特征尺寸远小于 n 基区的厚度。中间 pn 结反向偏置,阻塞外加正向电压。磁开关用于主电路与触发电路的延迟。闭合开关 S,反向电流流过晶体管部分,n^+ p 结反偏击穿,等离子体注入 n 区。由于 n 基区厚度远大于单元特征尺寸,整个集电区形成均匀等离子层。触发过程持续 1 – 2μs,磁开关饱和,外加电压极性翻转,外部电场从等离子层中抽取空穴到 p 区,并伴随电子从 n^+ 区反向注入 p 区,随后整个器件同时开通。

3　基于 RSD 的重复脉冲电源设计

3.1　脉冲电源电路基本结构

RSD 的触发开通电路有两种触发方式:直接注入反向电流和间接注入反向电流。采用间接触发开通方式开通效率高,损耗小,但只适应单次脉冲应用。而采用间接注入反向电流开通方式,损耗在脉冲变压器、传输线路上的能量大些,但较前一种方式更易于实现控制,更适用于重复脉冲情况。本文着重讨论后一种触发方式。

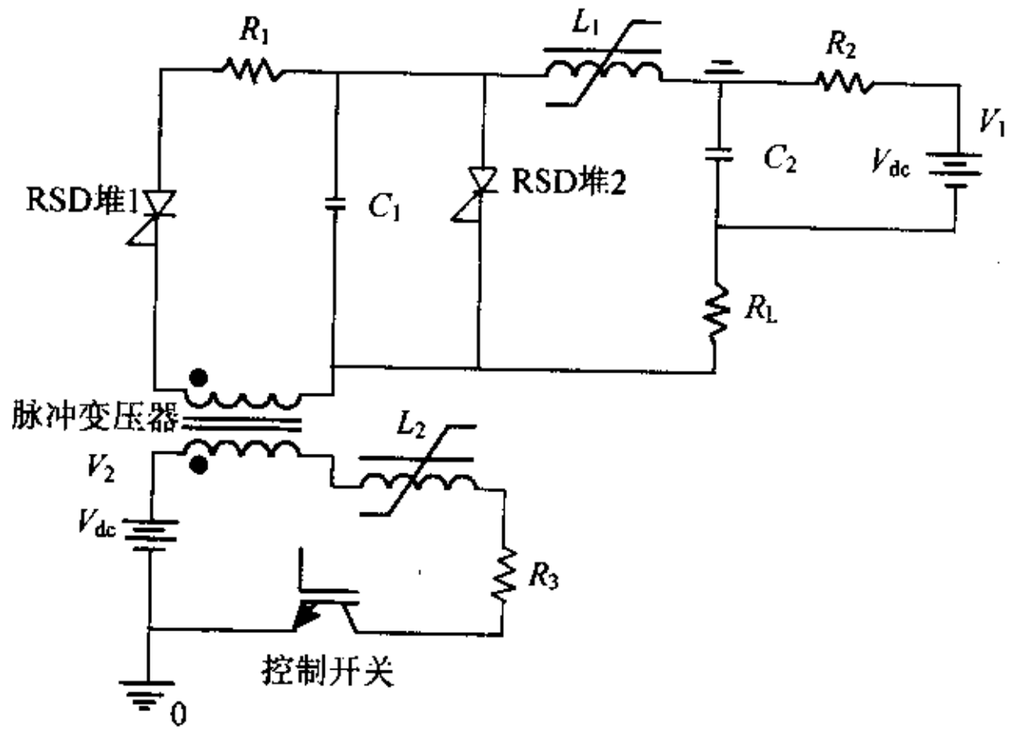


图 2　RSD 脉冲电源原理图

如图 2 所示,V_1、V_2 是相互独立的电源,分别为主回路充电电源和触发回路充电电源,通过控制开关(本实验采用可控硅)将电流注入脉冲变压器,经过脉冲变压器将电流换向后间接注入主回路,并对 RSD 堆 1 形成反向触发脉冲电流,首先开通 RSD 堆 1。RSD 堆 1 导通后,由触发回路、RSD 堆 1、脉冲变压器副边、

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50277016)。

R_1 和 C_1 组成的谐振回路提供更大的反向电压将反向触发电流注入 RSD 堆 2，然后由 V_1、R_2 和 C_2 组成的主放电回路开通主回路。合理选择磁开关使磁开关的饱和时间约等于两只 RSD 堆开通时间和半个谐振周期之和。

图中所用 RSD 堆 1 样品管芯直径为 ϕ24，主回路 RSD 堆 2 样品是由十只 ϕ38 的 RSD 串联，RSD 堆 2 耐压为 22KV。C_1 = 0.2μF，主回路电容 C_2 = 10μF。磁开关 L_1 的非饱和自感为 10mH，L_2 的非饱和自感为 2.5mH。脉冲变压器原边非饱和自感为 0.958mH，原边匝数为 3 匝，副边匝数为 28 匝。脉冲变仅用来改变触发电压极性，对变比没有特殊要求。

3.2 磁开关与磁压缩

磁开关的工作原理是基于磁性材料的非线性特性，即磁开关可在一定时间内阻断直流电压，一旦磁开关达到饱和，磁性材料的磁导率 μ 迅速下降几个数量级，电感随之迅速下降，主回路随即开通。磁芯选择应满足频性特性好、高频损耗小、初始磁导率高、饱和磁通大等条件。钴基非晶合金软磁材料是磁开关设计中较为理想的磁芯材料。已知磁开关的饱和时间

$$\tau_s = \frac{2\Delta B \cdot N_k \cdot A_k}{V_0} \tag{1}$$

式中，ΔB 为线圈磁通变化量；N_k 为线圈匝数；A_k 为磁芯截面积；V_0 为输入端电压。可见在外加电源一定时，磁开关的饱和时间仅由磁芯参数决定。采用小 RSD 堆触发开通大 RSD 堆的方法，要求磁开关 L_1 的饱和时间稍大。并且随着饱和时间增大，触发注入 RSD 的预充电荷增大，能够有效提高 RSD 的电压开通特性。对于特定磁芯材料来说，加大线圈匝数是提高饱和时间最直接的方法。同时由于磁开关饱和时电感

$$L_s = \frac{\mu_0 \cdot A_k \cdot N_k^2}{l} \tag{2}$$

μ_0 为真空磁导率；l 为磁路长度。可见加大匝数会增加主电路的杂散电感。因此 L_1 的线圈匝数不宜太大。

RSD 触发开通的重要条件是反向注入电流，为了给 RSD 提供一个脉宽更短、峰值更高的反向注入电流，我们在触发回路中采用了一级磁压缩技术。磁压缩的目的是将脉宽较大的电流脉冲压缩成为具有窄脉宽、陡前沿且能量更加集中的脉冲。对应于多极压缩电路，磁开关的选取应满足下列条件：

$$20 l_{ks} \leqslant l_{(k-1)s} \leqslant \frac{1}{20} l_k \tag{3}$$

l_{ks} 为 k 级磁开关饱和电感；l_k 为 k 级磁开关非饱和电感。

即

$$20 \leqslant \frac{l_{(k-1)s}}{l_{ks}} \leqslant \frac{1}{20} \frac{l_k}{l_{ks}} \tag{4}$$

第 k 级电流脉宽压缩比为

$$n_k = \frac{\tau_k}{\tau_{(k+1)}} = \sqrt{\frac{l_{(k-1)s}}{l_{ks}}} \tag{5}$$

代入上式得

$$\sqrt{20} \leqslant n_k \leqslant \sqrt{\frac{\mu_k}{20\mu_{ks}}} \tag{6}$$

多级压缩电路总的压缩倍数 $n_{总} = n_1 \cdot n_2 \ldots n_k$。对于常用的软磁材料 $\mu_k = \mu_c \cdot \mu_0$（对非晶软磁材料，$\mu_c$ 大约为 1500-1600），$\mu_{ks} = \mu_0$。上式可以写为

$$20^{\frac{1}{k}} \leqslant n_{总} \leqslant \left(\frac{\mu_c}{20}\right)^{k/2} \tag{7}$$

合理选取 k 值，即磁开关的级数，可以产生符合要求的电流脉宽压缩比。本次试验仅选择一级磁压缩。

3.3 谐振回路

由 C_1、R_1、脉冲变副边和 RSD 堆 1 组成的触发回路，在用小管芯压制成的 RSD 堆 1 开通后形成谐振回路，当 C_1 谐振反向充电时，由于主回路磁开关 L_1 的隔离作用，使得 C_1 对大管芯压制成的 RSD 堆 2 反向放电，从而提供 RSD 堆 2 反向注入电流，开通 RSD 堆 2。谐振回路应满足条件

$$R1 < 2\sqrt{\frac{l_{PT2}}{C1}} \tag{8}$$

式中 T_2 代表脉冲变副边电感值。

4 试验结果分析与改进

原边电压 500V 条件下的触发 RSD 堆 1 的开通波形如图 3 所示，通过耦合方式注入反向电流也具有较好的开通波形。主 RSD 堆的开通波形如图 4 所示，试验中对磁开关 L_1 选取不同的匝数所测的波形。从图中可以看出磁开关采用 10 匝绕组的 RSD 电流波形比采用 3 匝绕组的波形更平滑，流过 RSD 的电流幅值更高，脉宽更大；电压波形开通后抖动更小。当磁开关匝数增大，电路中的杂散电感增大，电流波形抖动更大，符合我们的分析。因此磁开关的匝数要选取适当，不宜过大，也不宜过小。从图 4(b)的反向电流的持续时间来看，触发回路的谐振周期达到了 5 个微秒，在不改变脉冲变压器参数的前提下，可以通过减小

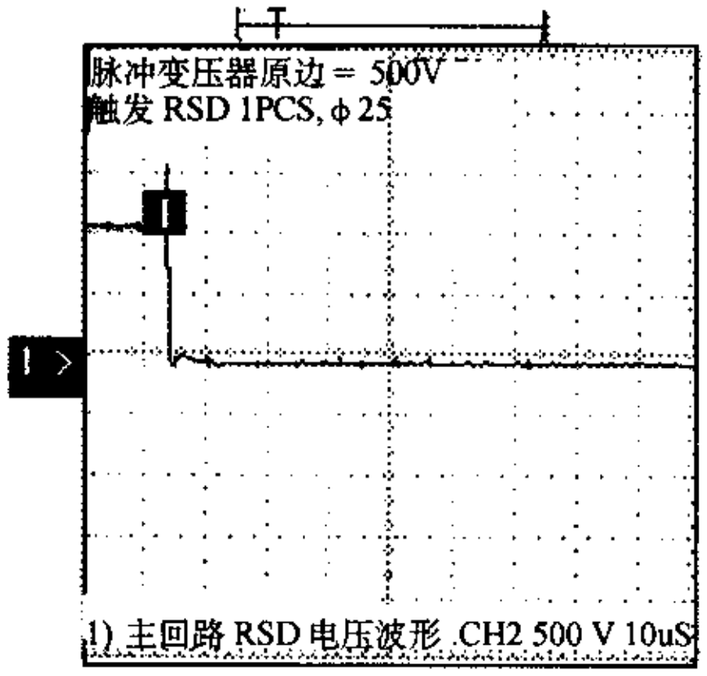
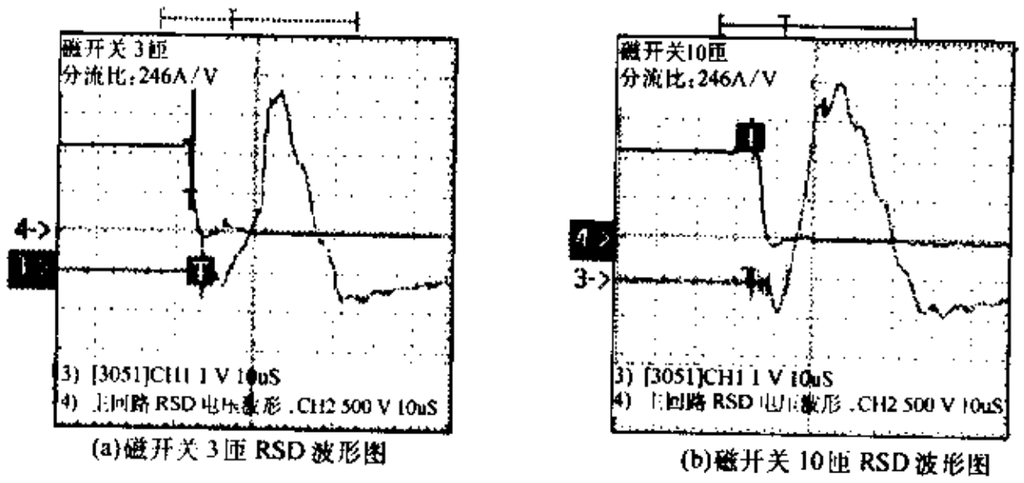


图 3 RSD 堆 1 电压开通波形

R_1、C_1 的值来减小电路的谐振周期。



(a)磁开关 3匝 RSD 波形图　　(b)磁开关 10匝 RSD 波形图

图 4　磁开关采用不同匝数时 RSD 开通波形的比较

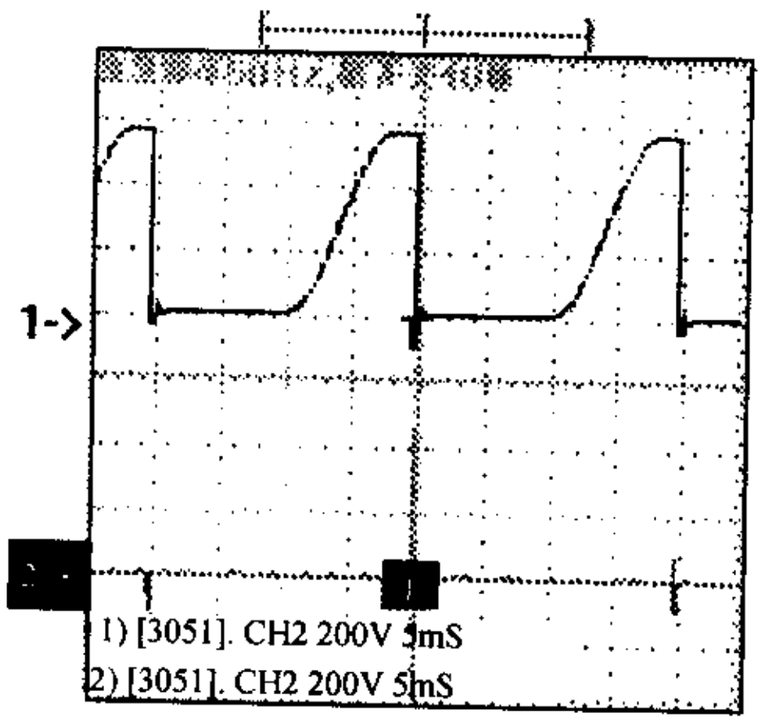


图 5　50Hz 时 RSD 的开通波形

在 50Hz 的触发频率下 RSD 的开通波形如图 5 所示，可以看出 RSD 的电压开通波形正常，但电流波形并不稳定，造成这一结果的主要原因是主回路的磁开关 L_1 在每次开通后并没有及时复位，电路中的脉冲动作没有处于稳定状态造成的。可以通过可饱和电感附加绕组和电流源对磁芯进行复位，使饱和电感稳定工作。其原理是产生一个负向的磁场强度 H_r，给磁芯复位，复位电流大小可由下式确定

$$-I_r = \frac{-H_r l_k}{N_k} \tag{9}$$

并且通过调节的 I_r 的大小亦可以改变饱和电感的饱和时间。

为了减小回路谐振过程对 C_1 反向充电时在脉冲变压器副边上的能量损耗，可以在副边并联正向二极管和可饱和电感的串连支路，并且可以同时减小谐振周期。

5　结论

本文提出了一种 RSD 脉冲电源设计方法，它采用谐振方式触发开通电路中的开关器件 RSD，文中对它的原理和性能进行阐述，并在 50Hz 的触发频率下进行了试验研究，得到了稳定的开通波形。此电源具有分立元件少、代价低、易于控制和实现等优点，在重复脉冲功率系统中具有很好的应用前景。

参考文献

[1] Sol Schneider, Thomas F. Podlesak。 Reverse Switching Dynistor Pulsers。 Plasma Science, IEEE Transaction on, Volume: 28 Issue: 5, Oct 2000 Page(s): 1520-1523.

[2] 戴育航，钱照明，磁脉冲压缩技术及其在脉冲电源领域中的应用[J]，电力电子技术，1999，(4)：54-57.

[3] 王蔼，基本电路理论(修订本)[M]，上海：上海交通大学出版社，1993.

[4] 伏·姆·杜齐凯维齐，依·伏·格列霍夫，用半导体器件进行大功率换流的新原理，苏联科学院科学读物，1988.

作者简介

胡乾，男，1978 年 12 月生，2001 硕毕业于华中科技大学电子科学与技术系，获学士学位，现为华中科技大学微电子学与固体电子学专业硕士研究生，研究方向为新型半导体开关器件及其应用。

余岳辉，男，1946 年 3 月生，华中科技大学教授。中国电工技术学会高级会员，电力电子专委会委员、常务理事，自 1970 年以来一直从事电力电子器件及应用技术的教学和科研工作。获省部级以上科技成果奖 5 项，发表学术论文 80 余篇，1993 年 10 月获国务院政府特殊津贴。