

2kV 高稳定度高压脉冲电源设计

罗通顶, 田耕, 杜继业, 阮林波, 张雁霞, 李显宝, 王晶, 李海涛

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘要: 在一些光学精密仪器的应用场合中, 不仅需要脉冲电源在时间上能够提供精确的控制, 而且需要具有高稳定度的输出, 以提高光电系统的探测性能; 运用基于高压开关的两级式方法, 采用单级高功率 MOSFET 开关结合具有高稳定输出的直流电源的结构, 设计了输出幅度可达 2kV 的高稳定负脉冲电源; 测试结果表明, 在输出脉冲宽度为 8 μs 时, 脉冲前沿约为 48 ns, 系统延迟时间约为 140 ns, 负脉冲超调参数约为 1%。该系统具有结构简单、可靠性高、高稳定性输出等优点, 可以为特定的光电器件提供优质的控制方式。

关键词: 脉冲电源; 高压电源; 固态开关; 功率 MOSFET

Design of A High-Stability High-Voltage Pulse Power with 2kV Output

Luo Tongding, Ting Geng, Du Jiye, Ruan Linbo, Zhang Yanxia, Li Xianbao, Wang Jing, Li Haitao

(State Key laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In some applications of precision measurement with optical instruments, the pulse power not only should have the ability of providing a high precise control in time, but also should giving a high stability of output to improve the performance of the the photoelectric detectors. This paper presents a design of negative pulse power with the output up to 2kV. It is based on a two-hierarchical method with a high-voltage switch and has a combination of a single high-power MOSFET switch and a high-stability DC power in the system. The results of the measurement shows that the designed system has a inherent delay of approximately 140 nanoseconds, the output pulse has a leading edge of approximately 48 nanoseconds and a overshoot parameter of approximately 1% when the output pulse width is 8 microseconds. The designed pulse power has many advantages such as simple structure, high-reliability, high-stability output and so on, which can provide a perfect control method for a few particular photoelectric detectors.

Keywords: pulse power; high-voltage power; solid-state switch; power MOSFET

0 引言

高压脉冲电源能够精确的控制电源的输出和关闭, 其时间精度能够达到微秒级甚至纳秒级, 因而在瞬态成像或者高速测量领域具有广泛的应用^[1-4]。例如在高速成像仪器中, 高压脉冲电源作为像增强器的高速选通快门, 能够精确控制相机的曝光时间, 因而能够对纳秒级事件进行观测。而对于另外一些特殊的光电器件的使用, 在捕捉感兴趣的瞬态事件时, 不仅需要高压脉冲电源能够精确控制光电器件的导通和闭合(即起到快门选通的作用), 而且需要能够提供高稳定度的输出, 以降低电源带来的噪声, 提高系统灵敏度、动态范围等性能指标。目前, 对于高速高压快门的研究或者高精度的直流电源研究较多, 而对于高稳定度的高压脉冲电源的研究较少有报道。

本文针对某型特殊光电器件的应用需求, 研制了 2kV 高稳定度高压脉冲电源, 该脉冲电源不仅具有快门的功能, 即能精确控制光电系统导通和关闭, 同时也能够提供高稳定度的电源, 因而能极大的提高光电系统的灵敏度和动态范围等关键性能指标。另外, 为了获取 2kV 幅度的高压脉冲电源, 本文基于单个高功率 MOSFET 固体开关构建了脉冲成形电路, 与多

级固体开关串联的方法相比, 该方法能够大幅的降低电路的复杂性, 提高电路的稳定性。

1 高压脉冲电源原理

常用的脉冲电源产生方法有两种: 基于储能原件的充放电式方法和基于高压开关的两级式方法^[5]。基于储能原件的充放电式方法首先对储能元件进行长时间的充电, 然后使其在短时间内放电, 放电时间一般远远小于充电时间, 最后实现能量在短时间内瞬间放出, 从而达到输出高压大功率脉冲的目的。利用该种方式可以获得大功率、超高电压、和快前沿的输出脉冲; 但是, 受限于电路元器件的影响, 其脉冲精度难以实现精确的控制, 脉冲参数难以实现精确的调节, 并且由于电路恢复时间慢造成重复频率低, 因而应用范围比较有限, 主要应用高功率脉冲源设计^[6-7]。

基于高压开关的两级式方法是采用一个直流高压电源和一个高压开关, 通过高压开关的闭合来实现脉冲的输出。实现高压开关常用的器件有闸流管(Thyratron)、晶闸管(Thyristor)、绝缘栅双极型功率管(IGBT)和金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)。开关性能对于脉冲电源的各项性能参数起决定作用。随着固体开关在开关速度、耐压和导通电流等性能上的提高, 基于固态开关的脉冲电源设计成为了目前研究的主流。固体开关具有电路简单、体积小、灵活性高、可实现任意波形输出、工作寿命长等优点。基于固态开关的驱动方法非常简单, 只要提供一个低压触发信号例如 5 V TTL 开关控制信号, 开关即可以工作在固定的脉宽下。MODFET 的开关速度比 IGBT 快, 通常用于制作高速开关。该类功率电子器件具有

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2016-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605141, 11305129); 国家重点实验室基金(SKLIPR1502Z)。

作者简介: 罗通顶(1984-), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 博士, 主要从事高速图像诊断方向的研究。

高速通断能力、低触发能量、脉宽可调的特性, 而且具有高重复频率、脉宽可调、长寿命、可靠性高等优点。以前, 受限于技术和工艺生产水平, 单个功率电子器件的耐压和电流有限, 只能应用于低压快脉冲电源领域中。随着半导体技术工艺水平的提高, 单个功率 MOSFET 固体开关器件的耐压水平、电流驱动能力、功率输出等主要指标都有了极大的提高。为了获取 2kV 幅度的高压脉冲电源, 本文基于单个高功率 MOSFET 固体开关构建了脉冲成形电路, 与多级固体开关串联的方法相比, 该方法能够大幅的降低电路的复杂性, 提高电路的稳定性和精度。

基于固态开关的脉冲电源具有 3 种常用的电路拓扑结构, 如图 1 所示, 它们分别产生不同需求的波形。图 1 (a) 为输入正电源, 输出正脉冲; 图 1 (b) 为输入负电源, 输出负脉冲; 图 1 (c) 为输入正电源, 输出负脉冲。本文选择图 1 (c) 实现了脉冲电源的产生。

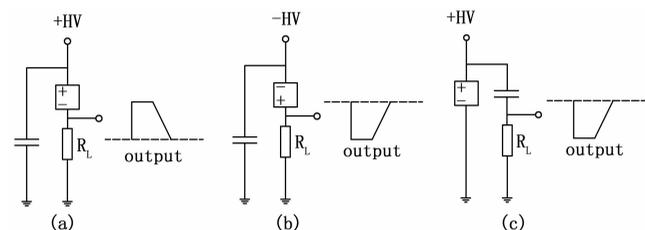


图 1 常用脉冲电源电路拓扑结构图

2 系统硬件设计

本文采用高稳定性直流电源作为高压输入, 单个大功率固体 MOSFET 管作为开关的方式设计了高稳定度高压脉冲电源。系统实现原理如图 2 所示。

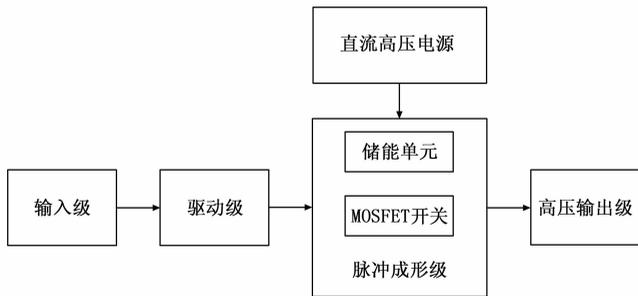


图 2 系统原理框图

脉冲成形级电路原理如图 3 所示, 该级主要由储能电容、开关、负载组成。与传统的晶闸管等相比, 功率 MOSFET 管具有开关时间快等优点, 随着 MOSFET 设计技术的进一步提高, 其耐压有了显著的提高, 并且具有较高的可靠性, 例如 IXYS 公司发布的功率 MOSFET 管耐压值可达数千伏。本文基于单个 IXYS 公司的 IXTK5N250 器件构造的脉冲成形电路, 该单管电路具有简单可靠、易于集成和小型化设计的优势^[8]。

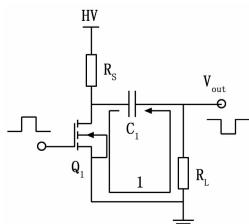


图 3 脉冲成形级电路原理

IXTK5N250 单管极限耐压值可达 2 500 伏, 漏极电流 I_D 可达 5 安培, 导通电阻 $R_{DS(on)}$ 为 8.8 欧姆。图 3 中 Q1 为 IXTK5N250, 当前端输入为低电压时, Q1 关闭, HV 高压直流电源通过 R_s 给 C_1 充电, 充电完毕后, C_1 左端电压值为 HV, 右端电压值为 0; 当前端输入为高电平时, Q1 导通, C_1 通过放电回路 1 放电。

输入级由电阻 R1、R2 和 R3 组成的 π 形网络构成, 主要用于实现两个功能, 一是用于触发域的调节; 二是用于与输入信号的阻抗匹配, 因为大多数信号的特性阻抗为低阻 50 Ω , 而 π 形电阻网络能够很好的与其实现匹配。

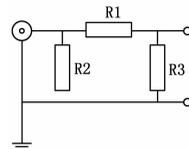


图 4 输入级电路图原理

驱动级是提高 MOSFET 管开关速度以及输出脉冲前沿陡峭程度的关键。MOSFET 管的开关速度很大程度上受栅极驱动源的驱动能力的影响。在导通瞬间, 为 MOSFET 提供的瞬态电流越大, 则导通的延迟时间越小, 因此, 要提高 MOSFET 开关管的速度就要提高驱动电路的驱动能力: 能够提供较大的驱动电流、驱动电压及具有较快前沿的驱动脉冲, 并且驱动电路的输出电阻应尽量小。本文选用 IXYS 公司的专用 MOSFET 驱动芯片 IXDD409, 它能提供 9A 的驱动电流, 输出信号上升沿和下降沿小于 30 ns。

直流输入电源采用美国斯坦福生产的高压电器 PS350。PS350 是专门针对实验研究和测试用的高精度高压电源, 不仅纹波噪声非常低, 而且具有非常高的稳定性和精确度, 其稳压率可达 0.001%, 精确率可达 0.05%。PS350 最高可输出 5 KV, 是科学研究中非常理想的精密电源, 在高精度实验测试中具广泛的应用。

3 Pspice 电路仿真

利用 Pspice 16.5 工具对脉冲成形电路 (如图 3) 进行了功能仿真实验验证。Q1 为 IXTK5N250, HV 设定为 2 kV, R_s 和 R_L 设定为 50 k Ω , C_1 设定为 4.7 μ F, 输入正脉冲宽度为 5 μ s, 幅度为 20 V。仿真结果如图 4 所示, 图中 V (R3: 1) 为输入脉冲, V (OUT) 为输出脉冲。输出脉冲为负极性脉冲, 幅度为 -2 KV, 脉冲前沿为 3.2 ns, 后沿约为 1 μ s, 脉冲宽度约为 6.5 μ s。从仿真结果可以得知: (1) 电路的功能正确; (2) 输出脉冲具有极快的下降沿, 这是由 IXTK5N250 快速开关特性决定的; (3) 为了使输出脉冲能在几微秒时间内保持稳定而不产生大的偏移, 选择较大的电容和输出电阻, 加大了放电回路的放电时间, 因此输出脉冲宽度产生了一定程度的展宽。

4 测试结果与分析

利用示波器和 1: 1 000 的高压棒对实际电路进行了测试。触发输入脉冲宽度为 7 μ s, 幅度为 10 伏。图 5 中第 1 通道为输出脉冲波形, 第 3 通道为驱动级输出波形, 测量结果如下: (1) 负脉冲幅度约为 1960 伏、后沿约为 7 μ s、宽度约为 7.974 μ s 秒 (略有展宽); (2) 驱动级输出幅度约 15 伏。

图 6 为触发输入脉冲和输出脉冲的前沿波形, 其中第 1 通

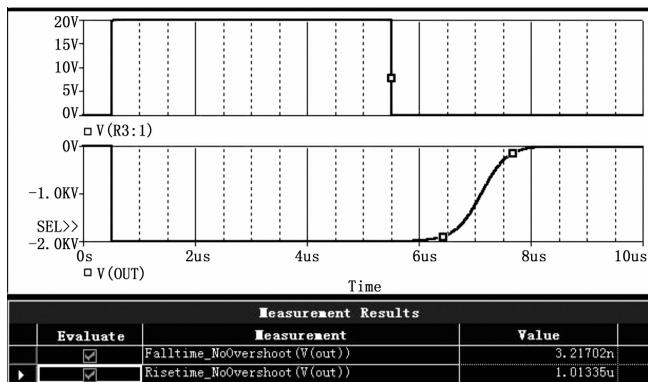


图 5 功能仿真结果

道为输出脉冲，第 3 通道为输入触发，测得如下结果：（1）系统的延迟时间约为 140 ns；（2）输出脉冲前沿约为 48 ns；（3）负脉冲的幅值由超调参数给出，约为 1%，约为 20 伏。

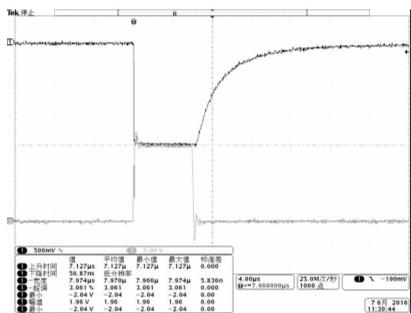


图 6 输出波形与驱动级输出波形

5 小结

本文基于单个功率 MOSFET 固体开关器件和高精度直流电源构建了一种高稳定性高压脉冲电源，用于产生脉冲宽度为

(上接第 261 页)

[2] Somani U, Lakhani K, Mundra M. Implementing digital signature with RSA encryption algorithm to enhance the Data Security of cloud in Cloud Computing [A]. Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC), 2010 1st International Conference on [C]. IEEE, 2010: 211-216.

[3] Dubey A K, Dubey A K, Namdev M, et al. Cloud-user security based on RSA and MD5 algorithm for resource attestation and sharing in java environment [A]. Csi Sixth International Conference on Software Engineering [C]. 2012; 1-8.

[4] 张永建. RSA 算法和 SM2 算法的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.

[5] 王 振. 基于嵌入式实现 SM1 算法的系统设计 [J]. 电子世界, 2012 (3): 119-120.

[6] 国家密码管理局. 国家密码管理局公告第 23 号 [EB/OL]. (2012-03-21). <http://www.oscca.gov.cn/News/201204/News-1227.htm>.

[7] 王 翔. 密码学及 DES 算法探究 [J]. 中国科技博览, 2015 (29): 31.

[8] Daemen J, Rijmen V. The Design of Rijndael: The Wide Trail Strategy Explained [M]. New York: Springer-Verlag, 2000.

[9] Feldhofer M, Dominikus S, Wolkerstorfer J. Strong Authentication for RFID Systems Using the AES Algorithm [A]. Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2004, International

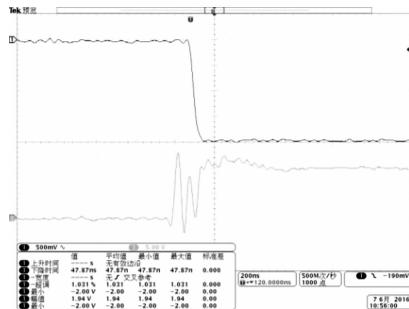


图 7 前沿波形时间放大图

2~10 微秒的脉冲，达到如下指标：输出波形为负极性脉冲、输出幅度约 -2 KV、输出前沿约 48 ns、后沿约 7 μs、精度约 1%、固有延迟 140 ns。该系统具有结构简单、稳定可靠、精度较高的优点，可以为特定的光电器件提供优质的控制方式。

参考文献:

[1] 毛久兵, 王 欣, 唐 丹, 等. 低抖动纳秒高压脉冲源研究 [J]. 原子能科学技术, 2013, 47 (5): 888-892.

[2] 杜继业, 宋 岩, 罗通顶, 等. 像增强器高速选通脉冲发生器 [J]. 现代应用物理, 2013, 4 (3).

[3] 罗通顶, 郭明安, 杜继业, 等. 远程控制高时间分辨多通道脉冲发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2921-2923.

[4] 王雅丽, 毛晓惠, 邵 葵, 等. HL-2A 脉冲高压电源测量系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2095-2097.

[5] 黄燕华. 可调脉冲电源的研制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[6] 王庆峰, 高国强, 张政权, 等. 紧凑型可重复运行的高功率纳秒脉冲源 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21 (6): 956-960.

[7] 刘锡三. 高功率脉冲技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[8] IXYS, Advance Technical Information, IXTK5N250 (DS100280) [Z]. Workshop [C]. Cambridge, Ma, Usa, 2004; 357-370.

[10] Bellaachia A, Portnoy D, Chen Y, et al. E-CAST: A Data Mining Algorithm for Gene Expression Data [A]. ACM SIGKDD Workshop on Data Mining in Bioinformatics [C]. 2002; 49-54.

[11] 汪 建, 方洪鹰. 云计算与无线局域网安全研究 [J]. 重庆师范大学学报自然科学版, 2010, 27 (3): 64-68.

[12] 王 磊, 范会敏. 一种无线局域网传输短消息的加密算法 [J]. 现代电子技术, 2010, 33 (4): 119-121.

[13] 胡 亮, 迟 令, 袁 巍, 等. RC4 算法的密码分析与改进 [J]. 吉林大学学报理学报, 2012, 50 (3): 511-516.

[14] Nie T, Zhang T. A study of DES and Blowfish encryption algorithm [A]. TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference [C]. 2009; 1-4.

[15] 尚华益, 姚国祥, 官全龙. 基于 Blowfish 和 MD5 的混合加密方案 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (1): 231-233.

[16] Rakheja P. Integrating DNA Computing in International Data Encryption Algorithm 'IDEA' [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 26 (3).

[17] 李 佳. IDEA 算法综述 [J]. 科技广场, 2012 (9): 240-242.

[18] 王 魁, 李立新, 余文涛, 等. 基于 ECC 算法的 TLS 协议设计与优化 [J]. 计算机应用研究, 2014 (11): 3486-3489.

[19] 林伟斌. 智能电网环境下企业客户端电力智能单元 [J]. 科技信息, 2010 (26): 357-357.