

# 大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的脉冲激励电源

张传胜, 李殿军, 杨贵龙, 邵春雷, 耿玉民, 谢冀江, 李世明, 郭汝海, 李晓惕  
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了提高大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的工作性能, 选用大功率旋转火花开关作为功率开关器件, 制作了一种由高压谐振充电电路、高抗干扰的开关触发器、大功率旋转火花开关以及倒空式 L-C 反转电路等组成的脉冲激励电源。介绍了脉冲激励电源的设计方案, 给出了电路工作原理, 并对其在大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的实际工作进行了测试和评估。结果表明, 所研制的脉冲激励电源可以满足大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的特殊工作要求, 其重复工作频率可以在 100 ~ 400 Hz 任意设定, 输出工作电压可达 40 ~ 50 kV, 电源平均功率 > 220 kW, 电源峰值功率高达 1 000 MW。

**关键词:** TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 脉冲激励电源; 高压脉冲触发器; 旋转火花开关

**中图分类号:** TN248.22      **文献标识码:** A

## Pulsed exciting power supply of high-power TEA CO<sub>2</sub> laser

ZHANG Chuan-sheng, LI Dian-jun, YANG Gui-long, SHAO Chun-lei, GENG Yu-min,  
XIE Ji-jiang, LI Shi-ming, GUO Ru-hai, LI Xiao-ti

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

**Abstract:** In order to improve the work performance of a high-power TEA CO<sub>2</sub> laser, a high-power rotating spark switch is chosen as a device for power switches. Therefore a pulsed exciting power supply is developed, which is composed of a high voltage resonant charging circuit, a high anti-jamming switching trigger, a rotating spark switch and a draw-out L-C reverse circuit. The design schemes of the pulsed exciting power supply are introduced and the circuit layout is presented. The measurement and the research of the power supply are conducted in the high-power TEA CO<sub>2</sub> laser. The experimental results demonstrate that this pulsed exciting power supply developed by our lab can satisfy the special requirement of the high-power TEA CO<sub>2</sub> laser, for it can offer the output working voltage up to 40-50 kV, the average power larger than 220 kW and the peak power as high as 1 000 MW, also for its repetition rate can be adjusted arbitrarily at the ranges of 100-400 Hz,

**Key words:** TEA CO<sub>2</sub> laser; pulsed exciting power supply; high voltage pulse trigger; rotating spark switch

## 1 引言

大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器应用技术已经渗透到科学领域里的诸多学科,在国防军事、科学研究和工业加工等方面均获得广泛的应用,并取得了实质性的进展。

提高大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的输出功率、电光转换效率及长期运行的稳定可靠性是大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器发展的核心内容。

脉冲激励电源在 TEA CO<sub>2</sub>激光器中是极其关键的单元,其性能和指标决定着激光器的技术水平,是大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器发展的一个重要标志。

大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源的特点是具有较大的电源平均功率,能够提供极高的脉冲激发功率,放电时间短于放电不稳定过程的发展时间,能够提供较高的脉冲峰值电压,能够以稳定的重复频率工作,和可实现 TEA CO<sub>2</sub>激光器中主电极之间的大体积均匀辉光放电<sup>[1~8]</sup>。

本文研制了一种满足大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器特殊工作要求的脉冲激励电源系统,其输出工作电压可达 40~50 kV,电源平均功率 >220 kW,电源峰值功率达 1 000 mW。

## 2 设计方案的确定

以往 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源通常采用氢闸流管作为功率型开关器件。氢闸流管有着良好的电性能,由于管内充入了氢气,所以氢闸流管的去游离时间较短,工作频率可达几百到几千赫兹,而且氢闸流管在导通时电压降不大、阳极损耗较小、工作寿命较长,可达 10<sup>9</sup>次开关工作。氢闸流管的缺点是脉冲激发功率较小、造价较高、配套电路比较复杂。在小功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器方面,氢闸流管具有得天独厚的优势。

与氢闸流管开关相比,旋转火花开关具有功率大、脉冲激发功率较高、可以耐受较强的短路冲击的特点,更适合在高电压、大电流、窄脉冲的重复频率下工作,而且不用提供预热时间且便于车载运输,应用造价较低。

本课题组对大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器进行了多年的实践研究,独创了适用于大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器,并获得了旋转火花开关的发明专利授权。大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的实际工作已经验证:旋转火花开关已经达到 10<sup>7</sup>次的工作寿命,其中的定期维护部件—电极便于更换、维护简单,可以弥补其工作寿命较短的不足。在大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源的具体应用上,旋转火花开关相对于氢闸流管具有独特的优势。

大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的脉冲激励电源选用旋转火花开关作为功率型开关器件,其脉冲放电行为由开关触发器和旋转火花开关进行控制。线路结构形式采用能适应高重复频率运转的倒空式 L-C 反转电路来实现激光器主电极之间的大体积均匀辉光放电。

## 3 脉冲激励电源的电路设计

大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源主要由高压直流电源和谐振充电电感组成的高压充电电路、高抗干扰的开关触发器、大功率旋转火花开关以及倒空式 L-C 反转电路等组成。

### 3.1 高压充电电路

由高压直流电源和谐振充电电感组成的高压充电电路由采用  $\Delta/Y$  接法的三相升压变压器、三相桥式整流器、高压滤波电容、谐振充电电感、分压电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、和高压隔离硅堆  $D_7$ 、 $D_8$  组成。为方便激光器调试,在 三相升压变压器初级侧设置了三级电压档位手动切换开关。高压充电电路原

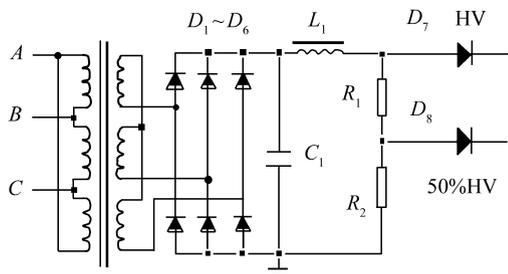


图1 高压充电电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high voltage charging circuit

理如图1所示。

高压充电电路的HV输出提供给与大功率旋转火花开关的高压电极相并联的倒空式L-C反转电路的输入端;高压充电电路的50% HV由分压电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 提供约50%的高压输出值,输出到大功率旋转火花开关的旋转电极中压输入端。

### 3.2 高抗干扰开关触发器

开关触发器采用特定的控制信号,输出适合大功率旋转火花开关工作的驱动信号,激励大功率旋转火花开关按照预定的100~400 Hz中的某一重复频率导通工作,进而控制大功率TEA CO<sub>2</sub>激光器的工作方式。

开关触发器由触发信号源、信号处理单元、功率放大单元、高压脉冲变压器等组成,其原理如图2所示。

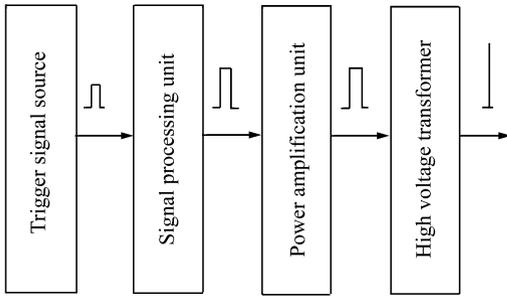


图2 开关触发器的原理框图

Fig. 2 Functional block diagram of switching trigger

触发信号源可以产生100~400 Hz内任意设定的重复脉冲。

信号处理单元接受触发信号源的控制信号,经过电压放大、脉冲形成等一系列信号处理后,得到幅值、相邻脉冲时间间隔基本一致的重复脉冲串,输出到功率放大单元。

三相交流电源通过三相隔离变压器、整流电路、滤波电路后,为功率放大单元提供直流电压源,通过设置变压器绕组中间抽头实现直流电压的调整。功率放大单元的输出用来驱动高压脉冲变压器的方波驱动信号。

高压脉冲变压器初级设置5个电压抽头,用以调整高压脉冲变压器的不同输出要求,其输出

幅值电压约为30 kV的高压尖峰脉冲。

开关触发器在大功率TEA CO<sub>2</sub>激光器及其附属设备的环境中工作,控制大功率TEA CO<sub>2</sub>激光器的工作方式,开关触发器的电磁兼容设计尤为重要。

### 3.3 旋转火花开关

大功率旋转火花开关采用三电极、双间隙结构,能够耐受高电压、抗击强大脉冲电流的烧蚀,不怕短路。大功率旋转火花开关的组成结构如图3所示。

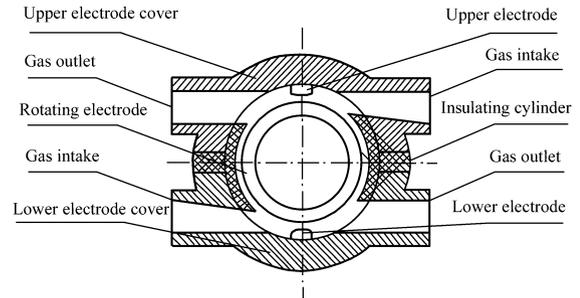


图3 大功率旋转火花开关的组成结构

Fig. 3 Compositional structure of high-power rotating spark switch

旋转火花开关通过4根绝缘拉杆固定在储能放电腔的盖板上,松脱4根绝缘拉杆的螺母,即可卸下旋转火花开关进行维护保养。

旋转火花开关的定期维护部件是固定电极对,即图3中的Upper electrode和Lower electrode,两块电极都是通过螺栓固定在旋转火花开关的电极座上,非常便于更换维修。

旋转火花开关的旋转工作是由伺服电机通过磁耦合方式来实现旋转拖动的,伺服电机功率为1 kW,转速为1 400 r/min。

大功率旋转火花开关除了对自身电压绝缘强度、电极材料、电极形貌、导通电流、气体循环流速、气体循环绝缘介质等有要求外,还对触发工作脉冲提出了很高的要求。准确适时地导通、关断可以降低旋转火花开关对其它辅助设备的要求。

### 3.4 倒空式L-C反转电路

为了获得几百纳秒宽度的高压脉冲,系统通

常采用 Max 发生器、倒空式锐化高压脉冲发生电路、L-C 谐振电路和脉冲变压器等,这些电路各有特点。

在大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的脉冲激励电源中,采用倒空式 L-C 反转电路的结构形式,来取得较窄的、重复频率工作的激励脉冲。倒空式 L-C 反转电路如图 4 所示。

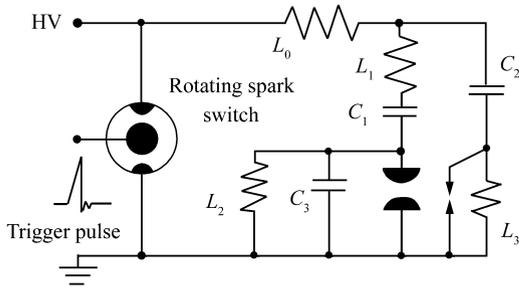


图 4 倒空式 L-C 反转电路

Fig. 4 Draw-out L-C inverter circuit

在图 4 倒空式 L-C 反转电路中,高压充电电路的 HV 输出接至旋转火花开关的高压侧电极;高压充电电路的 50% HV 与开关触发器输出的触发脉冲迭加后接至旋转火花开关的旋转电极中压输入端。其中: $L_0$ 为限流电抗器; $L_1$ 为均衡电抗器; $L_2$ 、 $L_3$ 为充电电感; $C_1$ 为主储能电容; $C_2$ 为预电离电容; $C_3$ 为锐化电容。

在倒空式 L-C 反转电路中,高压充电电路的 HV 输出通过充电电感  $L_2$ 、 $L_3$  分别为主储能电容  $C_1$  和预电离电容  $C_2$  充电。当开关触发器的触发脉冲激励旋转火花开关导通工作后,倒空式 L-C 反转电路在大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的主放电电极和预电离针间隙分别形成按一定时序工作的放电脉冲。

倒空式 L-C 反转电路的具体参数决定大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的主放电电极和预电离针间隙的放电脉冲特性,直接决定大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的光电转换效率。倒空式 L-C 反转电路是大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源的关键组成部分。合理布局倒空式 L-C 反转电路的线路结构可确保良好的高压脉冲特性。

## 4 脉冲激励电源的性能测试

本实验在大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源组合装调完成后,配合 TEA CO<sub>2</sub>激光器的储能放电腔及其附属设备进行了大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器的整机联调工作。对脉冲激励电源进行了性能测试,并利用相关的测试仪器记录了脉冲激励电源的输出波形。

大功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器脉冲激励电源的性能参数测试如下:

输出工作电压:40 ~ 50 kV;

重复工作频率:100 ~ 400 Hz;

电源平均功率: $\geq 220$  kW;

脉冲激发功率: $\geq 1\ 000$  MW。

采用的测试仪器如下:

Tektronix 公司的 TDS3052B 500 MHz 示波器。

2 支 60 kV、90 MHz 的高压探头(其中 1 支的衰减倍率为 2 000:1;另 1 支的衰减倍率为 1 000:1)。

高压充电电路接至大功率旋转火花开关高压电极处的测试波形如图 5 中所示。

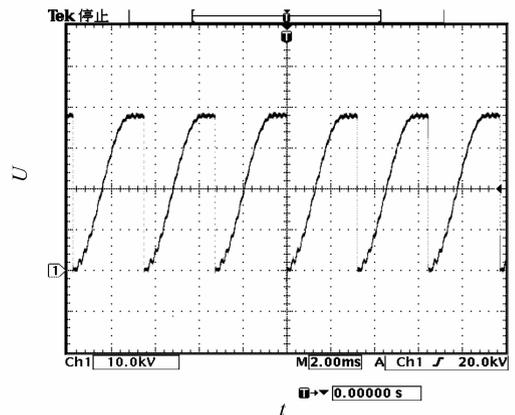


图 5 高压充电电路的测试波形

Fig. 5 Testing waveform of high voltage charging circuit

测试中使用 60 kV、90 MHz、衰减倍率为 1 000:1 的高压探头。

开关触发器输出的高压触发脉冲接至大功率旋转火花开关旋转电极处的测试波形如图6所示。

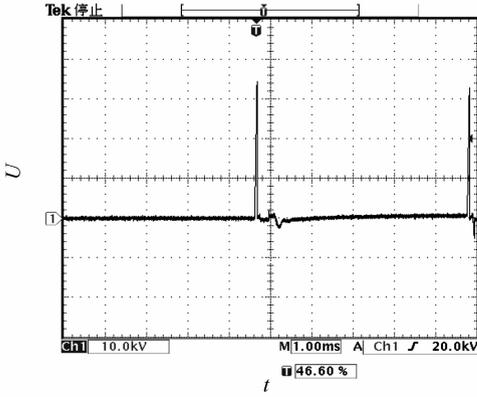


图6 旋转火花开关旋转电极处的测试波形

Fig. 6 Testing waveform of position in rotating electrode of rotating spark switch

测试中也使用 60 kV、90 MHz、衰减倍率为 1 000:1 的高压探极。

倒空式 L-C 反转电路中的主放电电极高压侧和预电离针处的测试波形如图7所示。

Ch1 为大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的主放电电极高压侧的测试波形, 测试中同样使用 60 kV、90 MHz、衰减倍率为 1 000:1 的高压探极。

Ch2 为大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的预电离针处的测试波形, 测试中使用 60 kV、90 MHz、衰减倍率为 2 000:1 的高压探极。

经过试验测试评估, 本实验研制的脉冲激励

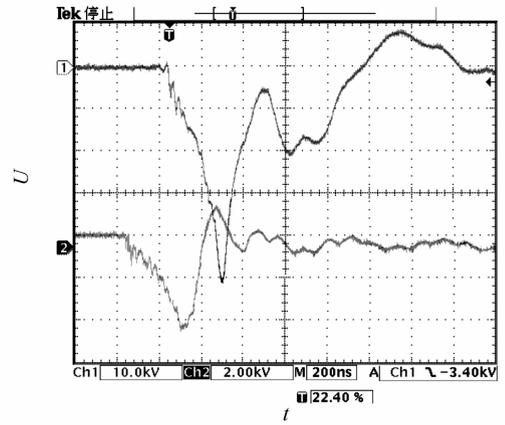


图7 倒空式 L-C 反转电路的测试波形

Fig. 7 Testing waveform of draw-out L-C inverter circuit

电源可以满足大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的工作要求。

## 5 结 论

本实验充分利用了大功率旋转火花开关脉冲激发功率高, 可以耐受较强短路冲击的特点, 在大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器上进行了大量的实验和探索, 设计并制作了大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的脉冲激励电源。该电源可以提供较大的脉冲激发功率, 适合大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器需求的特殊高压脉冲, 尤其适用于需要大功率脉冲激励的设备, 大功率旋转火花开关的优越性在此可以得到更完美的体现。

## 参考文献:

- [1] DAUGHERTY J. CO<sub>2</sub> TEA lasers[J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 1972, 8(6):594.
- [2] MARCUS S. Excitation of a long-pulse CO<sub>2</sub> laser with a short-pulse longitudinal electron beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 21:18-19.
- [3] MYRABO L N. Brief history of the light craft technology demonstrator(LTD) project[C]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664: 49-60.
- [4] BOHN W L, SCHALL W O. Laser propulsion activities in Germany[C]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664:79-94.
- [5] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW-class repetitive pulsed CO<sub>2</sub> laser[J]. *SPIE*, 2003, 5120:717-730.
- [6] 李殿军, 杨贵龙. TEA CO<sub>2</sub> 激光器主放电延迟时间对效率的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5):807-810.  
LI D J, YANG G L. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO<sub>2</sub> laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):807-810. (in Chinese)
- [7] 孙宇, 曲彦臣, 赵卫疆, 等. 小型化高能输出 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的实验研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(9):835-840.

SUN Y, QU Y CH, ZHAO W J, *et al.*. Research of miniature TEA CO<sub>2</sub> laser with high-level output[J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(9):835-840. (in Chinese)

[8] 卢宏,程祖海,左都罗,等.高单脉冲能量重复频率 TEA CO<sub>2</sub>激光器[J].中国激光,2008,35(s1):57-60.

LU H, CHENG Z H, ZUO D L, *et al.*. TEA CO<sub>2</sub> laser with high single pulse energy and repetition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(s1):57-60. (in Chinese)

作者简介:张传胜(1966—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,主要从事脉冲激光器技术、脉冲功率电源等方面的研究。

E-mail:zhangchuansheng20031201@sina.com

---

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中国最早创办的液晶学科专业期刊
- 中国惟一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊
- 中文核心期刊,影响因子为1.156

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价30.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路3888号

国内统一刊号:CN 22-1259/O4

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn

网址:www.yejingyuxianshi.org