文章编号：1672-2892(2012)06-0744-05

基于 GaAs 光导开关的纳秒脉冲源设计

姜　苹，谢卫平，李洪涛，袁建强，刘宏伟，刘金锋，赵　越

(中国工程物理研究院 流体物理研究所，四川 绵阳 621900)

摘　要：以高密度聚乙烯介质平板型 B 线为储能器件，设计了一台层叠 Blumlein 传输线型脉冲功率源。以 GaAs PCSS 为开关，通过 4 级 B 线层叠结构实现电压倍增。单级 B 线阻抗 25 Ω，时间常数 2.5 ns，功率源总阻抗 100 Ω。Pspice 模拟表明：随着开关导通电阻上升，输出电压脉冲幅度下降，脉宽增大；随着开关转换时间增长，输出脉冲延迟时间上升，前、后沿时间增长。采用波长为 1 064 nm，能量为 30 mJ，脉宽为 5 ns 的 Nd:YAG 激光器触发光导开关，当充电 25 kV 时，负载上得到电压 38 kV，上升沿 1.4 ns，脉冲约 5 ns 的近似方波输出。

关键词：GaAs 光导开关；层叠 B 线；脉冲充电；纳秒激光

中图分类号：TN718　　**文献标识码：**A

Design of nanosecond pulsed power source based on GaAs PCSS

JIANG Ping, XIE Wei-ping, LI Hong-tao, YUAN Jian-qiang, LIU Hong-wei, LIU Jin-feng, ZHAO Yue

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: A nanosecond pulsed power source based on stacked Blumlein line is designed, consisting of four stages of plate Blumlein line, and each line with a GaAs Photoconductive Semiconductor Switches(PCSS). The Blumlein line is based on high-density polyethylene for energy storage. Its pulse width, impedance and total impedance are 2.5 ns, 25 Ω, and 100 Ω respectively. A Pspice model of the pulsed power source is established. Simulation results indicate that output voltage is affected by isolation resistance of the charging circuit, closed resistance and transition time of GaAs switch. Nanoseconds laser triggering experiments are tested, and the output waveforms are close to square waves with 38 kV of voltage, 1.4 ns of rising edge under 25 kV of charging voltage.

Key words: GaAs Photoconductive Semiconductor Switches; stacked Blumlein line; pulse charge; nanosecond laser

在脉冲功率系统中，通过对能量进行时间和空间上的压缩可获得高功率脉冲[1]。目前，脉冲功率技术已经覆盖毫秒、纳秒甚至亚纳秒的脉宽范围，功率容量覆盖 MW 至百 TW 量级，在军事和民用领域均已获得广泛应用。近年来，由于工业、医疗等领域的需求，可重复频率运行的紧凑型固态脉冲功率源得到快速发展。光导开关具有功率容量大(数十 MW)、重复频率高(kHz 量级)、响应速度快(亚纳秒量级)、结构紧凑等优点，成为固态脉冲功率技术的重要研究内容之一[2-5]。目前，光导开关器件本身的相关报道较多，并已取得较好的技术指标[6-7]，但有关光导开关器件应用的报道较少。在前期光导开关研究的基础上，本文基于 GaAs 光导开关进行纳秒脉冲源的设计、模拟分析及实验。

1　脉冲功率源设计

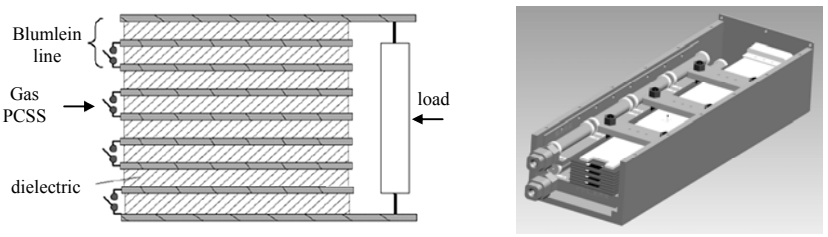
脉冲功率系统中，较高的输出电压可通过增加输出级数的方式获得[8]。本课题组成功研制了电极间隙为 10 mm 的光导开关[9]，脉冲充电条件(充电时间＜100 μs)下，该开关能够耐受 60 kV 的电压，远大于其直流耐受电压。

本文中，脉冲源的设计指标为：最大输出脉冲电压：100 kV；最大输出脉冲电流：1 kA；输出脉冲宽度：5 ns；输出脉冲上升沿(10%~90%)：＜1 ns；匹配阻抗：100 Ω。脉冲源采取脉冲充电方式。课题组自研的脉冲充电机最

收稿日期：2011-12-29；修回日期：2012-02-29

大充电电压 25 kV，充电时间 3 μs。脉冲充电降低了光导开关的暗态热损耗，有利于提高开关寿命。根据脉冲源的设计指标和开关的技术参数，采用平板 Blumlein 线(布鲁姆莱茵线，简称 B 线)作为储能和脉冲形成器件，光导开关作为脉冲形成开关，4 级层叠 B 线结构实现脉冲倍压输出。紧凑的结构设计，有利于最大程度减小回路杂散电感，提高脉冲上升沿陡度。采用特别设计的光路系统，结合激光器实现了 4 个光导开关的同步触发。

脉冲功率源结构如图 1 所示，平板型 B 线被放置在长方体箱体内，并充装变压器油以保证绝缘，箱体前端安装 K9 光学玻璃窗。B 线阻抗 25 Ω，时间常数 2.5 ns。脉冲源建立时，4 级 B 线串联输出，脉冲源总输出阻抗为 100 Ω。选取高密度聚乙烯板(ε_r=2.3)作为层叠 B 线的电介质材料。脉冲功率源的阻抗 Z、脉宽 T 分别为：



(a) schematic diagram　　(b) structure sketch

Fig.1 Stacked Blumlein line pulsed power source
图 1 层叠 B 线型脉冲功率源示意图

$$Z = 2nZ_0 \tag{1}$$

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{d}{w} \tag{2}$$

$$T = 2\frac{l}{v} = \frac{2l\sqrt{\varepsilon_r}}{c} \tag{3}$$

式中：Z_0 为单级 B 线阻抗；n 为级数；d,w,l 分别为平板电极的厚度、宽度、长度；v 为光在介质中的传播速度；c 为光速。

根据阻抗、脉宽，可得：d=3 mm；w=60 mm；l=500 mm。为防止相邻电极板的沿面击穿，取介质板长、宽分别为 520 mm,80 mm。

激光触发光路系统如图 2 所示，激光器输出的激光束经扩束后使用柱面透镜阵列形成 4 束条状光束，分别用于同步触发 4 只光导开关。

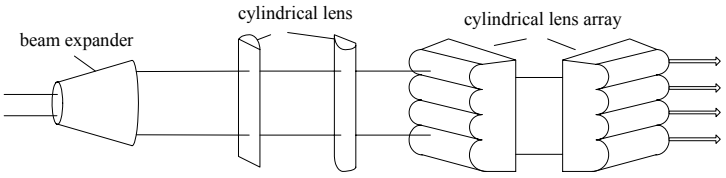


Fig.2 Triggering light system sketch of stacked Blumlein line pulsed source
图 2 层叠 B 线型脉冲功率源触发光路系统示意图

2　参数估算及模拟

层叠 B 线型脉冲功率源的输出受开关导通电阻、导通时间、开关电感、负载、回路电感及级间隔离电阻等诸多参数影响。

GaAs 光导开关工作在线性模式时，其电感可按低频矩形截面直导线的电感公式估算[10]：

$$L = \frac{\mu_0 l_s}{2\pi}\left(\ln\frac{2l_s}{b_s+c_s}+\frac{1}{2}\right) \tag{4}$$

式中：l_s 是开关长度；b_s 和 c_s 是开关矩形截面的边长。

光导开关电极间距 10 mm，连接电极长约 35 mm，计算可得开关电感约为 16 nH。

光导开关非线性模式的导通电感可按气体开关火花电感经验公式估算[1,11]：

$$L_s \approx 14d_s \tag{5}$$

式中 d_s 为光导开关中丝状放电通道长度。

计算可得非线性模式 GaAs 光导开关的导通电感约为 20 nH，线性和非线性模式负载均为 30 nH。

光导开关导通状态的电阻值可由下式[12]估算：

$$R_{on} = \frac{l^2 h\nu}{E_a q\mu} \tag{6}$$

式中：l 是电极间距；$h\nu$ 是光子能量；E_a 是光导开关吸收的激光能量；q 是基本电荷；μ 是电子和空穴的载流子迁移率之和 μ=(μ_n+μ_p)。

实验采用 Nd:YAG 激光器，输出纳秒激光脉冲能量约为 30 mJ，考虑光路能量损失和开关吸收效率，每个开关得到的实际触发激光能量约为 3 mJ。根据开关的结构、激光能量和材料参数，并认为高场下载流子迁移率为恒定值 μ=1 000 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$，计算可得 GaAs 光导开关的通态电阻约为 0.4 Ω。因而，理想情况下，脉冲源建立时等效阻抗与负载基本相等，从而对输出效率影响较小。

采用图 3 所示的 Pspice 模型可分析回路参数对输出脉冲参数的影响。图中，P 是开关导通电阻；L 是开关电感；R_g 是级间隔离电阻；R_5 为负载，为达到负载匹配取 R_5=100 Ω；C_1 是储能电容；T_{tr} 表示开关导通时间。充电电压 25 kV 时，理想情况下，负载上可得到 100 kV 输出电压。分别对 P,T_{tr},R_g 进行参数扫描，以得到各参数对功率源输出性能的影响。

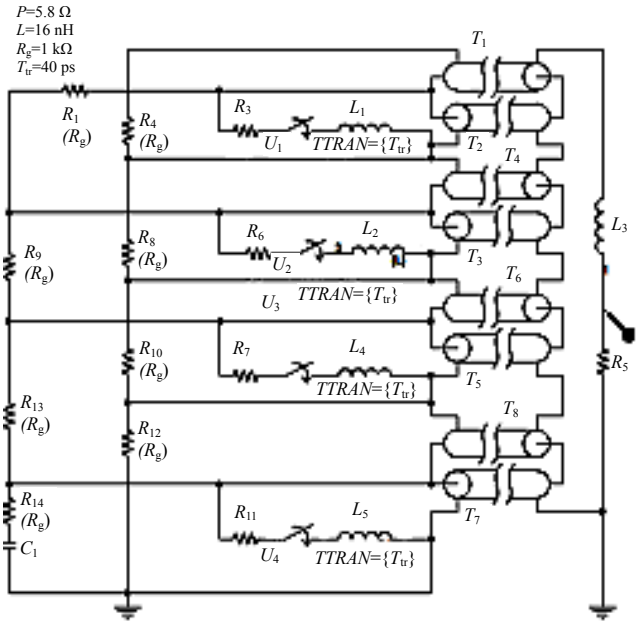


Fig.3 Pspice model for stacked Blumlein line pulsed power source
图 3 层叠 B 线型脉冲功率源的 Pspice 模型

如图 4 为 L=16 nH，T_{tr}=40 ps，R_g=1 kΩ时，P 分别为 0.1 Ω,1 Ω,5 Ω,10 Ω,20 Ω时的对应波形。由图可知，随着开关导通电阻上升，输出电压幅值逐渐减小。开关导通电阻的存在使得脉冲源等效阻抗大于负载阻抗，输出电压波形出现振荡，且振荡周期取决于电磁波在 B 线中的传播时间。同时，与负载阻抗失配，导致输出波形出现台阶形后沿，整个波形的脉宽变宽。导通电阻为 5 Ω时，输出电压幅值约为 68 kV，输出效率 68%。导通阻抗为 20 Ω时，输出电压幅值约为 37 kV，输出效率 37%。由此可见，输出电压幅值与导通电阻密切相关。此外，开关电感的存在导致输出电压波形在峰值处出现尖峰。

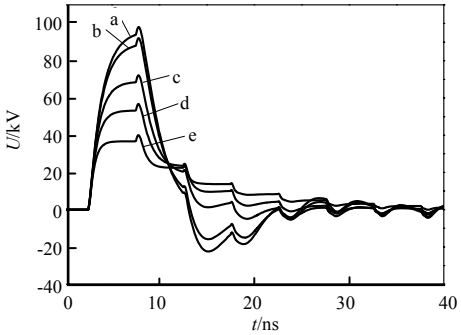


Fig.4 Output voltage versus different turn-on impedance of switch
图 4 开关导通电阻对输出波形的影响

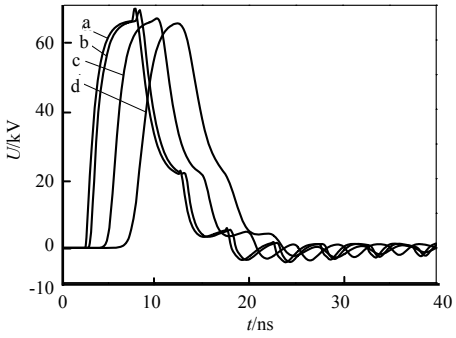


Fig.5 Output voltage versus different transition time of switch
图 5 开关导通时间对输出波形的影响

图 5 为 P=5.8 Ω，L=16 nH，R_g=1 kΩ时，T_{tr} 分别为 40 ps, 1 ns,5 ns,10 ns 时的对应波形。可见随着 T_{tr} 的上升，输出电压脉冲波形的前、后沿逐渐变缓，同时输出脉冲的延迟时间增大。

图 6 为 P=5.8 Ω，L=16 nH，T_{tr}=40 ps 时，R_g 分别为 0.1 kΩ, 1 kΩ,5 kΩ,10 kΩ时的对应波形。由图可知，当 R_g 上升时，隔离效果得到改善，输出电压幅值逐渐增大，但同时也导致充电时间延长，不利于重复频率的提高。

参数扫描结果显示输出脉冲波形受开关导通电阻、导通时间、级间隔离电阻影响。其中，开关导通电阻、级间隔离电阻对输出电压幅值的影响较为明显。开关导通时间则主要影响输出脉冲的上升沿、下降沿及脉冲延迟。

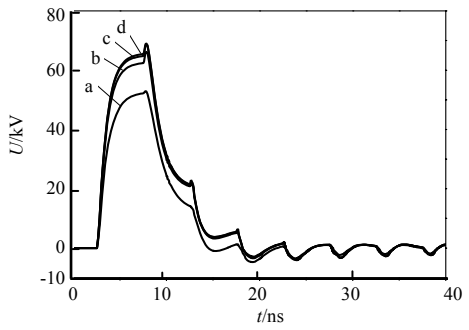


Fig.6 Output voltage versus different isolation resistance
图 6 隔离电阻对输出波形的影响

3　实验结果与讨论

利用自制的脉冲充电机(半高宽 3 μs,电压≤25 kV)充电。使用波长 1 064 nm、能量 30 mJ、脉宽 5 ns 的 Nd:YAG 激光器触发光导开关。实验中使用分压器测量充电电压波形，自制磁探针测量输出电压(标定结果为 1.45 kV/1 nVs，即每 1 nVs 对应 1.45 kV)。充电电压波形和输出电压波形分别如图 7 和图 8 所示。由图 7 可看出开关动作后，充电电压波形出现振荡，其成因尚不明确，初步估计应与空间电磁干扰有关。由图 8 可知，充电电压 25 kV 时，输出电压峰值约为 38 kV，脉冲上升沿(10%~90%)约 1.4 ns。

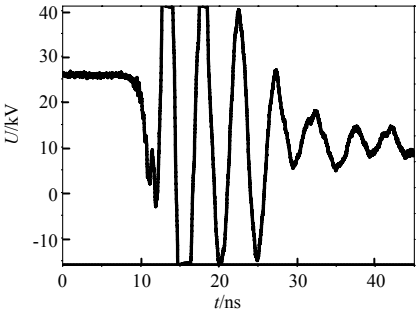


Fig.7 Charging voltage detected by divider
图 7　充电电压波形

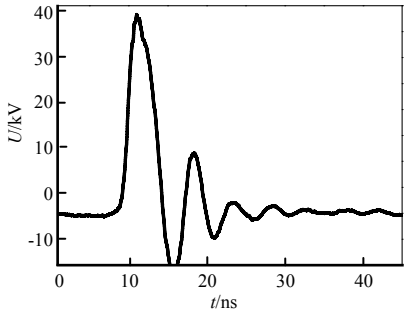


Fig.8 Output waveform
图 8　实验输出波形

对电路进行详细分析，初步认为造成输出电压效率较低有两方面原因。首先，变压器油对近红外谱段有较强的吸收，触发激光脉冲能量损失较大，导致开关导通电阻增大。结合 Pspice 仿真结果，输出电压值与导通阻抗 20 Ω时的仿真输出电压接近，由此可推断光导开关的导通阻抗在 10 Ω量级，远大于估算值。其次，各级充电隔离电阻采用串联连接方式，第 2、3、4 级 B 线的实际充电电压小于在充电输入端测量的电压。后级 B 线的充电时间常数较前级更大，且脉冲充电机的充电时间小于后级 B 线充电时间常数，因此，当脉冲源建立时，4 级 B 线的实际电压和将小于理论值。进一步实验发现，脉冲充电机充电电压为 1.3 kV 时，各级 B 线上的实际充电电压存在差异，和约为充电电压的 3.2 倍。

4　结论

本文总结分析了基于 GaAs 光导开关的 4 级层叠 B 线型纳秒脉冲源的设计、研制和初步实验工作。采用 Pspice 电路模拟方法研究分析了开关电阻、导通时间、隔离电阻对脉冲源输出特性的影响。通过实验系统的建立，得到了激光脉冲触发方式下的脉冲源输出波形。其中，开关导通电阻、级间隔离电阻对输出电压幅值的影响较为明显。脉冲的上升沿、下降沿及脉冲延迟则主要由开关导通时间影响。后续拟通过降低光导开关导通阻抗，改进充电电路设计、光路设计，提高激光触发脉冲能量等方法，改善脉冲源的综合性能。

参考文献:

[1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (LIU Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)

[2] Gaudet J A,Barker R J,Buchenauer C J,et al. Research issues in developing compact pulsed power for high peak power applications on mobile platforms[J]. Proceedings of the IEEE, 2004,92(7):1114-1165.

[3] Nunnally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(4):1262-1267.

[4] Schoenberg J H,Burger J W,Tyo J S,et al. Ultra-wideband source using Gallium Arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997,25(2):327-334.

[5] Prather W D,Baum C E,Lehr J M,et al. Ultra-Wideband Source and Antenna Research[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000,28(5):1624-1630.)

[6] Zutavern F J,Armijo J C,Cameron S M,et al. Optically activated switches for low jitter pulsed power applications[C]// Proc. of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas,Texas,USA:[s.n.], 2003:591-594.

(下转第 770 页)