

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0074-04

高功率脉冲 CO₂ 激光器的关键技术

左都罗, 卢 宏, 谢明杰, 程祖海

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 电激励的高功率脉冲 CO₂ 激光器是激光推进等新兴应用的优选激光器之一。现有激光器的功率、光束质量等性能还不能满足这些应用的需求。这些性能的提高取决于高功率高压电容充电、高气压大体积均匀放电、高气压高速均匀流场和激光谐振腔等关键技术的进步。采用串联谐振开关电源技术实现了高功率高压电容充电, 单模块充电电流 807 mA, 充电电压 50 kV 的实验结果证实了这种方法的有效性; 并且探索了电感隔离 Marx 高压脉冲发生器在高气压下大横截面积均匀放电中应用的可能性, 采用该方法, 将无氦工作气体的稳定工作气压由 2×10^4 Pa 提升到 3×10^4 Pa, 将最大单脉冲能量由 64 J 提高到 115 J。这些关键技术的进步为高功率脉冲 CO₂ 激光器的开发奠定了基础。

关键词 激光技术; 脉冲 CO₂ 激光器; 高压电容充电; 气体放电; 激光推进

中图分类号 TN248.2+2 **文献标识码** A

Key Technologies of High Power Pulsed CO₂ Laser

ZUO Du-luo, LU Hong, XIE Ming-jie, CHENG Zu-hai

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Electrically excited high power pulsed CO₂ laser is one of the favorable lasers in novel applications such as laser propulsion. The performances of power and beam quality of the existed lasers cannot fulfill the requirements of these applications. The improvements of these performances are decided by the technologies of quick charging of high voltage capacitor, uniform discharge in high pressure large aperture zone, uniform flow of high pressure gas, and laser resonator, etc. . The technology of serial resonant switch mode power supply realizes the quick charging of high voltage capacitor with charging current of 807 mA, charging voltage of 50 kV for one unit. The inductor isolated Marx high voltage pulse generator is tested for the purpose of uniform discharge with a high pressure large aperture zone. By use of this method, the reliable working pressure of helium-free gas is increased from 2×10^4 Pa to 3×10^4 Pa, and the highest pulse energy is increased from 64 J to 115 J.

Key words laser technique; pulsed CO₂ laser; high voltage capacitor charging; gas discharge; laser propulsion

1 引 言

1997~2000 年间, Myrabo 利用白沙靶场的 10 kW PLVTS 脉冲 CO₂ 激光器, 成功地进行了一系列户外自由飞行垂直激光推进演示实验^[1]。1998 年, Myrabo 第一次户外演示实验后的一年, 德国技术物理研究所的 Bohn 等利用他们的 15 kW 脉冲 CO₂ 激光器进行了室内的垂直推进演示实验^[2,3]。2000 年秋天, Myrabo 的光船技术公司认为, 激光推进技术有可能在 5 年内, 成为微星(10~100 kg 小卫星)的最廉价发射工具^[4]。但到现在为止, 激光推进技术没有出现新的推进高度记录。没有高可靠

性、高光束质量的高功率激光器是影响激光推进技术发展的关键问题。

在激光推进的发展过程中, 有多种激光器被当作可能的光源, 如高功率连续 CO₂ 激光器, 高功率脉冲 CO₂ 激光器, 自由电子激光器, DF 激光器等。但一般认为, 脉冲 CO₂ 激光器是一种最可能用于激光推进的激光器^[2,5]。

脉冲 CO₂ 激光器的研究开始于 20 世纪 70 年代初。最近公开报道中发现的 10 kW 以上的激光器, 还包括位于俄罗斯 Troitsk 的开放流动 100 kW 激光器^[6]和位于俄罗斯 Raduzhny 的封闭循环单脉

作者简介: 左都罗(1966—), 男, 湖南双峰人, 华中科技大学激光技术国家重点实验室教授, 博士, 主要从事高功率激光及其应用方面的研究。E-mail: zuoduluo@hust.edu.cn

冲能量 2~5 kJ 重复率 1~200 Hz 激光器^[5]。

国内关于高功率(高能)脉冲 CO₂ 激光器的报道,有万重怡等的 12 kW 激光器^[7],我们的单脉冲能量百焦耳级的激光器^[8]。

但总体上我国脉冲 CO₂ 激光器和国际水平相比还有相当的差距,主要表现在关键技术的差距。脉冲 CO₂ 激光器的关键技术主要包括高压电容快速充电、高气压大体积均匀放电、高气压高速均匀流场和激光谐振腔等几个方面。在高压电容快速充电方面,国际上于 20 世纪 90 年代开始,采用具恒流源特性的开关电源作充电电源^[9],而国内的高功率脉冲 CO₂ 激光器,有些至今仍采用工频高压直流电源。在均匀放电方面,国际上电子束维持放电是高功率脉冲 CO₂ 激光器放电技术的主流,国内还没有发现采用电子束维持放电的脉冲 CO₂ 激光器的报道。

近几年,我们对脉冲 CO₂ 激光器的几项关键技

术进行了研究。本文报道了在充电电源和放电电路方面的研究结果。

2 脉冲 CO₂ 激光器电容充电电源

图 1 给出了采用的全桥结构串联谐振模式开关电源主电路的原理图。380 V 三相交流电经 $D_1 \sim D_6$ 组成的全桥整流电路整流、电容 C_1 滤波,在 C_1 上获得 540 V 左右的直流高压。IGBT $Q_1 \sim Q_4$ (EUPEC FF200R12KS4),谐振元件 C_2, L_1 组成全桥结构串联谐振回路。 $Q_1 \sim Q_4$ 的门极 $G_1 \sim G_4$ 由控制电路控制。控制电路控制 Q_1, Q_3 和 Q_2, Q_4 的交替开关,在谐振回路中形成高频振荡。这一高频交变电流经高频变压器 T_1 升压和高频硅堆 B_1, \dots, B_n 组成的整流桥整流后,在 -HV 端子上获得高压直流输出。

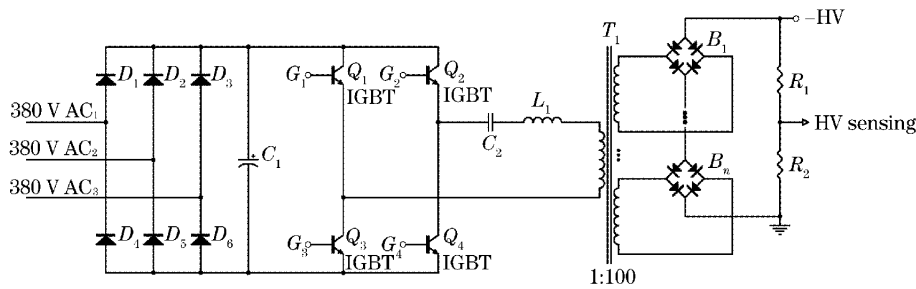


图 1 全桥结构串联谐振模式开关电源主电路原理图

Fig. 1 Schematic of the main circuit of the full-bridge serial resonant switch mode power supply

在对电容充电时, $G_1 \sim G_4$ 上的控制信号的宽度正好等于谐振周期的一半,这时可以在谐振回路中观测到完整的谐振电流波形。通过适当设置控制电路,可以使谐振回路工作在非连续导电模式,即开关的开通时间设定在前一对开关开通引发的振荡电流完全消失之后。这时开关电源具有恒流源的输出特性,是一种理想的电容充电电源。

电容上的电压达到设定要求后,IGBT 的门极控制信号终止。由于电容漏电使得电压略低于设定电压时,IGBT 的门极交替出现窄脉宽控制信号(约 2 μ s,根据电容漏电速率设定),电容上可获得小电荷量的脉动式电荷补偿。电容的充电电压精度决定于这一小电荷量脉动式电荷补偿。

为保证充电电源的安全,在电容放电时,IGBT 的门极控制信号暂停一段时间(约几百微秒)。充电电源重新开始对电容充电时,放电已经完结。

图 2 是电流变压器在高压电容充电电源实验装置上测得的 C_2, L_1 谐振回路的电流波形。其时间

零点为电容放电时刻,可以清楚地看出暂停、充电及维持三种过程。

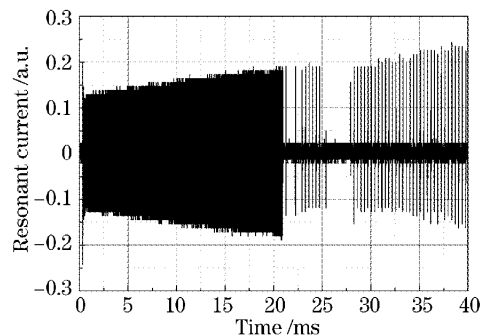


图 2 电流变压器测得的谐振回路电流波形

Fig. 2 Current waveforms of the resonant circuit measured by a current transformer

相对于原先的工频变压直流电源,高压电容充电电源在电压调整精度、电源效率、电源比功率等性能指标方面均有重大提高。理论上,由于 380 V 交

流三相全波整流后可达到 540 V, 高压变压器变比为 1:100, 该电源对电容充电时最高电压可达到近 54 kV。利用 Tektronix 公司的 P6015A 高压探头对图 1 的自制高压传感器 HV Sensing 输出端子进行了标定, 电源工作时的电压值由传感器的数据给出。充电电压的最高值目前考核至 50 kV。图 3 是该款电源连接 1.5 μF 电容负载时的电压变化曲线。在 0 点时刻, 电容电压由 -40 kV 快速回落至零点, 这对应于电容放电过程, 随后电容电压直线上升(注意激光器采用了负高压), 表明高压电容充电电源具有恒流源的特性。电压上升率为 538 V/ms, 对应的充电电流为 807 mA。充电电源的输出功率 P 可计算为

$$P = V_{\max} I_{\text{charge}} / 2,$$

其中 V_{\max} , I_{charge} 分别是电容的充电电压和电源的充电电流。因此, 充电电压 40 kV 时, 满负荷功率可达到 16 kW, 充电电压 50 kV 时, 满负荷功率可达 20 kW。

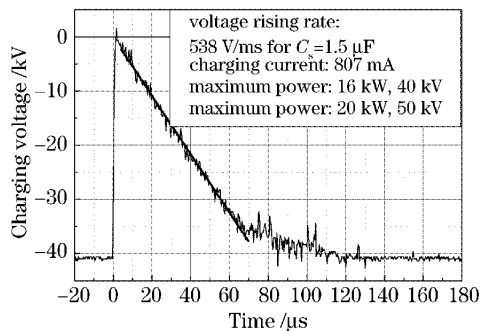


图 3 带电容负载 1.5 μF 时高压电容充电电源的充电波形

Fig. 3 Charging waveform when the high voltage capacitor charging power supply is linked to a 1.5 μF capacitance load

3 脉冲 CO_2 激光器的放电电路

图 4 为电感隔离的 Marx 高压脉冲发生器放电电路, 其中储能电容 C_{s11} , C_{s12} , C_{s21} , C_{s22} 均为 0.75 μF 。Kalinin 等在他们的单脉冲能量 1 kJ, 重复率 30 Hz 的爆发模式工作的脉冲 CO_2 激光器方案中提出了类似的电感隔离 Marx 高压脉冲发生器放电电路^[10]。相对于传统的电阻隔离方式, 电感隔离有利于高重复率运行。

图 5 给出了 TEA50 激光器在简单电容放电电路和 Marx 高压脉冲发生器电路(图 4)驱动下的输

出特性曲线。其中脉冲能量采用北京光电技术研究所的 M2000B 能量计测量。在激光能量低于 50 J 时, 与加拿大 Gentec 公司的 ED-500LIR+ 能量探头和 M2000B 进行了比对, 测量结果基本一致。

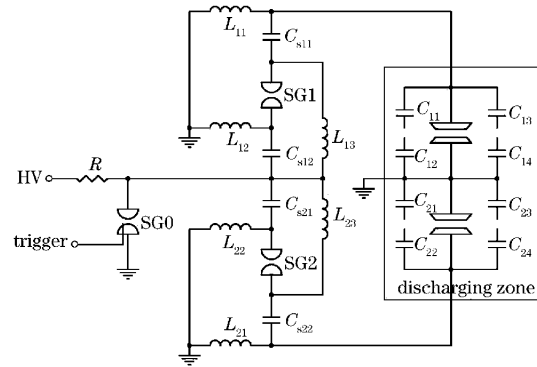


图 4 Marx 高压脉冲发生器放电电路
Fig. 4 Marx high voltage pulse generator discharging circuit

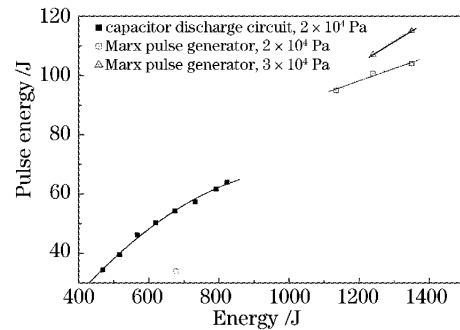


图 5 采用简单电容放电电路和 Marx 高压脉冲发生器放电电路的 TEA50 激光器的输出特性曲线
Fig. 5 Output characteristics of TEA50 laser with a simple capacitor discharging circuit or a two-stage Marx high voltage pulse generator discharging circuit

从图 5 可以看到, 在其他条件不变的情况下, 仅将简单电容放电电路更换为 Marx 高压脉冲发生器放电电路, 最大注入能量由原来的 820 J 提高到了 1350 J, 最大输出能量由原来的 64 J 提高到了 115 J, 并且工作气体气压也由原来的 2×10^4 Pa 提高到 3×10^4 Pa。工作气压的提高, 得益于 Marx 高压脉冲发生器的并联充电、串联放电工作方式。采用同样的储能电容时, 预电离电容值与储能电容值相对值较简单电容放电电路提高 1 倍, 因此预电离火花放电发射的紫外光子数也将得到相应的提高。预电离得到加强后, 使得可稳定放电的工作气体气压得到提高。

参 考 文 献

- 1 L. N. Myrabo. Brief History of the Lightcraft Technology Demonstrator (LTD) Project [R]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, **664**: 49~60
- 2 W. L. Bohn, W. O. Schall. Laser Propulsion Activities in Germany [R]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, **664**: 79~94
- 3 <http://www.mech.titech.ac.jp/~ryuutai/ISBEP4.html>
- 4 <http://www.lightcrafttechnologies.com/newsletter.html>
- 5 V. D. Bulaev, V. S. Gusev, I. P. Zhigan *et al.*. The Experimental Laser Facility Based on the High-Power Repetitively-Pulsed E-Beam-Sustained CO₂ Laser [R]. *AIP Conf. Proc.*, 2005, **766**: 361~372
- 6 A. V. Rodin, V. G. Naumov, A. F. Nastoyashchii *et al.*. High-energy pulse-repetitive CO₂ laser for lightcraft experiments [R]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, **664**: 612~619
- 7 C. Wan, Y. Yu, Y. Lü *et al.*. Rotating Spark Gap Switched Discharge TEA CO₂ Laser with Average Power up to 12 kW [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 426~432
- 8 D. Zuo, H. Lu, Z. Cheng. Studies on a 100-Joule-Class UV-preionized TEA CO₂ Laser [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 442~445
- 9 M. Jung, W. Mayerhofer, G. Renz *et al.*. High Power CO₂-Laser at 100 Hz Rep-rate [R]. 22nd International Power Modulator Symposium, IEEE, 1996. 243~246
- 10 V. P. Kalinin, D. A. Goryachkin, V. M. Gromovenko *et al.*. Feasible configurations of repetitively-pulsed TEA CO₂ laser with small angular divergence and 1 kJ-pulse energy [C]. *SPIE*, 1998, **3574**: 187~202