

磁压缩脉冲发生器的仿真与研究

李彪, 李孜, 饶俊峰, 姜松

(上海理工大学 光电与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 设计一种应用于水中放电能够输出快前沿纳秒级高压窄脉冲的两级磁压缩脉冲发生器, 根据磁脉冲压缩原理设计出磁开关相关参数, 击穿水介质产生等离子放电通道需要均匀的电场, 因此外置磁复位电路清理剩磁。选用铁基纳米晶磁芯在 PSPICE 仿真软件中创建磁开关模型并添加封装库, 磁开关模型能够很好地模拟 MPC (magnetic pulse compression) 在实际应用中电压电流逐级压缩的工作状态。频率、脉宽和相位可调的优点使 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 在实际应用中常作为初级控制开关, 用于辅助 MPC 设计一种三极管电压反向放大延时电路封装开关模型, 来实现与实际选用 IGBT 开关参数的对应。由仿真结果, 50 Ω 电阻上输出一个上升沿 90 ns, 幅值 8.5 kV 的高压窄脉冲, 前沿压缩倍数为 6.4。

关键词: 磁脉冲压缩; PSPICE 仿真; 磁开关模型; IGBT; 窄脉冲

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

Simulation and Research of Magnetic Compression Pulse Generator

LI Biao, LI Zi, RAO Junfeng, JIANG Song

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A two-stage magnetic compression pulse generator which can output fast forward nanosecond high voltage narrow pulse was designed for underwater discharge. According to the principle of magnetic pulse compression, the parameters of magnetic switch were designed. Breaking the water medium to generate a plasma discharge channel requires a uniform electric field, so the external magnetic reset circuit cleans up the remanence. The iron-based nanocrystalline core was selected in the PSPICE simulation software to create a magnetic switch model and the encapsulation library was added. The magnetic switch model can well simulate the working state of voltage and current staged compression of MPC (magnetic pulse compression) in practical applications. With the advantages of adjustable frequency, pulse width and phase, IGBT (insulated gate bipolar transistor) is often used as a primary control switch in practical applications. It is used to assist MPC in designing a packaging switch model of a transistor voltage reverse amplification delay circuit to achieve the correspondence with the actual selection of IGBT switch parameters. The simulation results show that a high voltage narrow pulse with a rising edge of 90 ns and an amplitude of 8.5 kV is output on the 50 Ω resistor, and the

收稿日期: 2018-04-27

第一作者: 李彪 (1993-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 电力电子与电力传动. E-mail: 819671536@qq.com

通信作者: 李孜 (1972-), 女, 副教授. 研究方向: 电磁兼容、高电压技术等. E-mail: 18721151258@163.com

rising edge compression factor is 6.4.

Keywords: magnetic pulse compression; PSPICE simulation; magnetic switch model; IGBT; narrow pulse

目前，高功率脉冲发生器已经广泛应用在各个领域，如高功率微波^[1]、高能激光^[2]、等离子体的产生与应用^[3]、食品加工、节能环保等，开关是大功率脉冲发生器中最重要的器件，如火花隙开关、半导体开关、磁开关等。磁开关相比火花隙开关、半导体开关，具有功率高、耐压高、稳定性好、寿命长的优点。磁脉冲压缩技术能有效地陡化和压缩脉冲，很大程度上提高脉冲的上升沿，减小了其他大功率开关的损耗问题，而且无触点闭合动作，有较强的可重复性。脉冲的重复频率进一步提高，大大提高了脉冲形成单元的性能^[4-6]。在实际应用中磁压缩脉冲发生器能够输出上升沿几十到几百纳秒、幅值 10 kV 以上的高压脉冲。本研究介绍了应用于水中放电的磁压缩脉冲发生器的设计与仿真，论述了漏感对磁压缩发生器的影响及减小漏感的方法，并介绍了一种直流复位电路清理剩磁。半导体开关频率、脉宽、相位和占空比可调的优点通常替代传统的气体、液体开关。由于 MOSFET (field effect transistor)、IGBT (insulated gate bipolar transistor) 完全开通时间在几十到几百纳秒，考虑到 IGBT 的通流耐压能力比 MOSFET 好且其通态压降低，本文通过仿真软件 PSPICE 设计一种三极管电压反向放大延时电路封装开关模型来实现在功率、导通速度、恢复时间等开关性能与实际应用中选用的 IGBT 开关参数相对应，对磁压缩电路起到很好的辅助作用。PSPICE 自带 Model Editor 功能属性，根据磁性材料的物理特性参数，选用铁基纳米晶磁芯在 Model Editor 中创建磁开关模型并添加封装库，磁开关模型能够很好地模拟 MPC (magnetic pulse compression) 在实际应用中电压电流逐级压缩的工作状态。

1 磁压缩脉冲发生器原理

本研究所设计的磁压缩脉冲发生器主要由充电系统、中间储能、磁开关 SI 与升压变压器 ST 组成。磁压缩脉冲发生器工作原理如图 1 所示。图中：T₁ 为常开开关；T₂ 为 IGBT 开关；LOAD 为负载。

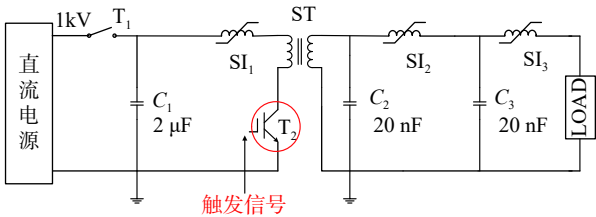


图 1 磁压缩脉冲发生器

Fig. 1 Magnetic compression pulse generator

该发生器产生脉冲的过程如下：直流系统中，高压直流电源输出 1 kV 电压给电容 C₁ 充电，磁开关 SI₁ 初始化到负的饱和磁通量密度处，当 C₁ 两端电压开始上升时，SI₁ 两端电压也开始上升，磁芯内的磁感应强度随之增加。由于 SI₁ 未饱和，其有很大阻抗，此时等效为断路，因此 C₂ 上的电压几乎不变，维持在 0，SI₁ 中电流也近似为 0，SI₁ 两端承受的电压近似等于 C₁ 上的电压并满足伏秒积分平衡方程式。当 C₁ 两端电压达到最大值时，SI₁ 磁芯内部的磁通量密度达到正的饱和处，磁芯相对磁导率急剧下降，SI₁ 的阻抗瞬间减小饱和和开通，等效为短路，此时存储在 C₁ 的能量开始向 C₂ 传送。SI₁ 起到磁辅助功能，使开关 T₂ 零电压开通零电流关断，消除电压与电流的重叠区，开关损耗降到最小。SI₁ 材质是 MnZn 铁氧体，直流工作状态下 MnZn 铁氧体除了有良好的电磁特性，还有良好的直流叠加特性，叠加直流偏置下，铁芯的可逆磁导率下降幅度小。当电荷量从 C₁ 全部转移到 C₂ 的瞬间，磁开关 SI₂ 饱和和导通，形成 C₂-SI₂-C₃ 谐振放电回路。同理，当电荷量从 C₂ 全部转移到 C₃ 的瞬间，SI₃ 饱和和导通，C₃ 对负载放电，最终在负载上面输出一个高压脉冲。磁开关实际是缠绕在可饱和磁芯上的绕组，利用磁性材料的非线性特性，磁开关的感抗随着相对磁导率的变化而急剧下降，饱和磁导率比未饱和时小数个量级。正是磁开关这一特性使得储能元件储存的能量在短时间内得到释放，从而达到脉冲压缩的目的^[7-11]。本文选用的磁开关材质是铁基纳米晶磁芯，纳米晶磁芯的磁导率、矫顽力 H_c 接近晶态高坡莫合金和钴基非晶，是一种高性能的软磁材料。虽然纳米晶磁芯的剩余磁感低于铁基非

晶和硅钢，但其在高磁感下具有更低的高频损耗，且耐腐蚀性和磁稳定性更好。纳米晶磁芯与 MnZn 铁氧体相比，工作频率低于 50 kHz 时，在更低损耗基础上具有高出铁氧体 2~3 倍的工作磁感。

2 IGBT 开关特性测试实验及 PSPICE 模型

T₂ 开关控制磁压缩脉冲发生器的工作频率，由于磁开关的开关状态由其承受的伏秒数决定，触发信号脉宽、周期和相位随着电压幅值的变化而变化。图 2 所示为 IGBT 开关特性测试电路，研究了栅极驱动信号电压和集电极电阻 R₁ 对 IGBT 开通关断速度的影响，实验所选用 IGBT 型号为 IXYH50N120C3D1，确定此型号下 IGBT 参数及开关特性。

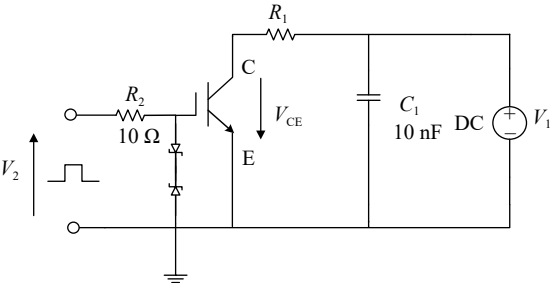


图 2 IGBT 开关特性测试电路

Fig. 2 IGBT switching characteristic of the test circuit

电容 C₁ 充满电后，IGBT 栅极施加驱动信号，IGBT 开通，C₁ 经电阻 R₁、IGBT 形成放电回路。栅极电阻设定在 10 Ω，由于栅极电阻过小可以增大开关速度，降低开关损耗，避免因 dV/dt 的误导通。缺点是电路中杂散电感的存在容易导致 IGBT 上产生电压尖峰，栅极承受噪声能力减弱，进而出现寄生震荡，甚至过压击穿。电阻过大，充放电速度削弱，开通时间开关损耗增大。

栅极电阻 R₂ 不变的情况下，电源电压 V₁ 设定在 170 V，高压探头放在 IGBT 的 C 极，集射极电压 V_{CE} 如图 3 所示。随着驱动信号电压 V₂ 的增大，IGBT 的开通速度越来越快，即 dV_{CE}/dt 越来越大，但 dV_{CE}/dt 增大得越来越慢。V₂ 幅值在 10 V 时，开通速度最慢且拖尾严重；在 20 V 时，开通速度最快，加入反向稳压管起到钳位保护的作用。实验中发现驱动信号电压 V₂ 的改变对 IGBT 的关断速度几乎没有影响，即改变 V₂，电压变化率 dV_{CE}/dt 仍保持一致。

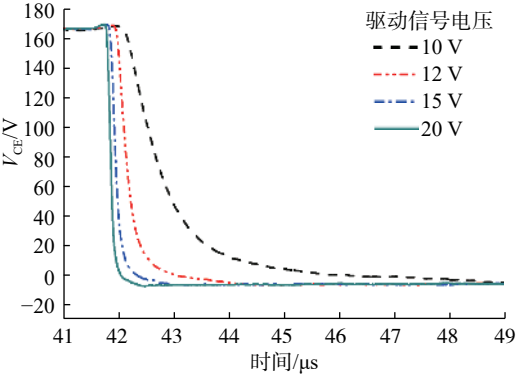


图 3 V₂ 对 IGBT 开通速度的影响

Fig. 3 Influence of V₂ on the opening speed of IGBT

驱动信号电压 15 V、R₂ 不变的情况下，选取 3 种电阻，R₁ 为 10 Ω，5 kΩ 和 100 kΩ，分别测出 IGBT 集射极电压在 3 种电阻下的变化情况。对 dV_{CE}/dt 即开关速度进行比较，如图 4 所示。3 种电阻下取每条曲线下降沿中间一段，计算出每条曲线下降沿的电压变化率 dV_{CE}/dt 约为 -0.625 V/ns，得出集电极电阻对 IGBT 的开通速度几乎没有影响。

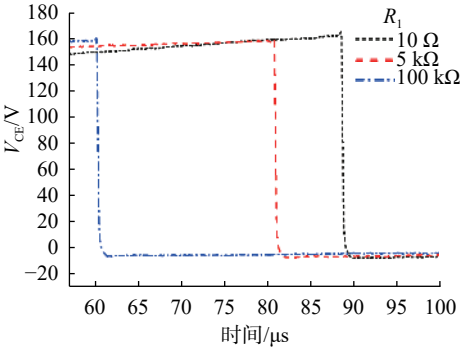


图 4 R₁ 对 IGBT 开通速度的影响

Fig. 4 Influence of R₁ on the opening speed of IGBT

但在实验中观察到 R₁ 的变化影响 IGBT 关断速度，主要因为 IGBT 存在寄生电容，包括等效输入电容 C_{ies}、等效输出电容 C_{oes}、转移电容 C_{res}。其中：C_{ies}=C_{gc}+C_{ge}；C_{oes}=C_{gc}+C_{ce}；C_{res}=C_{gc}(C_{gc} 表示栅极、集电极间寄生电容；C_{ge} 表示栅极、发射极间寄生电容；C_{ce} 表示集电极、发射极间寄生电容)。尤其是 C_{oes}，在 R₁ 较大，集电极电流较小时，影响最大，即 R₁ 越大，IGBT 的关断速度越慢。实验中所选探头型号为 PMK PHV 641-L，示波器是 Tektronix 公司的 MSO3000-DPO3000。

在 IGBT 开关特性和磁压缩脉冲发生器实验中选用的 IGBT 型号均为 IXYH50N120C3D1，由于 PSPICE 元件库中没有实验中所选用的 IGBT 型号，

故仿真中设计了常规型号 IGBT 驱动厚基区高压 4H-SiC BJT 的开关电路来实现与实验中选用的 IGBT 开关参数的对应, 实现功率、导通速度、恢复时间等开关性能与实际工作保持一致, 与 SI_1 起到磁辅助软开关的作用, 并对此开关电路封装, 取名为 L_BJT_IGBT , 如图 5 所示。图中: NET 代表网络端口; L_0 为电感; TD 为开关延迟时间; TR 为信号上升时间; TF 为信号下降时间; PW 为半峰宽; PER 为驱动信号的周期。

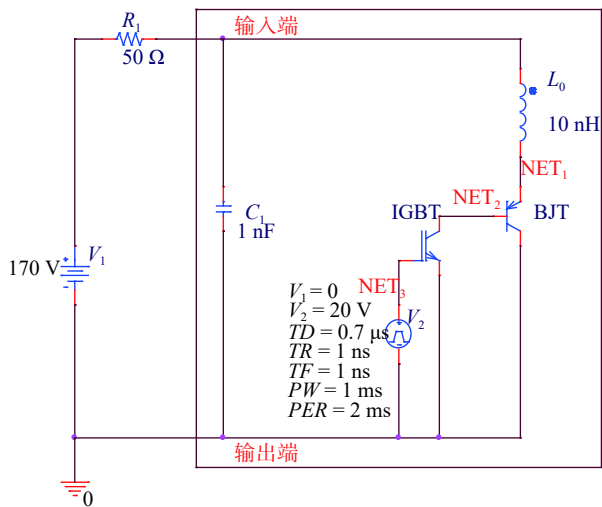


图 5 开关电路 L_BJT_IGBT

Fig.5 Switching circuit L_BJT_IGBT

矩形框中选用 10 nH 的电感、BJT(三极管)、IGBT。电源电压 V_1 设定在 170 V, 和前面测得的 IGBT 开关特性实验电源电压保持一致, 限流电阻 R_1 对开关模块开通速度没有影响(图 4 已验证)。工作中首先 V_1 经过 R_1 对 C_1 充电, 开关延迟时间 $TD=0.7\mu s$ 时, 在 IGBT 栅极施加一个驱动信号, 进而 IGBT 驱动 BJT 开通, 形成一个 L-C 振荡回路。 TD 设为 $0.7\mu s$, 开关延迟时间小于磁压缩脉冲发生器中 SI_1 饱和开通时间 $1.5\mu s$, 通过 MPC 仿真结果便于观察 SI_1 是否起到磁辅助的功能。工作频率设定在 500 Hz, 传统大功率 Si BJT 只能承受几百伏电压, 4H-SiC BJT 是 PNP 四层半导体结构, 内部由多个单元单元并联而成^[12]。SiC 材料比 Si 材料多一个数量级的临界电压击穿电场, SiC 半导体开关关断漂移层比 Si 器件更薄且掺杂浓度更高, 使得 SiC 半导体比传统 Si 器件导通电阻更低, 具有更高的载流子饱和密度, 可以承受一千多伏甚至更高电压, 具备更高的工作频率、工作温度。开关模块 L_BJT_IGBT 框图内部 IGBT 的输入信号在基极和发射极之间, 输出信号则取

自集电极和发射极之间, 相当于一个三极管电压反向放大延时电路, 电流增益和通态压降均能达到最小, 在降低开关损耗的同时提高了开通速度。

用 PSPICE 建立 L_BJT_IGBT 模型, 添加到库中以备用。首先在 PSPICE 中点击 Create Netlist 生成网络表, View Netlist, 在桌面新建一个记事本, 将网络表语句复制到其中, 格式改为 .lib 格式。然后在 Model Editor 中打开, 把网络表中的语句修改成子电路描述的标准格式, 保存为以 .subckt 作为起始语句, 以 .ends 作为结束语句的 .mod 文件, 其中 .subckt 和 .ends 之间的语句是器件的连接方式和属性^[13]。 L_BJT_IGBT 模型封装库语句编写如下:

```
.subckt L_BJT_IGBT IN OUT
L_L0      IN NET1 10 nH
Q_BJT     OUT NET2 NET1 4H-SiC BJT
Z_IGBT    NET2 NET3 OUT CM300HA-24H
V_V2      NET3 OUT+PULSE 0 20 v 0.7 us 1 ns
1 ns 1 ms 2 ms
.ends L_BJT_IGBT
```

CM300HA-24H 是 PSPICE 元件库中自带的常规型号 IGBT, L_BJT_IGBT 封装开关模型电路如图 6 所示。将 .lib 文件导出为 .olb 文件, 仿真时将 .lib 文件导入 PSPICE 的 Simulation Settings 中, 选择 configuration file, 点击 Add as Global 按钮, 将其添加为全局库。

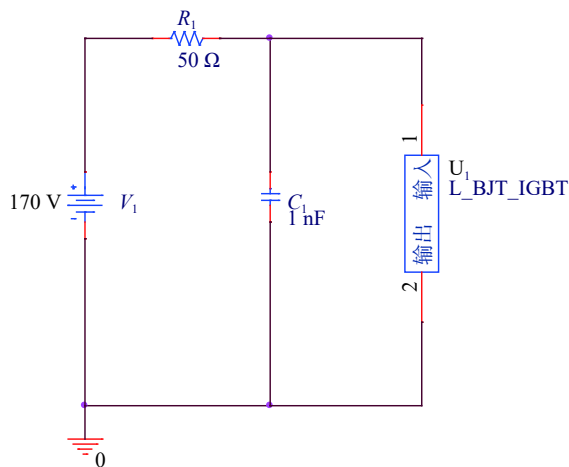


图 6 L_BJT_IGBT 模型电路

Fig.6 Test circuit of L_BJT_IGBT model

3 磁开关的 PSPICE 模型

3.1 磁滞回线

环形磁芯绕制而成的磁开关通常要求磁芯材

料满足如下条件^[4,14]：磁开关的非线性电感需有良好的开关特性，即其铁心材料应具有很好的矩形系数，即矫顽力 H_c 要尽量小，矩形比(剩磁比) Br/B_s 越接近于 1 越好。 Br 为剩余磁感应强度， B_s 为饱和磁感应强度。

图 7 所示磁滞回线表示磁性材料的特性是磁性开关的基础^[15]，在曲线每一侧饱和点 P 和 Q 附近。磁性材料的相对磁导率的曲线斜率变化很大，根据式(1)，可以看出绕组的感抗急剧减小。若分别以 μ_u 、 μ_s 表示磁饱和前后磁芯的相对磁导率，以 L_u 、 L_s 表示磁饱和前后磁芯的电感量，显然 $\mu_u \gg \mu_s$ ，故有 $L_u \gg L_s$ ，亦即磁芯在磁饱和和前后其电感量会发生几个数量级的锐减。

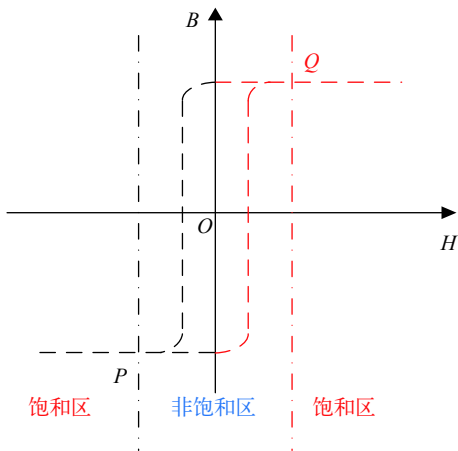


图 7 铁磁材料的磁滞回线
Fig.7 Hysteresis loop of ferromagnetic material

$$L_{MS} = \mu_0[\delta(\mu_r - 1) + 1] \frac{HN^2}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right) \quad (1)$$

式中： L_{MS} 为铁磁材料的电感； μ_0 、 μ_r 分别表示真空和磁性材料的磁导率； δ 为磁开关的占空比； N 为绕组的匝数； H 、 D_{out} 、 D_{in} 分别表示磁开关的高度、外径和内径。通常 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

根据磁开关的伏秒积平衡方程式可知，电感两端承受的电压对时间的积分始终和绕组匝数、磁芯截面积磁通密度变化量三者的乘积保持相等。因此，当电感所承受的伏秒积增大到一定值时，磁通密度不断增大，磁芯工作点进入 B - H 曲线的饱和段。可见，通过控制电感两端的伏秒积就可以控制电感的饱和与否。

$$\int V(t)dt = N\Delta B A_m \quad (2)$$

式中： $V(t)$ 为磁开关两端电压； ΔB 为磁通密度变化量； A_m 为磁开关的横截面积。

3.2 磁开关用 PSPICE 建模

对磁压缩电路进行 PSPICE 仿真验证，仿真中 SI_1 、 SI_2 和 SI_3 参数与 MPC 在实际应用中保持一致， SI_2 和 SI_3 选用同型号磁芯绕组。 SI_1 和 SI_2 (SI_3) 的外径、内径、高度尺寸分别为 64，40，25 mm 和 66，40，26 mm。表 1、表 2 分别为 MnZn 铁氧体磁开关和铁基纳米晶磁开关参数。表中： l 为磁路长度； A_m 为磁芯横截面积； g 为磁芯间隙。

表 1 SI_1 参数
Tab.1 SI_1 parameters

参数	数值	单位
l	16.328	cm
A_m	3	cm ²
g	0	cm
Br	0.20	T
Bs	0.51	T
Hc	8	A/m

表 2 SI_2 (SI_3)参数
Tab.2 SI_2 (SI_3)parameters

参数	数值	单位
l	16.642	cm
A_m	3.38	cm ²
g	0	cm
Br	0.10	T
Bs	1.25	T
Hc	1.60	A/m

由于 PSPICE 软件中自带有 Model Editor 功能，利用其创建磁开关模型，选择 Magnetic Core，考虑到磁芯绕组非线性，故选择 Nonlinear Ferrite，把铁芯磁性材料的参数输入到 Model Editor 中。保存后将 .lib 文件导出为 .olb 文件，添加到 PSPICE 库。选中常规的电感元件图标，打开其属性设置将生成的 .olb 文件添置到 Implementation Path，电感的参数 Value 表示磁开关的匝数。仿真时再将 .lib 文件导入 PSPICE 的 Simulation Settings 中，选择 configuration file，点击 Add as Global 按钮，将其添加为全局库。若创建快前沿变压器型磁压缩开关，选择 Breakout 库中带铁芯式 XFRM_NONLINEAR，添置库方式同上。

4 磁压缩脉冲发生器仿真

图8所示创建的开关模型 U_1 应用到磁压缩脉冲发生器的仿真电路中, 发生器工作频率控制在 500 Hz。图中, I_1 , I_2 为电流。考虑到磁开关中励磁电流由零开始线性增长, 省掉磁芯复位电路, 励磁电流将在本周期结束的剩余值基础上累积增加, 从而导致磁开关励磁电感饱和。励磁电感饱和后励磁电流迅速增长, 最终损坏电路中的开关元件。采用直流复位电路清理磁芯内的剩磁, 如图8虚线框图所示, 保证重频工作状态下每个周期输出脉冲幅值相等。仿真磁开关模型为理想元

器件, 实际应用中磁通量在通过纳米晶磁芯构成的磁路时有一部分漏入空气, 在空气中形成闭合磁路从而产生漏磁。漏感的存在, 当开关器件截止瞬间会产生反电动势易过压击穿开关器件; 漏感还可以与电路中的分布电容构成振荡回路, 产生振荡并向外辐射电磁能量, 造成电磁干扰。绕组系数正比于漏感, 对于简单的一次绕组和二次绕组取 3, 如果二次绕组与一次绕组交错绕制取 0.85。绕组匝数的二次方正比于漏感, 匝数控制在最少, 绕组越宽越有利于减小漏感。变压器 PT 绕组比值为 5 : 50, 电容 C_1 设置为 $2\ \mu\text{F}$, 根据式(3), 计算得出 C_2 为 20 nF。

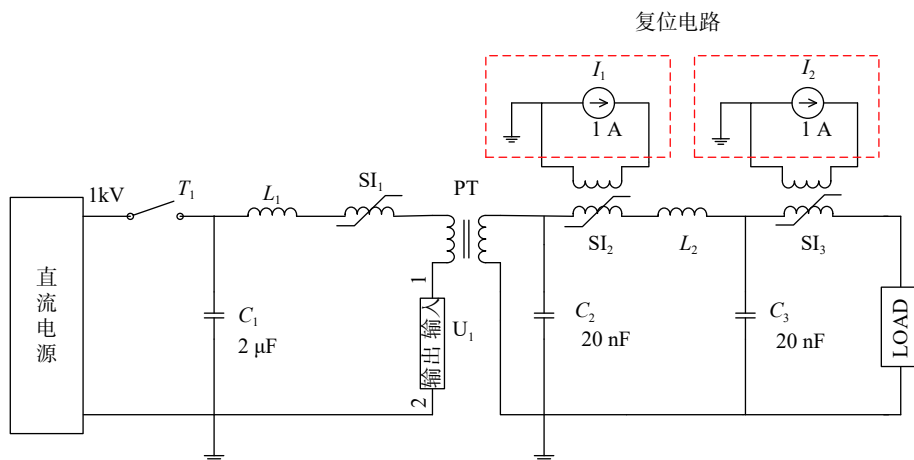


图8 磁压缩脉冲发生器仿真图

Fig.8 Simulation diagram of the magnetic compression pulse generator

$$C_1 = n^2 C_2 \quad (3)$$

式中, n 为 PT 的绕组比值, 且 $C_2 = C_3$, 进而得出 C_3 取值亦为 20 nF。

SI_1 饱和和开通时间为 $1.5\ \mu\text{s}$, 根据磁开关的伏秒积平衡方程式(3)计算出 SI_1 在使用一个铁芯时需要绕组 6 匝。为了保证 C_2 , C_3 足够的充电时间, SI_2 , SI_3 饱和时间分别设置为 1.2 , $0.8\ \mu\text{s}$ 。同理, 计算出 SI_2 在使用 2 个磁芯时需要绕组 7 匝, SI_3 在使用 1 个磁芯时需要绕组 9 匝。仿真中采用 L_1 , L_2 模拟实际电路中可能存在的杂散电感, 电感量分别设置为 $100\ \text{nH}$, $1\ \mu\text{H}$ 。

图9(a)所示为磁压缩脉冲发生器模拟实际工作过程中 C_1 , C_2 , C_3 , LOAD 和 U_1 上电压波形, 封装开关模型 U_1 控制在 $0.7\ \mu\text{s}$ 时开通, 此刻 V_{U_1} 降为 0。时延 $0.8\ \mu\text{s}$, 在 $1.5\ \mu\text{s}$ 时 SI_1 饱和和开通 C_1 开始对 C_2 放电, 通过 V_{U_1} , V_{C_1} , V_{C_2} 这 3 条曲线可以看出 SI_1 对开关 U_1 起到磁辅助软开关的功能, 实现了零电压开通零电流关断。 C_2 充电时间为

$1.2\ \mu\text{s}$, 即在 $2.7\ \mu\text{s}$ 时 C_2 电压达到幅值 $9\ \text{kV}$, 此时 SI_2 饱和和开通 C_2 对 C_3 放电, C_3 充电时间为 $0.8\ \mu\text{s}$, 即在 $3.5\ \mu\text{s}$ 时 C_3 电压达到幅值, 此刻 SI_3 饱和和开通对负载放电。由仿真结果可以看出各级电容的充放电时间与设置的 SI_1 , SI_2 和 SI_3 饱和和开通时间基本一致。经过两级快前沿变压器充电型磁压缩器的压缩, C_2 , C_3 和 LOAD 上得到的脉冲电压的上升沿逐级陡化, 最终在 $50\ \Omega$ 纯电阻性负载上输出一个上升沿 $90\ \text{ns}$ 、幅值 $8.5\ \text{kV}$ 的高压窄脉冲, 前沿压缩倍数为 6.4, 预脉冲约为 $0.3\ \text{kV}$ 。预脉冲电压产生的原因主要是传输线与开关及负载之间的电容耦合, 约为主脉冲电压的 $2\%\sim 4\%$ 。电容 C_2 放电结束之后, 其两端电压没有降为 0, 这可能是由于 PSPICE 仿真计算中 L_2 的感应电势导致, 仿真中发现调节 L_2 , 情况会有所改善。脉冲下降沿主要受电阻阻值大小的影响, 通过调节阻值来改变脉冲的下降沿。仿真输出电压低于 $10\ \text{kV}$ 是由于 PSPIC 软件本身在计算中各

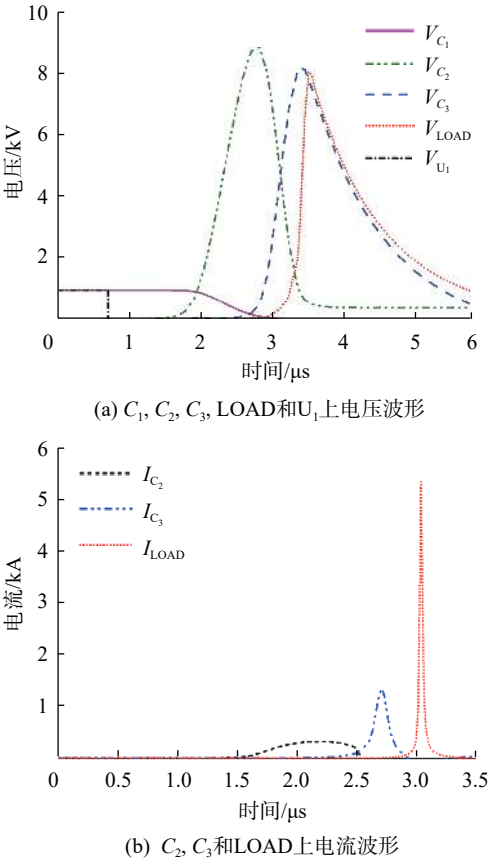


图 9 仿真波形图
Fig. 9 Simulation waveform diagram

个元器件上存在损耗。

如图 9(b) 所示，由 I_{C2} 、 I_{C3} 和 I_{LOAD} 这 3 条曲线可观察到电流脉宽逐级变窄，上升沿陡化，幅值提高，最终在负载上输出一个幅值 5.5 kA 的尖峰电流。1.5 μs 时 C_1 对 C_2 放电，2.5 μs 时 C_2 上电流降为 0，且 C_2 上电压达到最大值 9 kV，这时 C_2 上储存的能量向 C_3 释放。同理 3.5 μs 时，LOAD 上电流降为 0，且电压达到最大值 8.5 kV。由图 9 仿真结果， C_2 、 C_3 和 LOAD 上电流和电压充放电时间基本吻合。

5 结 论

设计了一种能够应用于水中放电，输出快前沿纳秒级高压窄脉冲的两级磁压缩脉冲发生器，磁开关快恢复、高功率、高耐压、稳定性好的特性对输出脉冲上升沿的陡化有着重要的作用，论述了漏感对磁压缩发生器的影响及减小漏感的方法，并介绍了一种直流复位电路清理剩磁。通过 PSPICE 仿真软件设计一种三极管电压反向放大延时电路封装开关模型来实现在功率、导通速度、

恢复时间等开关性能与实际选用 IGBT 开关参数相对应，对磁压缩电路起到很好的辅助作用。PSPICE 元件库本身没有磁开关模型和封装开关模型，本文创建的磁开关模型很好地模拟了 MPC 在水中放电、介质阻挡放电等应用中电压电流逐级压缩的工作状态。

参考文献:

[1] 袁忠才, 时家明. 高功率微波与等离子体相互作用理论和数值研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 095202.
[2] 王云萍, 黄建余, 乔广林. 高能激光光束质量的评价方法[J]. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1029–1033.
[3] 顾琅. 等离子体科学发展概述[J]. 力学与实践, 2010, 32(5): 102–104.
[4] 万枫, 李孜. 多级磁压缩脉冲电源[J]. 电源技术, 2012, 36(1): 118–120.
[5] AKIYAMA H, LI Z, OHNO T, et al. Water-bloom treatment by underwater pulsed streamer-like discharges[C]// Proceedings of the IEEE 34th International Conference on Plasma Science. Albuquerque, NM, USA: IEEE, 2007: 277.
[6] LI Z, KOHNO K, TANAKA F, et al. Effects of output peaking capacitor on underwater-streamer propagation[C]// Proceedings of the 17th International Conference on High Power Particle Beams. Xi'an, China: IEEE, 2008: 1–4.
[7] 张哈, 伍衡, 李胜利. 基于 PSPICE 的两级磁脉冲压缩系统建模与仿真[J]. 磁性材料及器件, 2013, 44(2): 62–66.
[8] 王冬冬, 邱剑, 刘克富. 基于半导体开关和磁开关的全固态脉冲电源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 730–734.
[9] SAKUGAWA T, WANG D, SHINOZAKI K, et al. Repetitive short-pulsed generator using MPC and blumlein line[C]// Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas: IEEE, 2003: 657–660.
[10] BAI J G, HUO X W, MA J, et al. Magnetic compression technique for colonic anastomosis in rats[J]. Journal of Surgical Research, 2018, 231: 24–29.
[11] ZHAO G B, MA J, YAN X P, et al. Optimized force range of magnetic compression anastomosis in dog intestinal tissue[J]. Journal of Pediatric Surgery, 2019.
[12] 肖剑波, 邓林峰, 张渊, 等. 一种应用于 SiC BJT 脉冲放电的快速驱动电路[J]. 中国科技论文, 2017, 12(2): 214–219.
[13] 李孜, 张渊博. 开关用 BJT 的特性研究和 PSPICE 仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1673–1678.
[14] 张东东, 平萍, 王珏, 等. 单级磁脉冲压缩系统分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 661–666.
[15] 冯本珍. 铁磁材料磁滞回线的研究[J]. 中国科技信息, 2006(22): 307–308.