



·脉冲功率技术·

## 基于晶闸管的大电流脉冲发生器研制\*

邓珀昆, 林楷宣, 罗秋燕, 龙井华, 王东, 雷云飞,  
黄峻堃, 王勇, 蔡厚智, 刘进元

(深圳大学 物理与光电工程学院 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518061)

**摘要:** 采用串并联结合的 Marx 发生器结构, 以晶闸管作为开关元件, 设计了大电流脉冲发生器。通过导通回路电流分析了脉冲发生器的自触发原理, 并模拟了输出脉冲电流激励磁透镜产生磁场的变化曲线。进行实物电路的研制, 采用充电电容参数为 600 V/2200  $\mu$ F, 充电电压为 550 V。在负载电阻为 6  $\Omega$ , 负载电感为 31.5 mH 的条件下, 获得输出电压峰值为 -2.1 kV, 半高宽为 7.34 ms, 脉冲前沿为 450 ns; 输出电流峰值为 -225 A, 半高宽为 6.3 ms, 脉冲前沿为 4.11 ms。

**关键词:** Marx 发生器; 并联 Marx; 自触发; 晶闸管; 磁透镜

中图分类号: TM89 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210228

## Development of large current pulse generator based on thyristor

Deng Pokun, Lin Kaixuan, Luo Qiuyan, Long Jinghua, Wang Dong, Lei Yunfei,  
Huang Junkun, Wang Yong, Cai Houzhi, Liu Jinyuan

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Applying series and parallel structure, a high current pulse generator was designed with thyristor. By analyzing the conducting current in circuit, the self triggering principle of the pulse generator is described. The variation of magnetic field in lens excited by output pulse current is simulated. The output characteristics of the circuit were measured. Using capacitors with parameters of 600 V/2200  $\mu$ F and DC voltage of 550 V, under load resistance of 6  $\Omega$  and load inductance of 31.5 mH, a pulse with amplitude of -2.1 kV, FWHM of 7.34 ms, and pulse front of 450 ns was obtained. The pulse current is -225 A in amplitude, 6.3 ms in FWHM, 4.11 ms in pulse front.

**Key words:** Marx generator; series and parallel structure; self-triggering; thyristor; magnetic lens

X 射线分幅相机具有良好的时间分辨率和二维空间分辨率, 广泛应用于激光等离子体、惯性约束聚变(ICF)等高速瞬变的物理实验中<sup>[1-3]</sup>。随着对 ICF 研究的深入, 要求 X 射线分幅相机的时间分辨率优于 30 ps, 而目前时间分辨率仅为 60~100 ps, 无法满足要求<sup>[4]</sup>。2010 年, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL), 采用电子束时间展宽技术将时间分辨率成功地提高至 5 ps<sup>[4]</sup>。磁透镜成像系统将电子束由阴极成像至 MCP, 是相机空间分辨率的决定因素之一。长磁透镜可产生均匀分布的磁场, 是常用的电子束成像系统, 可用于时间展宽分幅相机提高相机空间分辨率<sup>[5-6]</sup>。要获得高空间分辨率, 要求磁透镜产生强度大于 0.4 T, 持续时间大于 1 ms 的磁场。由于焦耳热效应的影响, 长磁透镜无法长时间工作在大电流环境下<sup>[7]</sup>, 故需要采用持续时间短, 瞬时功率大的电流脉冲对其进行激励。在此设计应用于时间展宽 X 射线分幅相机的大电流脉冲发生器。大电流脉冲发生器研制主要针对长磁透镜的激励电流脉冲, 使长磁透镜产生足够大的磁场, 提高相机空间分辨率。

近年来, 脉冲功率技术多以高耐压电容、半导体开关为材料元件; 大输出功率、高重复频率为指标<sup>[8-12]</sup>。1924 年, Erwin Otto Marx 提出采用 Marx 结构来研制脉冲功率发生器, 该结构可先对储能电容并联充电, 再通过开关元件将储能电容串联放电, 从而获得高电压脉冲输出<sup>[13]</sup>。但串联放电会使放电速度加快, 降低放电回路的等效电容,

\* 收稿日期: 2021-06-08; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11775147); 广东省自然科学基金项目(2019A1515011474, 2019A1515110130); 深圳市科技计划项目(JCYJ20200109105201936, JCYJ20190808115605501, JCYJ20180305125443569)

联系方式: 邓珀昆, 1051693158@qq.com。

通信作者: 蔡厚智, hzcai@szu.edu.cn。

导致输出脉冲宽度下降,难以获得持续时间长的脉冲。而采用多路 Marx 并联放电的结构,可以减小电路等效内阻以提高输出电压幅值<sup>[14-15]</sup>,增大等效电容以增加输出脉冲宽度,同时可获得较大的时间宽度和峰值电流;并联结构还能起到分流保护的作用,降低流经每一路晶闸管的电流。此外,在设计上采用能在大功率环境下工作的晶闸管作为开关元件,并利用晶闸管电流驱动特性,将门极通过稳流电感和限流电阻接地,形成自处罚导通电路,不需要第一级外晶闸管的驱动电路,节省电路开发成本。采用 Proteus 8 软件仿真电路,再根据仿真情况,研制实物电路。

## 1 电路原理

### 1.1 结构原理

大电流脉冲发生器采用串并联合结合的 Marx 发生器结构,电路原理如图 1 所示。脉冲发生器采用 70tps12 型号晶闸管作为脉冲发生器的开关元件。该器件具有高达 1.2 kV 的断态重复峰值电压,可使脉冲发生器拥有更高的储能密度和输出电压峰值;正向浪涌电流为 1400 A,符合设计指标要求,且大大提高了脉冲发生器的耐流能力和输出功率。此外,在室温 25 °C 时,该型号晶闸管门极不触发电流与门极触发电流分别为 6 mA 和 100 mA,触发所需控制信号功率低于 150 mW,小功率控制信号亦可使其导通。

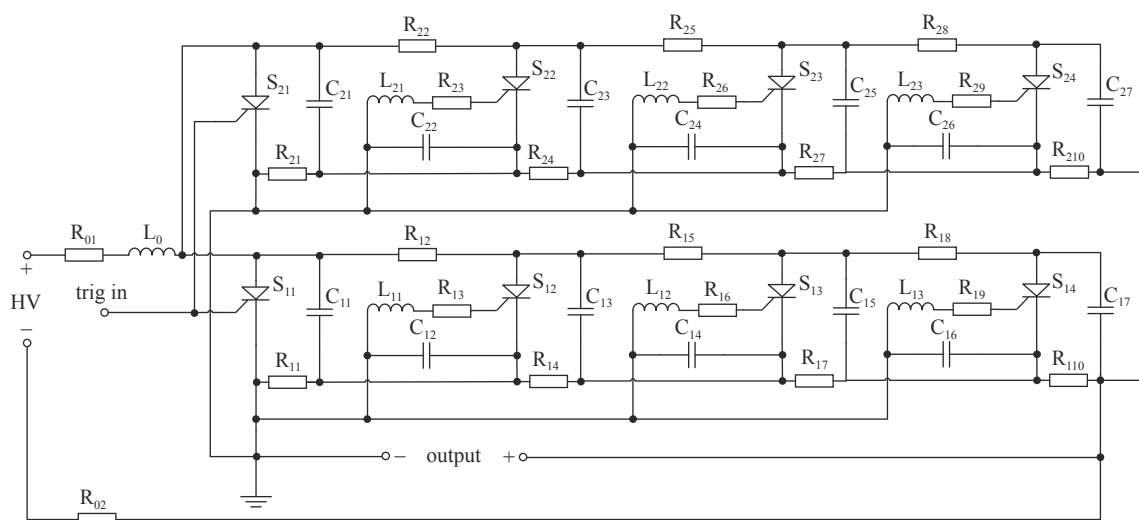


Fig. 1 Principle of high current pulse generator

图 1 大电流脉冲发生器原理

电路工作原理:在触发信号没有到来时,所有晶闸管处于关断状态,直流电源(HV)通过 $R_{01}$ ,  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{15}$ ,  $R_{17}$ ,  $R_{18}$ ,  $R_{110}$ 给支路电容充电;当电容充满时,回路电流为0,各级电容电压为HV。以三级串联单路发生器为例,分析电路自导通原理。当第一级导通时,一级回路电流如图2红线所示,其中,一级电容 $C_{11}$ 上端极板电位因开关导通降为0V,下端电位因电容电压不变性,感应出 $-HV$ 电势。第二级晶闸管 $S_{12}$ 门极通过稳流电感 $L_{11}$ 和限流电阻 $R_{13}$ 与地相连;当 $C_{11}$ 下端电位降到 $-HV$ 时, $S_{12}$ 的门极与阴极产生压降,获得触发电流,如图2蓝线所示。第二级晶闸管相继导通,回路电流为图3红线所示。

同理第三级晶闸管 $S_{13}$ 也导通。最终单条支路3个电容串联,在输出回路产生幅值为 $-3HV$ 的电压脉冲。当串

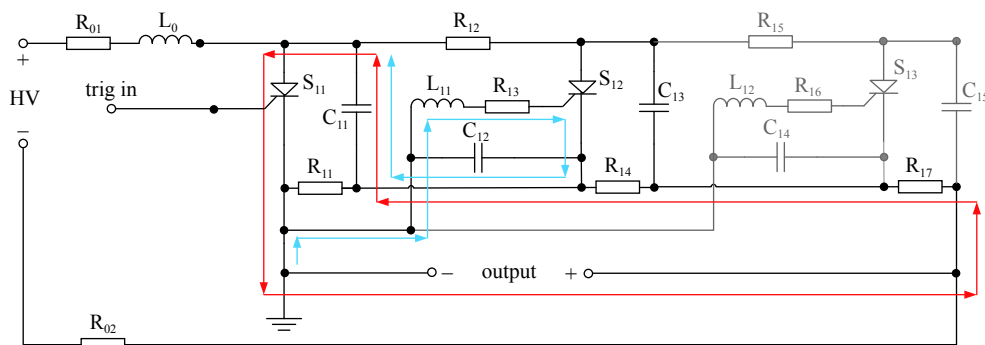


Fig. 2 Triggering current of the second stage switch

图 2 第二级开关触发电流

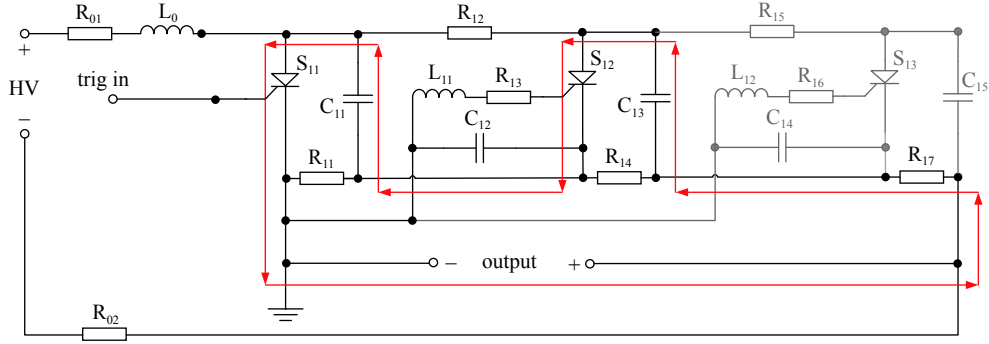


Fig. 3 Conducting circuit of the second stage switch

图3 第二级开关导通电路

联级数为  $n$  时, 获得输出电压为  $-nHV$ 。导通过程中, 电容给负载电感和负载电阻放电。随着电容电量的消耗, 电容两端电压逐渐减小至 0, 回路电流也逐渐减小至 0, 晶闸管重新关断, 恢复至开始的充电状态。

### 1.2 电路仿真结果

使用 Protues 8 仿真软件, 搭建四级串联二路并联 Marx 脉冲发生器电路, 仿真电路图与仿真参数如图 4 所示。在负载电阻  $6\ \Omega$ 、负载电感  $31.5\ \text{mH}$ 、充电直流电压  $600\ \text{V}$ 、储能电容  $2200\ \mu\text{F}$  的条件下测量电路产生的输出电压、电流脉冲波形。Marx 脉冲发生器输出电压与电流波形如图 5、图 6 所示。其中, 输出电压幅值为  $-2.01\ \text{kV}$ 、半高宽  $7.19\ \text{ms}$ 、脉冲前沿  $371\ \text{ns}$ ; 输出回路电流峰值为  $-200\ \text{A}$ 、半高宽  $12.5\ \text{ms}$ 、脉冲前沿  $3.97\ \text{ms}$ 。

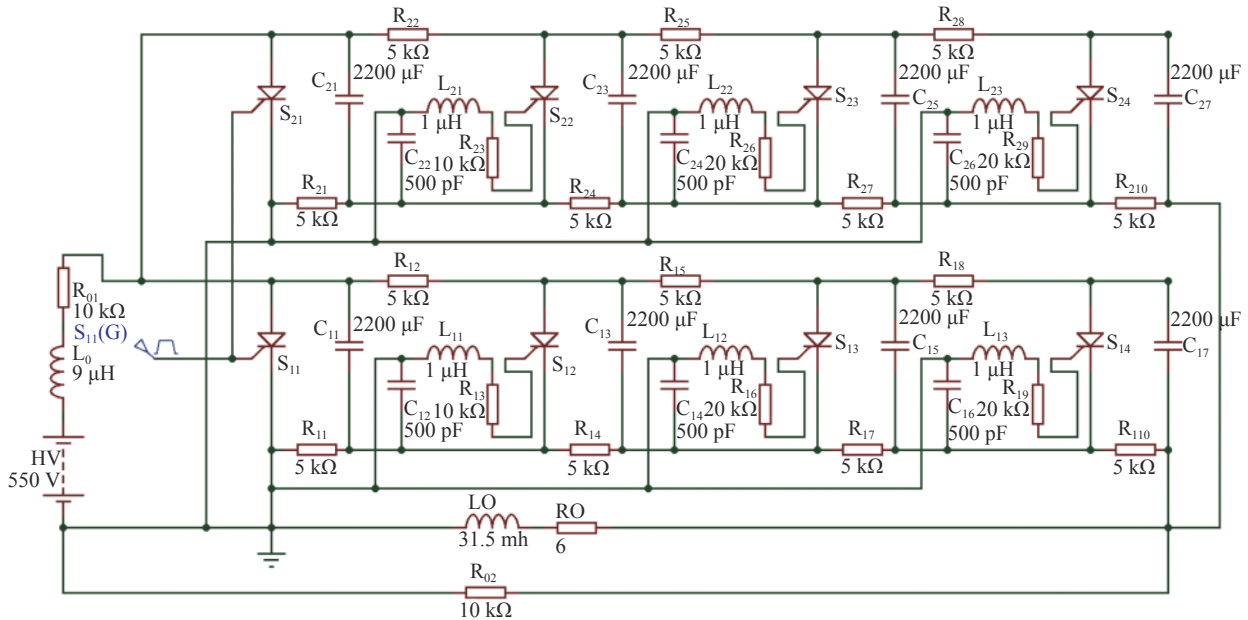


Fig. 4 Simulation circuit of four-stage series and two-path parallel self triggering Marx generator

图4 四级串联二路并联自触发 Marx 发生器仿真电路

### 1.3 电流激励磁透镜产生磁场

长磁透镜可以等效为一个多层螺线管, 令  $L$  为螺线管的长度,  $r_i$  为螺线管的内半径,  $r_o$  为螺线管的外半径, 螺线管的厚度为  $r_o - r_i$ 。令螺线管每层单位长度上匝数为  $n_1$ , 单位厚度上的层数为  $n_2$ ,  $z$  为螺线管内某点与中心点  $O$  的轴向距离。则螺线管某轴向位置的磁场可以表示为<sup>[16]</sup>

$$B(z) = 0.5\mu_0 n_1 n_2 I \times \left[ (0.5+z) \ln \frac{r_o + \sqrt{r_o^2 + (0.5+z)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + (0.5+z)^2}} + (0.5-z) \ln \frac{r_o + \sqrt{r_o^2 + (0.5-z)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + (0.5-z)^2}} \right] \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空中的磁导率;  $I$  为磁透镜的激励电流; 取螺线管长度  $L=50\ \text{cm}$ 、内半径  $r_i=8\ \text{cm}$ 、外半径  $r_o=8.24\ \text{cm}$ 。

根据式(1), 计算得到不同激励电流下, 磁透镜不同位置产生磁场的变化曲线, 如图 7 所示。图 7 中, 当激励电流为  $300\ \text{A}$  时, 磁透镜中心位置磁感应强度为  $0.62\ \text{T}$ ; 当激励电流为  $250\ \text{A}$  时, 磁透镜中心位置磁感应强度为  $0.51\ \text{T}$ 。

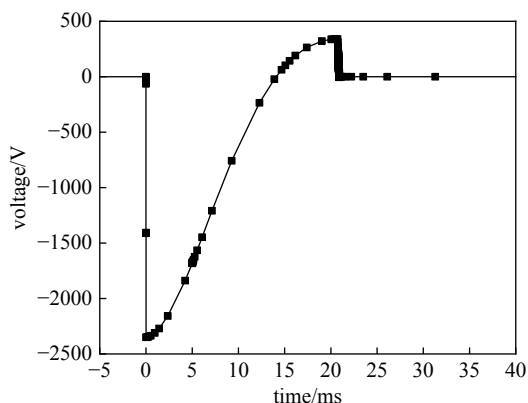


Fig. 5 Output voltage of four-stage series and two-path parallel self-triggering Marx generator

图 5 四级串联二路并联 Marx 发生器输出电压

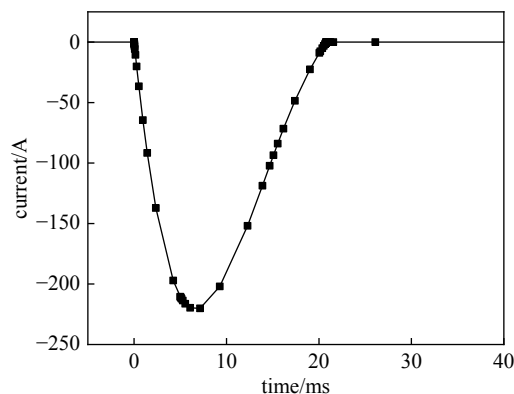


Fig. 6 Output current of four-stage series and two-path parallel self-triggering Marx generator

图 6 四级串联二路并联 Marx 发生器输出电流

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实物电路研制

研制四级串联、两路并联 Marx 脉冲发生器实物如图 8 所示。由于传输线和元器件存在着一定的阻抗,故实际充电电压和输出电压幅值低于理论值。将通过实验测量的结果,分析实物电路中存在的问题,对脉冲发生器进行优化。并对比不同串联级数和并联级数下,输出脉冲电压、电流波形变化曲线,验证串并联级数对输出波形的影响。为减小电路板上传输线的分布电容和分布电感,需要尽可能降低传输线的长度,并加大宽度。同时为减小外界对脉冲发生器的干扰,选择同轴线结构作为脉冲发生器的传输线。当充电电压值为 500 V,储能电容参数为 600 V/850  $\mu$ F,负载电感为 31.5 mH,负载电阻为 6  $\Omega$  时,电路输出电压幅值为 -1.8 kV,半高宽为 7 ms;输出电流峰值为 -135 A,半高宽为 5 ms。

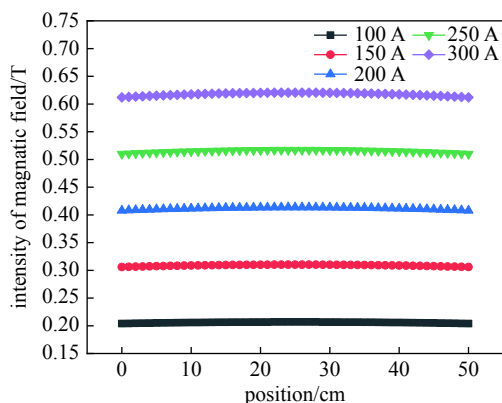


Fig. 7 Curve of magnetic field strength produced by magnetic lens

图 7 磁透镜产生磁场强度变化曲线

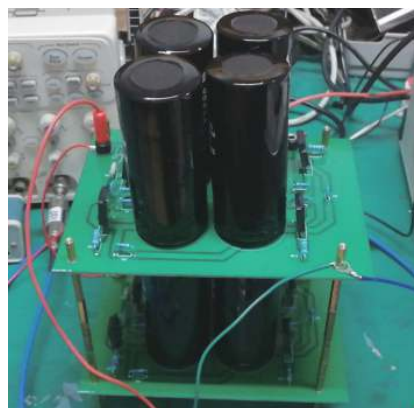


Fig. 8 Four stage series and two-path parallel Marx pulse generator

图 8 四级串联、两路并联 Marx 脉冲发生器

### 2.2 输出脉冲与串联级数关系

在串联 Marx 电路中,取负载电阻为 1  $\Omega$ ,储能电容值为 1  $\mu$ F,分别改变充电电压值,得到不同串联级数下,输出电流峰值和半高宽随充电电压变化曲线分别如图 9、图 10 所示。从图 9、图 10 可知,当提高串联级数和充电电压值时,输出电流峰值提高,而脉冲半高宽随电压无明显变化。当充电电压为 800 V 时,三级串联电路输出电流幅值为 860 A,二级串联电路输出电流幅值为 605 A。当充电电压为 1000 V 时,三级串联电路输出电流幅值为 1275 A,二级串联电路输出电流幅值为 882.5 A。串联级数越高,输出电流脉冲宽度越低,与理论和仿真分析结果吻合。其中,三级串联电路在充电电压为 1000 V 的条件下,电流脉冲的理论输出值应为 2.7 kA,而实际输出幅值仅为理论值的 47.2%。这是由于负载电阻过小,与脉冲发生器电路接近导致。

### 2.3 输出脉冲与并联级数关系

取负载电阻为 10  $\Omega$ ,储能电容值为 1  $\mu$ F,单条支路为三级串联,分别改变充电电压值,得到不同并联级数下,输

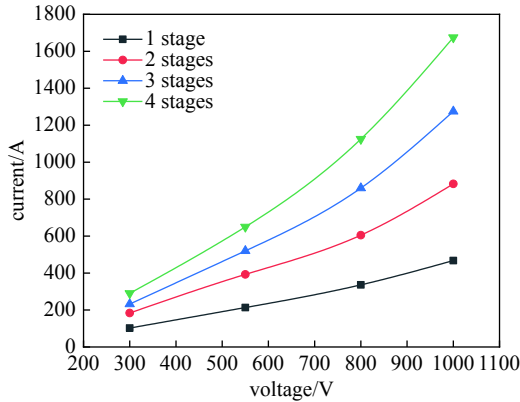


Fig. 9 Relationship between peak value and charging voltage under different series stages

图 9 不同串联级数输出电流峰值与充电电压关系

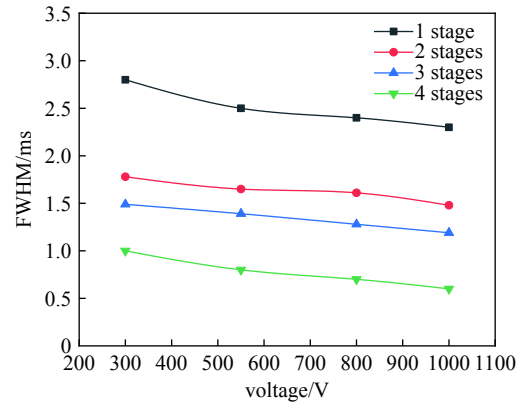


Fig. 10 Relationship between output pulse width with charging voltage under different series stages

图 10 不同串联级数输出脉冲宽度与充电电压关系

出电流峰值和半高宽随充电电压变化曲线分别如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知，提高并联级数可提高输出电流峰值。当充电电压为 800 V 时，二级并联电路比单支路输出电流幅值提高 23.5 A；当充电电压为 1 kV 时，二级并联电路与单支路相比输出电流幅度提高了 38.3 A。由图 12 可知，提高并联级数可以有效提高输出脉冲电流的半高宽，半高宽平均增长率为 53.5%。

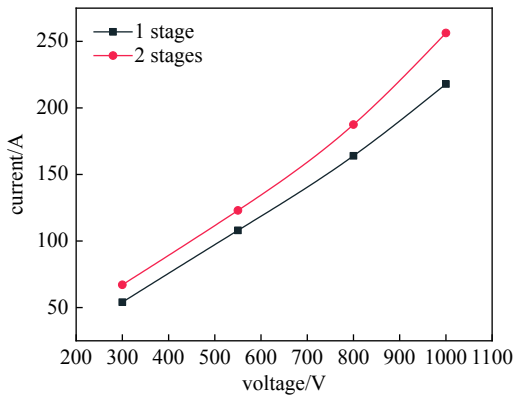


Fig. 11 Relationship between output current peak value and charging voltage under different parallel stages

图 11 不同并联级数输出电流峰值与充电电压关系

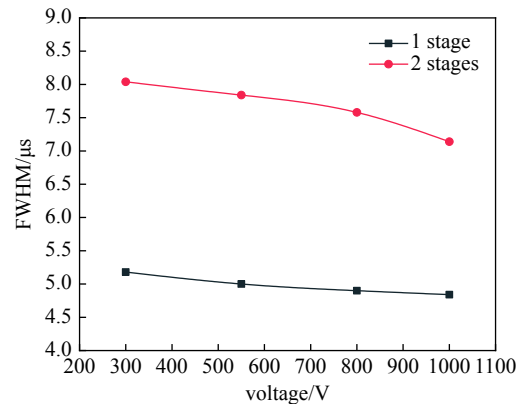


Fig. 12 Relationship between the output pulse width and charging voltage under different parallel stages

图 12 不同并联级数输出脉冲宽度与充电电压关系

## 2.4 参数调整

结合上述测量结果，最终确定电路结构采用四级串联结合二级并联 Marx 发生器，采用充电电容参数为 600 V/2200  $\mu$ F。当负载电阻为 6  $\Omega$ ，负载电感为 31.5 mH，充电电压为 550 V 时，输出电压峰值为 -2.1 kV，半高宽为 7.34 ms，脉冲前沿为 450 ns；输出电流峰值为 -225 A，半高宽为 6.3 ms，脉冲前沿为 4.11 ms。输出电压和输出电流波形分别如图 13、图 14 所示。由于电压与电流幅值过高，实际测量时采用衰减器将电压脉冲大小衰减 1000 倍；而电流脉冲

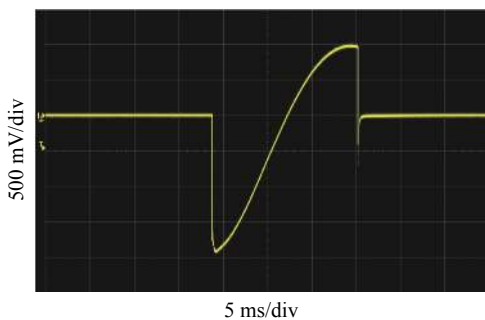


Fig. 13 Output voltage waveform of Marx generator

图 13 Marx 发生器输出电压波形

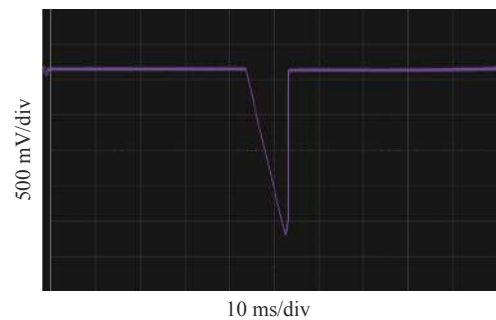


Fig. 14 Output current waveform of Marx generator

图 14 Marx 发生器输出电流波形



则通过电流传感器,将电流以 0.01 V/A 的转换率转换为电压信号,供示波器测量。脉冲发生器最终输出结果比最初研制电路在输出电流和半高宽上都有所提升。因实际使用的电感与仿真软件中理想电感有所区别,故实物电路输出电流半高宽低于输出电压半高宽。在输出电流波形中,高于 200 A 的部分持续时间为 1 ms,符合使用要求。

### 3 结 论

采用串并联合 Marx 发生器结构,设计了大电流脉冲发生器,从电路导通电流对脉冲发生器的自触发机制进行了分析。模拟磁透镜产生磁场强弱随电流大小变化曲线:当电流高于 200 A 时,磁透镜产生磁感应强度为 0.4 T。研制了实物电路,通过实验验证了输出脉冲电流峰值和宽度,与串并联级数的关系;引入并联结构,可改善串联级数增大引起的脉宽下降缺点。测量了电路的输出特性。采用不同的参数进行了试验,最后选择最优充电电容参数为 600 V/2200  $\mu$ F,充电电压为 550 V。在负载电阻为 6  $\Omega$ ,负载电感为 31.5 mH 的条件下,获得输出电压峰值为-2.1 kV,半高宽为 7.34 ms,脉冲前沿为 450 ns;输出电流峰值为-225 A,半高宽为 6.3 ms,脉冲前沿为 4.11 ms。

### 参 考 文 献:

- [1] Fu Wenyong, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Proximity-gated X-ray framing camera with gain uniformity[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16: P06007.
- [2] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E317.
- [3] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 112003. (Tian Jinshou. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 112003)
- [4] 廖昱博. 高时空分辨磁聚焦分幅变像管研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018 (Liao Yubo. Magnetic-focusing framing tube with high spatio-temporal resolution[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018)
- [5] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10E116.
- [6] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11E504.
- [7] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 10G123.
- [8] 陈志强, 谢霖桑, 贾伟, 等. 电磁脉冲模拟装置用 3 MV 中储电容器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 095001. (Chen Zhiqiang, Xie Linshen, Jia Wei, et al. Development of a 3 MV transfer capacitor used in an electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 095001)
- [9] 饶俊峰, 吴施蓉, 朱益成, 等. 双极性固态直线变压器驱动器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065006. (Rao Junfeng, Wu Shirong, Zhu Yicheng, et al. Development of bipolar solid-state linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065006)
- [10] 李帅康, 黄邦斗, 章程, 等. 全固态双极性纳秒脉冲电源研制及应用[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065005. (Li Shuikang, Huang Bangdou, Zhang Cheng, et al. Development and application of all-solid-state bi-polar nanosecond pulse generators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065005)
- [11] 赵政, 李晨颖, 张幸, 等. 重复频率脉冲流注放电演变现象与机制研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065002. (Zhao Zheng, Li Chenjie, Zhang Xing, et al. Research progress on evolution phenomena and mechanisms of repetitively pulsed streamer discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065002)
- [12] 庄龙宇, 杨均翔, 须貝太一, 等. 紧凑型全固态高重复频率 LC-Marx 脉冲发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065003. (Zhuang Longyu, Yang Junxiang, Taichi S, et al. Compact all-solid-state high frequency LC-Marx generator based on magnetic switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065003)
- [13] 赵鑫, 张东方, 刘进元. 一种纳秒前沿的负高压脉冲产生电路[J]. *深圳大学学报理工版*, 2014, 31(1): 30-34. (Zhao Xin, Zhang Dongfang, Liu Jinyuan. A design of negative high voltage nanosecond pulse circuit[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, 31(1): 30-34)
- [14] 饶俊峰, 章薇, 李孜, 等. 雪崩三极管串联的纳秒脉冲发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 095002. (Rao Junfeng, Zhang Wei, Li Zi, et al. Nanosecond pulse generator with avalanche transistors in series[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 095002)
- [15] 饶俊峰, 李恩成, 王永刚, 等. 自触发驱动的全固态 Marx 发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 025001. (Rao Junfeng, Li Encheng, Wang Yonggang, et al. Self-triggering all-solid-state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 025001)
- [16] 王华军, 李宏福, 温越琼. 螺线管中磁场的计算[J]. *四川轻化工学院学报*, 1999, 12(4): 23-25. (Wang Huajun, Li Hongfu, Wen Yueqiong. Magnetic field calculate in solenoid[J]. *Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology*, 1999, 12(4): 23-25)