

大功率 CO₂ 激光器中的气体开关触发系统

张兴亮

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为提高击穿 CO₂ 激光器中大功率气体开关的稳定性, 提高触发系统的效率, 减小触发系统的损耗, 开展了基于双管正激式电路拓扑的微秒级高电压脉冲触发系统的研究。该系统输出电压幅值 >38 kV、脉冲宽度 10 μs、脉冲数可控的信号击穿气体开关引燃激光器放电; 设计干式脉冲变压器作为升压单元; 根据反馈电路检测开关的击穿情况, 通过 SG3525 和 CD4098 两种集成电路芯片设计的外围电路控制高压脉冲的输出频率和输出脉冲个数。试验结果表明: 该系统在 500 Hz 重复频率下击穿气体开关的概率为 99.7%, 效率为 0.2, 损耗为 0.88 kW; 对比传统模式触发系统, 击穿概率提高了 2.7%, 效率提高了 0.12, 损耗减小了 1.512 kW。

关键词: CO₂ 激光器; 气体开关; 重复频率; 触发系统; 击穿放电

Trigger Generator for Repetition Frequency Gas Switch of High-power CO₂ Laser

ZHANG Xingliang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the breakdown stability of gas switch in CO₂ laser, to improve the efficiency of trigger system, and to reduce the loss of trigger system, we developed a set of high-voltage pulse trigger generator (microsecond level) based on two-transistor forward topology. In the generator, high voltage pulses (the number is adjustable) with amplitude exceeding 38 kV and width of 10 μs was adopted to breakdown hyperbaric gas between electrodes of spark switch, dry-type high-voltage transformer was used as a booster unit, and the sampling and feedback control circuit that mainly consists of SG3525 and CD4098 was designed to monitor the situation of spark switch and control the frequency and number of output pulses. The experimental results show that breakdown probability of this pulse trigger generator is 99.7%, the efficiency is 0.2, and the loss is 0.88 kW, when the PRF is 500 Hz. Compared to traditional trigger system, the breakdown probability of our design is increased by 2.7%, the efficiency is increased by 0.12, and the loss is reduced by 1.512 kW.

Key words: CO₂ laser; gas switch; repetition frequency; trigger system; breakdown discharge

0 引言

科学技术的进步使得以激光器为基础的激光技术迅速发展, 逐步应用到航空航天、雷达探测、光电对抗、电子仪表等领域。其中, TEA CO₂ (transversely excited atmospheric-pressure CO₂) 激光器, 即横向激励高气压二氧化碳激光器, 因为其良好的特性被广泛应用^[1-3]。该激光器属于高压电脉冲激励型激光器, 核心工作过程为高压电容器组的反复充放电, 其电控系统由高压电源、放电电路和控制电路 3 部分组成。

本实验室的 TEA CO₂ 激光器采用三电极气体开关作为放电开关, 控制气体开关导通的系统称为开关触发器, 触发器的输出特性直接决定气体开关

的导通特性, 进而影响 TEA CO₂ 激光器的工作稳定性^[4-5]。

当前, 适用于重频工作的气体开关触发系统为脉冲变压器型, 即通过脉冲变压器升压得到所需高压脉冲信号控制气体开关导通放电^[6-7]。国外, 美国的 NIF 工程和圣地亚哥 Maxwell 实验室均采用脉冲变压器升压的方法; 国内的重庆大学、西北核技术研究所和华中科技大学等机构研制的气体开关触发器均采用脉冲变压器升压的方法^[8-12]。本实验室当前应用的开关触发系统^[13]采用单管正激式的电路拓扑结构, 将宽度为 100 μs 的脉冲信号经脉冲变压器升压获得 >40 kV 的高压脉冲控制气体开关导通, 该触发系统击穿气体开关的时间在高压脉冲输出的上升期间, 开关导通后将有大量的残余能量, 需要

大电阻进行吸收,触发系统效率低、损耗大、体积大;同时,系统没有输出检测反馈,采用单脉冲触发,可靠性低。

由气体击穿的伏秒特性曲线可知,提高击穿电压、减小脉冲宽度能达到击穿气体开关的目的;另外,气体放电时延导致气体击穿具有分散性,放电概率一般服从高斯分布,根据概率论分析,多脉冲的触发模式可以提高击穿开关的可靠性^[14-16]。综上所述,本文将研究一种损耗小、效率高、体积小、可靠性高的触发系统。

1 开关触发系统输出参数要求

气体开关的间隙约为 5 mm,工作时充以纯净的氮气,根据实际环境调节工作气压,一般 >0.1 MPa。为设计此种气体开关的触发系统,需提前确定输出电压幅值、脉冲宽度、工作频率和脉冲数几个参数。

为得到触发系统所需输出电压幅值,参考传统触发系统的试验数据,确定本触发系统的输出电压幅值;传统触发系统重频工作时的击穿电压约为 38 kV,所以本触发系统的输出电压幅值设计为 45 kV,以留有安全裕量。

本系统的研制借鉴了传统触发系统直接脉冲升压后击穿开关的方法,对触发电路进行了新设计,增加了反馈电路;击穿气体间隙对触发脉冲电压主要有 3 个方面的要求:

- 1) 脉冲的幅值,幅值大一些为好。
- 2) 脉冲的上升陡度,脉冲陡度越陡越好。
- 3) 脉冲宽度,保持一定的高电压脉冲有利于气体击穿。

同时,应用脉冲变压器直接升压实现 40 kV 量级的高压很难做到微秒级。

综合以上分析,考虑系统的上升沿触发模式及系统的损耗,选择 10 μ s 脉冲宽度作为驱动脉冲。10 μ s 脉冲宽度和 100 μ s 脉冲宽度相差一个数量级,根据气体击穿的伏秒特性可知,击穿电压增加的压差不会很大。

在激光器的单个放电周期内,当触发系统采用单个高电压脉冲击穿气体开关时,存在不能有效击穿的现象,系统击穿概率约为 97%;从概率论角度分析,增加高电压脉冲个数可以提高系统的击穿概率;但是,如果单个脉冲已经形成放电现象,则要求系统在此放电周期内停止发送脉冲信号,所以脉

冲个数应根据放电情况可调。

最后,触发频率应根据重频 TEA CO₂ 激光器的需要来设置。

2 开关触发系统的设计

2.1 开关触发系统的组成

开关触发系统的组成如图 1 所示,主要由整流滤波单元、功率开关转换单元、高压脉冲变压器单元、驱动和保护电路单元、输出整形单元和采样反馈控制单元组成。

开关触发系统的基本工作原理:整流滤波单元将 220 V AC 供电转换为直流电。触发信号有输出,信号控制电路将其转换到适合脉冲宽度,经驱动电路放大后用于驱动功率开关变换器。变换器导通形成脉冲激励信号,激励信号经高压脉冲变压器升压后获得一定幅值和宽度高压脉冲,次高压脉冲经整形后施加到三电极气体开关的触发电极。该触发器通过反馈电压信号确定三电极开关是否被击穿,若没有击穿,则须在这个周期内再继续触发脉冲。图 1 中的触发信号指上位机发出的触发指令,提供调试用的单脉冲和重频脉冲。

2.2 功率开关变换器的设计

针对开关触发系统的单极性脉冲输出,正激式变换器拓扑结构和反激式变换器拓扑结构比较适合。由于反激式变换器在开关导通期间利用变压器存储能量,变压器初级相当于储能电感,变压器设计难度太大,同时,开关管关断期间产生高压脉冲,脉冲信号的上升沿不受控制,本文采用正激式开关变换器。

图 2(a)为单管正激式变换器, U_i 为直流电压, D_1 为输出整流二极管, D_2 为续流二极管, D_3 和电感 L_w 组成反向吸收电路。图 2(b)为双管正激式变换器, V_1 、 V_2 为两只开关管, D_3 、 D_4 为钳位二极管;驱动信号控制两只开关管同时导通、关断。当 V_1 、 V_2 关断瞬间,变压器初级两端电压极性反向,

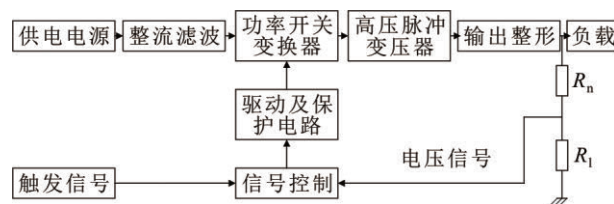


图 1 开关触发系统组成框图

Fig.1 Block diagram of the pulse trigger generator

二极管 D₃、D₄ 导通, 开关管两端的电位被钳位, 保护了开关管的安全, 本文选择双管正激式变换电路。

功率开关是脉冲形成回路中的关键部件, 功率开关器件导通后, 直流输入电压、功率开关以及变压器初级构成闭合回路。功率开关管导通电阻非常小, 对导通电流的限制作用很小, 只能利用变压器的励磁电感和漏感 L 进行限流, 这要求变压器工作在非饱和状态。因此, 电流 i 与电压 u 需要保持平衡, 其关系为

$$L \frac{di}{dt} = u \quad (1)$$

传统型脉冲触发系统重频工作时的功率约为 2.6 kW, 开关击穿功率为 210 W。因此, 供电方式选用单相 220 V AC 网电, 经整流单元后的电压约为 310 V。脉冲激励信号宽度为 10 μ s, 则变压器上升沿约 5 μ s。根据脉冲变压器的相关计算式估计变压器的励磁电感和漏感应该 >100 μ H。将以上分析数据代入式(1), 计算得到电流最大值约为 30 A。同时, 气体开关击穿瞬间也将对变压器初级产生瞬态大电流干扰。变压器漏感在开关管关断时将在其两端产生数倍于输入直流电压的尖峰。综上所述, 选用西门康公司生产的大功率半导体器件 SKM200GA173D, 电压 1 700 V, 电流 200 A。

2.3 信号控制电路的设计

分析传统触发系统的试验数据, 单脉冲模式击穿气体开关的概率为 97%, 根据概率分析计算, 双脉冲的触发模式可以把击穿概率提高到 99.9%。若采用双脉冲模式工作, 系统无需反馈控制, 但有些触发信号是无用的, 并且将增加系统的功率和发热量, 所以需要输出脉冲个数可控。采样和反馈控制电路用来判断气体开关是否被击穿, 并决定输出脉冲个数(1 个或 2 个)。由试验数据可知, 气体开关被击穿的电压一般 ≥ 36 kV, 未被击穿时变压器输出电压 <35 kV。当反馈电路监测到低于关键电压 36 kV 时, 需要在这个周期内经过一段延时之后, 再向功率开关元件发出一个触发脉冲。

采样和反馈控制电路原理图如图 3 所示, OUTTRI 表示输入指令信号, VFBK 表示负载电压反馈信号, VSET36 表示负载电压达到 36 kV 时的设定电压, SHUT 表示输出脉冲控制信号, SG3525 的 11 脚为控制电路输出信号。HCPL-4504 接收外部指令信号, 经隔离后输出到 CD4098 的 5 脚, 继而触发 CD4098 工作, CD4098 的 6 脚输出一定宽

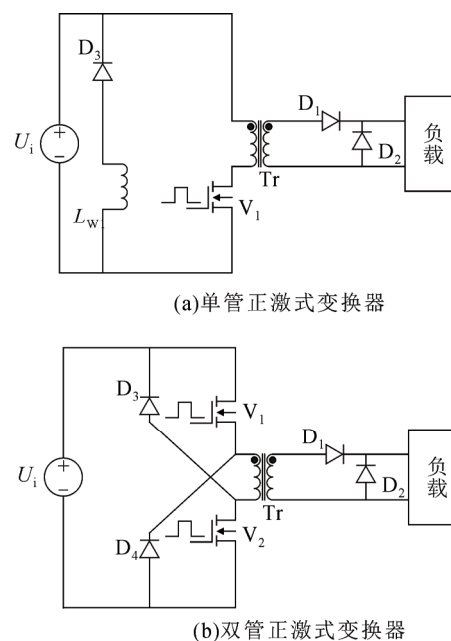


图 2 单管和双管正激式变换器电路拓扑

Fig.2 Single-transistor forwards converter and two-transistor forward converter

度的脉冲信号到 SG3525 的 10 脚, CD4098 的 6 脚脉冲宽度由 C₂、R₅ 和 VR1 决定; SG3525 的 11 脚脉冲宽度由其 2 脚的电压决定, 周期由 5 脚和 6 脚外接的电容和电阻决定; CD4098 的 3 脚受反馈电压信号的控制, 当反馈电压信号表明气体开关被击穿时, 3 脚拉低, 等待下一个工作周期。

2.4 高压脉冲变压器设计

高压脉冲变压器是开关触发系统的核心转换单元, 具有电气隔离、功率传递、电压转换等作用^[17-18]。针对开关触发系统应用的高压脉冲变压器设计主要关心两个问题, 高压绝缘和响应特性。在保证绝缘设计可靠的前提下, 能在 5 μ s 以内将输出电压升高到 45 kV 即可, 所以, 允许高压脉冲变压器存在一定的漏感。

变压器工作模式导致磁芯单向磁化, 由于激励信号脉冲宽度为 10 μ s, 周期为 2 ms, 所以磁芯有足够的时间去磁, 不存在饱和效应。从变压器的绕制方便角度考虑, 选择 U 型锰锌铁氧体磁芯。

脉冲变压器初级匝数和磁芯截面积关系式为

$$N_p A_e = \frac{U_m t_d}{B} \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中: N_p 为脉冲变压器初级匝数; A_e 为磁芯截面积, cm²; U_m 表示变压器初级电压幅值, V; t_d 表示脉冲宽度, μ s; B 表示电磁感应强度, T。整流后的输入

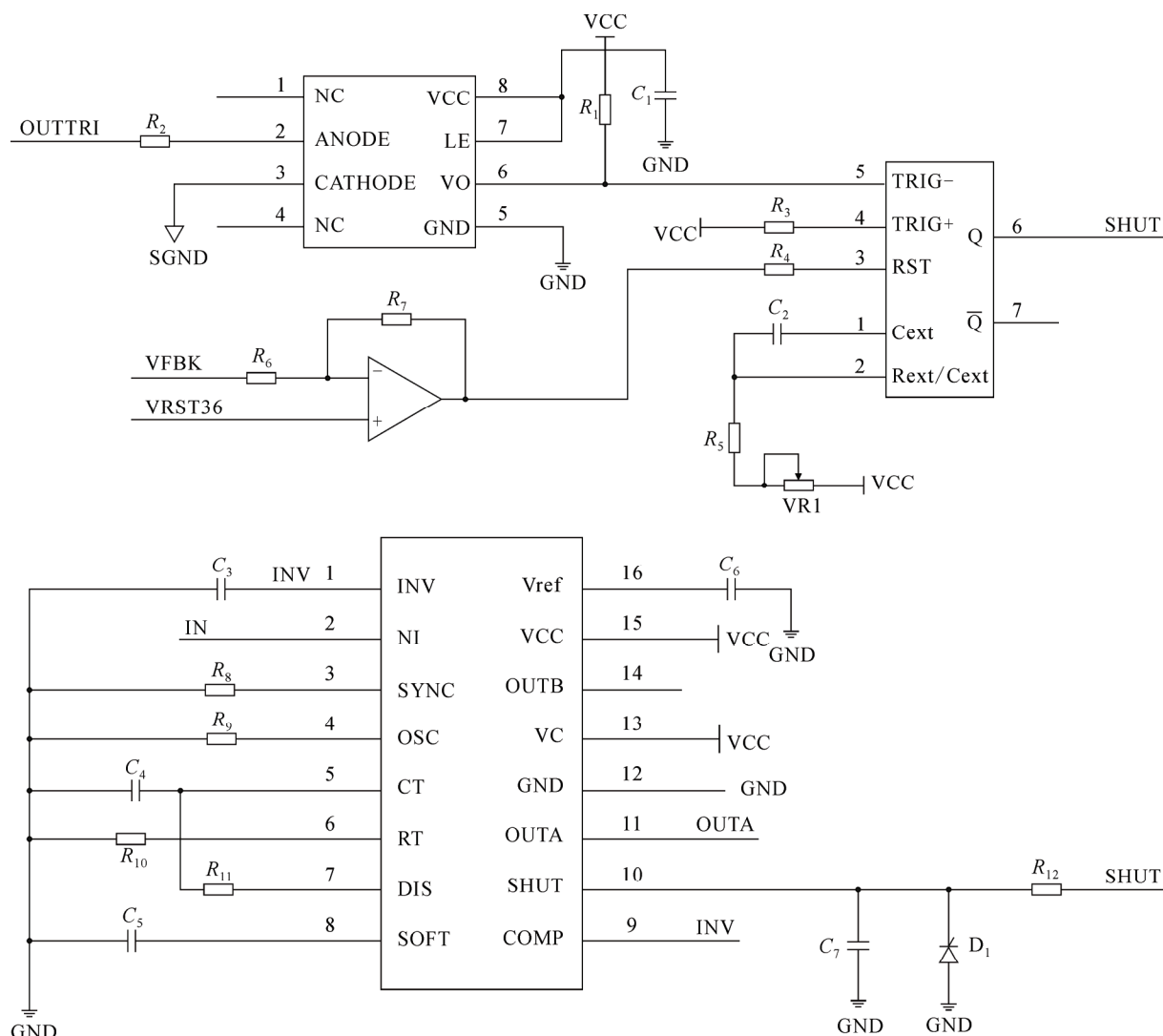


图3 采样和反馈控制电路原理图

Fig.3 Schematic of sampling and feedback control circuit

电压约为 300 V；脉冲变压器为单极性工作，电磁感应强度值为 0.1T。则有

$$NA_p = 300 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

可知，脉冲变压器初级匝数和磁芯截面积的乘积为常数，磁芯截面积越大、初级匝数越少。

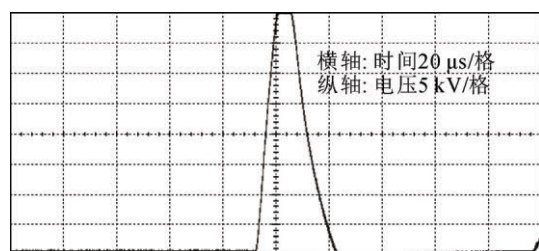
开关触发系统的整流电压约为 300 V，要得到 45 kV 的输出电压，变压器的变比为 150。由于高压脉冲变压器的变比很高，为减小变压器的绕制难度和分布参数，需减少变压器的初级匝数，根据式(3)可知，需要磁芯截面积选择尽量大。综合上述分析，应用型号为 UF120 铁氧体磁芯，其截面积为 24 cm²，得到变压器初级匝数为 14 匝，次级匝数为 2 100 匝。初级采用铜皮绕制，铜皮规格为 0.1 mm×70 mm；次级采用三重绝缘漆包线绕制，漆包线的规格为裸铜直径 0.4 mm，外层直径 0.6 mm。初级层间绝缘

采用厚度为 0.1 mm 的聚酰亚胺薄膜；次级层间绝缘采用 1 层厚度为 0.05 mm 的聚酰亚胺薄膜和 1 层厚度为 0.1 mm 的 Nomex410 绝缘纸。

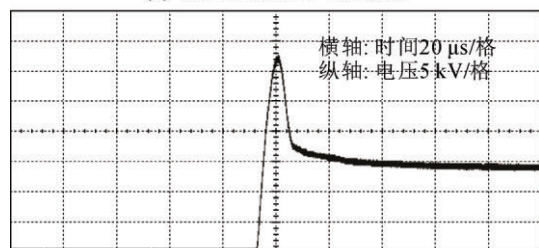
激光器的工作方式是工作 5 min、停止 15 min，所以工作时用风机直吹变压器的磁芯可满足散热要求。变压器的整体绝缘采用环氧树脂进行干式灌封，绕组经过多次浸漆、干燥并真空灌封制作成干式变压器。

3 试验结果及分析

调试本开关触发系统，首先采用单脉冲触发模式不加反馈电压信号进行工作，记录单次触发工作和重频工作的状态，用示波器和高压探头对输出电压特性进行测试，得到结果见图 4、5。图 4(a)所示为电阻负载时的输出电压波形，图 4(b)所示为三电



(a) 电阻负载输出电压波形



(b) 三电极火花开关负载未被击穿

图 4 不同负载情况的输出电压波形

Fig.4 Output voltage of pulse trigger generator with resistive load and gas switch

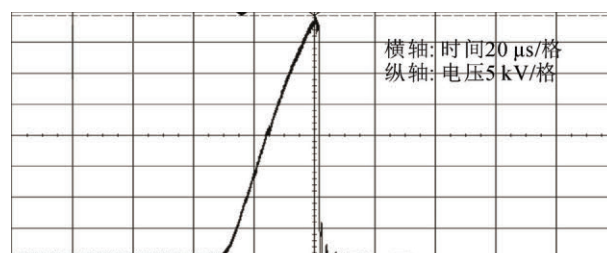
极气体开关未被击穿时触发电极对地电压波形; 图 5(a)所示为单次工作时三电极气体开关负载被击穿时触发电极对地电压波形, 图 5(b)所示为 500 Hz 重频条件下的触发电极对地波形。

根据试验数据可知, 10 μs 宽度的高压脉冲可以控制气体开关导通; 单次工作的击穿电压约为 40 kV, 500 Hz 频率工作时的击穿电压约为 38 kV; 单次击穿电压高于 500 Hz 频率工作时的击穿电压, 分析是由于重频工作时气体开关内的带电粒子比较多导致的; 电阻负载时的输出电压约为 46 kV, 符合高压脉冲变压器设计指标; 气体开关未被击穿时的输出电压约为 33 kV, 负载未被击穿, 变压器相当于空载, 输出波形发生畸变。

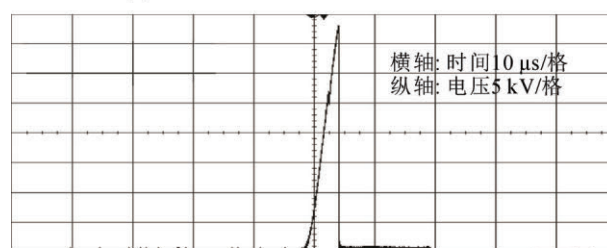
当第 1 个触发脉冲未击穿气体开关, 需要第 2 个触发脉冲时, 需要确定两个脉冲的时间间隔。根据图 5(b)试验数据可知, 完成一次单击穿的时间约为 30 μs, 设置两个脉冲的时间间隔为 50 μs。

根据单脉冲模式得到的数据对系统进行闭环调试并与激光器联机试验, 得到结果见图 6、7。图 6(a)所示为单次触发激光器主放电电极放电电压波形; 图 6(b)所示为单次放电时输出激光的能量波形; 图 7(a)所示为 500 Hz 重频下激光器主放电电极稳定放电电压波形, 图 7(b)所示为 500 Hz 重频下激光器主放电电极偶有不放电电压波形, 其中, X 轴代表时间, Y 轴代表电压。

连续试验放电 10 min, 图 7(b)所示的偶尔未放



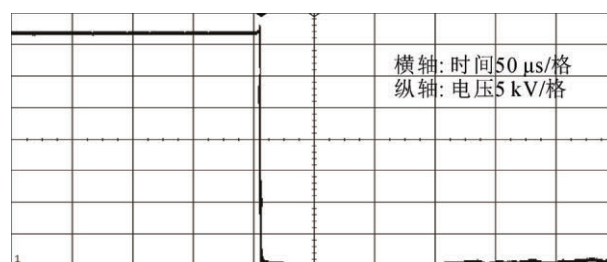
(a) 单次三电极火花开关负载被击穿时



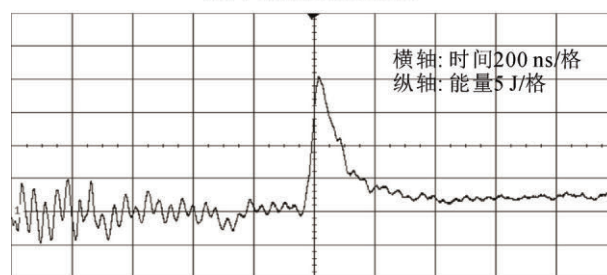
(b) 500 Hz 重频条件下的触发电极对地波形

图 5 三电极火花开关负载被击穿时的输出电压波形

Fig.5 Output voltage of pulse trigger generator when the switch is broken-down



(a) 单次触发放电波形



(b) 激光输出的能量波形

图 6 单次触发激光器放电波形

Fig.6 Discharge voltage of the main discharge gap of the laser with single pulse output energy of the laser

电现象出现的概率特别小, 捕捉 100 次激光器主放电电极放电波形, 出现了 3 次图 7(b)所示波形, 100 次捕捉数据中共含有 1 000 次放电, 得到气体击穿的概率为 99.7%。应用传统触发系统击穿气体开关, 重复上述试验, 得到击穿概率为 97%。

另外, 新型触发系统在体积和质量上比传统型

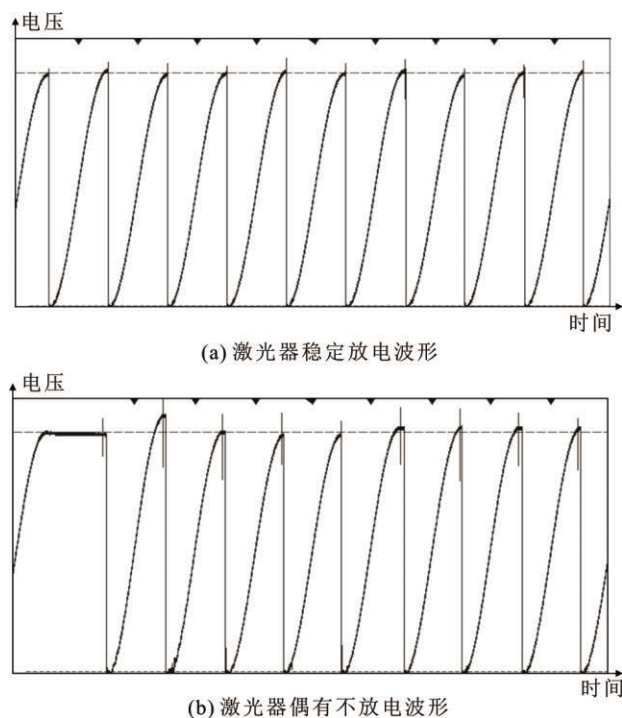


图7 激光器 500 Hz 重频触发工作时主电极电压波形

Fig.7 Discharge voltage of the main discharge gap of the laser during 500 Hz repetition frequency

触发系统降低了一大半，原因有两点：

1) 新型触发系统的损耗降低使得功率吸收电路的体积和质量降低。

2) 采用干式变压器设计降低了传统油浸变压器的体积和质量。

触发系统损耗为输入功率减输出功率，效率为输出功率与输入功率的比值；采用钳形表 FLUKE 337 测试输入电流，即可得到输入功率；通过对负载、输出电压波形、工作频率进行计算得到输出功率。500 Hz 工作频率时两种触发器参数比较如表 1 所示。

由表 1 可知，新型触发系统的损耗依然很大，效率很低，原因是采用了高压脉冲在上升沿击穿气体开关，开关击穿后存在一部分剩余能量需要吸收，造成了系统损耗大、效率低的缺点。

4 结论

1) 新型触发系统在体积和质量上比传统型触发系统降低了一大半。

2) 气体开关被击穿导通的概率为 99.7%，相比传统的单脉冲触发模式，击穿概率提高了 2.7%。

3) 新型触发系统的输入功率和损耗方面都有

表 1 500 Hz 工作频率时两种触发系统的参数

Table 1 Parameters of the two trigger systems for 500 Hz

参数	传统	新型
击穿概率/%	97	99.7
输入功率/kW	2.6	1.1
体积/cm ³	30×30×90	30×30×40
质量/kg	100	35
效率	0.08	0.2
损耗/kW	2.392	0.88

明显改善，输入功率为 1.1 kW，损耗 0.88 kW，相比传统触发系统，效率提高 0.12。

参考文献 References

- [1] 郭 劲, 李殿军, 王挺峰, 等. 高功率 CO₂ 激光器及其应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 27-37.
GUO Jin, LI Dianjun, WANG Tingfeng, et al. High-power CO₂ laser and applying technology[M]. Beijing, China: Science Press, 2013: 27-37.
- [2] 邵明振, 邵春雷, 陈 飞, 等. 激光器放电区气流均匀性对激光输出的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701005.
SHAO Mingzhen, SHAO Chunlei, CHEN Fei, et al. Effect of gas flow uniformity in discharge chamber of TEA CO₂ laser on laser output[J]. Chinese Laser, 2016, 43(7): 0701005.
- [3] 于德洋, 郭立红, 陈 飞, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0705002.
YU Deyang, GUO Lihong, Chen Fei, et al. Design of control system for high-power TEA CO₂ laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 0705002.
- [4] 张兴亮, 郭立红, 孟范江, 等. 谐振充电技术应用于火花开关触发系统的研究[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1416-1423.
ZHANG Xingliang, GUO Lihong, MENG Fanjiang, et al. Research of series resonant charging technology used as trigger system for the rotated spark switch[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1416-1423.
- [5] 林 磊, 谭林丰, 钟和清, 等. 脉冲强流环境中磁场辐射干扰对充电电源的影响及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1974-1980.
LIN Lei, TAN Linfeng, ZHONG Heqing, et al. Influence of magnetic radiation interference on charging power supply in intense pulse current environment and its suppression methods[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1974-1980.
- [6] 刘克富. 固态 Marx 发生器研究进展[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781-1787.
LIU Kefu. Research progress in solid-state marx generators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1781-1787.
- [7] 嵇保健, 王若冰, 洪 峰, 等. 基于 Marx 电路的纳秒级高压脉冲电源设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3758-3762.
JI Baojian, WANG Ruobing, HONG Feng, et al. Design of nanosecond high-voltage pulsed power source based on marx generator[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3758-3762.
- [8] BHASAVANICH D, STRACHAN D F, CREELY P, et al. Compact high current, high energy closing switches for electric gun applications[C] // 9th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, USA: IEEE, 1993: 356-359.

- [9] 黄 雷, 李玺钦, 冯宗明, 等. 重复频率脉冲功率系统触发器设计[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 681-684.
HUANG Lei, LI Xiqin, FENG Zongming, et al. Design of trigger device for repetitive pulsed power system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 681-684.
- [10] 尹佳辉, 曾江涛, 孙凤举, 等. 低抖动快前沿高电压重复率触发器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2836-2840.
YIN Jiahui, ZENG Jiangtao, SUN Fengju, et al. Repetitive trigger generator with low jitter and fast rise time[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2836-2840.
- [11] 卢彦雷, 樊亚军, 石 磊, 等. 高电压纳秒气体开关绝缘恢复特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1852-1856.
LU Yanlei, FAN Yajun, SHI Lei, et al. Experiment research of high voltage nanosecond gas switch's insulation recovery[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1852-1856.
- [12] 贺 臣, 何孟兵, 李 劲. 高陡度场畸变开关触发系统的研制[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 43-45.
HE Chen, HE Mengbing, LI Jin. Development of trigger system with high rising rate for field distortion switch[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 43-45.
- [13] 张传胜, 李殿军, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器的脉冲激励电源[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 242-247.
ZHANG Chuansheng, LI Dianjun, YANG Guilong, et al. Pulsed exciting power supply of high-power TEA CO₂ laser[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(3): 242-247.
- [14] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 12-52.
LIANG Xidong, CHEN Changyu, ZHOU Yuanxiang. High voltage engineering[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2003: 12-52.
- [15] 刘善红, 刘轩东, 李志兵, 等. 火花放电喷射等离子体触发气体开关导通特性及工作模式分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1830-1836.
LIU Shanhong, LIU Xuandong, LI Zhibing, et al. Discharge characteristics and working modes of a gas switch ignited by spark-discharge ejected plasma[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1830-1836.
- [16] 田学敏, 田希晖, 车学科, 等. 不同气压下纳秒脉冲的放电特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 813-820.
TIAN Xuemin, TIAN Xihui, CHE Xueke, et al. Nanosecond pulse discharge characteristics under different pressure[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 813-820.
- [17] KIM S C, NAM S H, KIM S H, et al. High power density, high frequency, and high voltage pulse transformer[C]// Pulsed Power Plasma Science, 2001. Las Vegas, USA: IEEE, 2001: 808-811.
- [18] ZHANG Y, LIU J, CHENG X, et al. Output characteristics of a kind of high-voltage pulse transformer with closed magnetic core[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(4): 1019-1027.



ZHANG Xingliang

Ph.D.

Corresponding author

张兴亮(通信作者)

1986—, 男, 博士, 助理研究员

主要从事高压电容充电电源、高压脉冲电源及气体放电技术的研究

E-mail: zxliang1987@163.com

收稿日期 2017-03-30 修回日期 2017-11-12 编辑 曹昭君