

文章编号:1001-5078(2011)07-0770-04

· 激光器技术 ·

## 平均功率 3.3 kW 高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

文 康<sup>1,2</sup>, 谭荣清<sup>1</sup>, 张阔海<sup>1</sup>, 刘世明<sup>1</sup>, 朱玉峰<sup>1,2</sup>, 徐 程<sup>1,2</sup>, 王东蕾<sup>1</sup>, 卢远添<sup>1</sup>, 赵志龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**研制了一台平均功率 3.3 kW 横向激励大气压 (TEA) CO<sub>2</sub> 激光器。激光器采用单节放电体积为 5 cm × 4 cm × 90 cm 的两节腔体串连的形式, 印刷板电路预电离结构和闸流管开关放电电路, 实现了激光器单脉冲能量输出, 高重复频率工作。在重复频率 150 Hz 条件下, 获得了 3.3 kW 平均输出功率。获得 32.8 J 单脉冲输出能量, 电光转换效率达到 15.4%。

**关键词:**TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 印刷板电路预电离; 高平均功率; 高重复频率

**中图分类号:**TN248.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.013

## High repetition TEA CO<sub>2</sub> laser with average output power of 3.3 kW

WEN Kang<sup>1,2</sup>, TAN Rong-qing<sup>1</sup>, ZHANG Kuo-hai<sup>1</sup>, LIU Shi-ming<sup>1</sup>, ZHU Yu-feng<sup>1,2</sup>, XU Cheng<sup>1,2</sup>

WANG Dong-lei<sup>1</sup>, LU Yuan-tian<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-long<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A high average power TEA CO<sub>2</sub> laser has been developed. Average output power of 3.3 kW is achieved at a repetition of 150 Hz. The TEA CO<sub>2</sub> laser consists of two same laser modules, each of which has a 5 cm × 4 cm × 90 cm discharge volume. Several special technologies including Printed Circuit Board (PCB) pre-ionization and thyatron switch discharging circuit are employed. The laser realized large energy output, high repetition operating and high average power output. Laser output pulse energy is measured. The relationship between laser pulse energy and voltage at different gas pressures is obtained. The maximum of output pulse energy is 32.8 J. Electro-optical efficiency is calculated and the maximum of electro-optical efficiency is 15.4%. The laser pulse waveforms are measured at different gas pressures.

**Key words:** TEA CO<sub>2</sub> lasers; printed circuit board preionization; high average power; high repetition rate

### 1 引言

高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器具有高输出平均功率和高脉冲峰值功率、波长在大气透射窗口内、制作维护成本低等特点, 在激光加工<sup>[1]</sup>、激光化学<sup>[2]</sup>、激光雷达<sup>[3]</sup>、激光推进<sup>[4]</sup>、可控核聚变<sup>[5]</sup>等众多领域有着十分广泛的应用前景。因此, 发展高功率高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器具有非常重要的意义。

本文采用印刷电路板预电离<sup>[6]</sup>, 利用分布式电容耦合的预电离结构, 在主放电阴极附近产生较强的紫外光预电离, 使预电离均匀性和预电离强度得

到良好的结合; 采用光桥结构便于调节激光输出, 有利于激光输出的稳定性<sup>[7]</sup>; 采用闸流管开关控制高压充放电过程。本文报道了一台高平均功率高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 研究了激光器的性能参数, 在工作气压 36 kV, 电压 34 kV 条件下成功获得 32.8 J 单脉冲能量输出, 在重复频率 150 Hz 条件下获得 3.3 kW 平均功率输出。

**基金项目:**中国科学院知识创新领域前沿项目 (No. D5090-03) 资助。

**作者简介:**文 康 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率气体激光器方面的研究。E-mail: wenkang83@163.com

**收稿日期:**2011-03-18

## 2 激光器设计

激光器主体由两节直径为 0.9 m 的相同腔体组成,每节腔体包括一对由线性扩展的 Ernst 曲面电极阳极和经验电极阴极构成的主放电电极<sup>[8]</sup>、印刷电路板预电离、切向风机、热交换器等,两节腔体由波纹管 and 光桥连接。

印刷电路板预电离器结构采用双面覆铜的印刷电路板作为分布式电容耦合器阵列,实现在阴极两侧产生均匀的预电离放电,如图 1 所示。当高压脉冲加于主放电电极上时,首先在阴极和印刷电路板预电离器间发生预电离放电,然后在主放电电极间产生均匀放电。印刷电路板预电离端部由镍片阵列组成。激光器主放电电极间距为 5 cm,有效放电宽度和增益长度分别为 4 cm 和 180 cm,有效放电体积为 3.6 L。

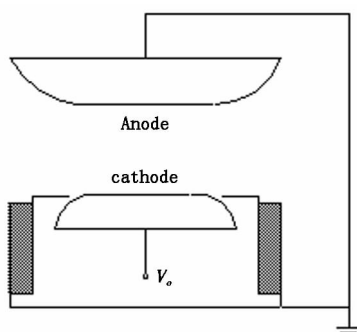


图 1 阴极两侧印刷电路板预电离示意图

激光器放电电路是由两个完全相同的放电电路组成,并分别激励两个主放电电极,如图 2 所示,整个放电过程如下:首先直流高压电源通过限流电阻  $R_1$  ( $50 \Omega$ ) 对储能电容  $C_s$  ( $0.2 \mu\text{F}$ ) 充电至工作电压;之后闸流管导通,储能电容  $C_s$  上的高压加在主电极对和预电离支路上,使主电极对上的电压快速上升;由于预电离气隙很小首先击穿产生火花放电;预电离放电产生的电弧电流对此分布式电容耦合器  $C_p$  充电,此过程中放电火花阵列产生的紫外光辐射使主放电空间形成初始电子分布,当电子分布达到一定浓度后,主放电区导通,形成辉光放电;预电离电容与激光器储能电容对主放电空间工作气体放电完成整个脉冲激励过程。

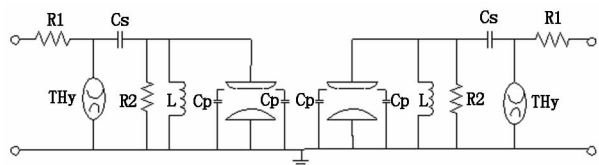


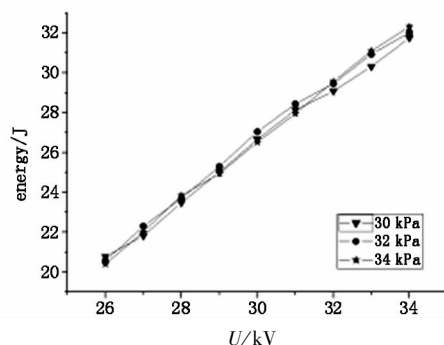
图 2 激光器放电电路结构示意图

激光器的光学谐振腔为平凹稳定腔,输出镜为曲率半径为 20 m 的 ZnSe 凹面镜,另一端为镀金的铜全反射镜。输出端的耦合透过率为 50%,谐振腔总长度为 2.8 m。激光器输出光束经楔形 NaCl 分束器分束后,单脉冲能量由激光能量计测量,输出功率由水冷却功率计测量,激光脉冲波形由光子牵引探测器和数字存储示波器测量。

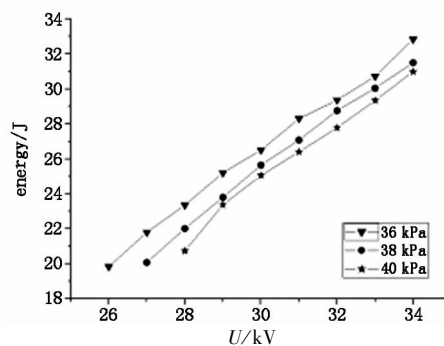
## 3 实验结果与分析

对激光器的一些性能参数进行了测量,包括单脉冲能量、激光器电光转换效率、单脉冲光斑形状和脉冲波形。

实验中采用  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$  的激光混合气体。研究了不同气压下激光单脉冲能量,分别测量了 30 kPa,32 kPa,34 kPa,36 kPa,38 kPa,40 kPa 六组气压条件下激光单脉冲能量,如图 3 所示。



(a) 气压分别为 30 kPa,32 kPa,34 kPa



(b) 气压分别为 36 kPa,38 kPa,40 kPa

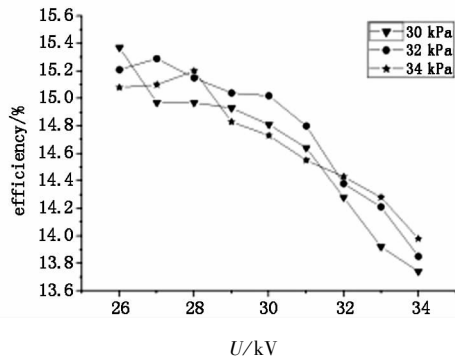
图 3 不同气压条件下,激光脉冲能量曲线

从图 3 中可以看出,在同一气压条件下,激光脉冲能量均随电压的增高近似线性增加;在同一电压条件下,激光脉冲能量在 30 ~ 36 kPa 气压区间随气压的增高而增大。在气压 36 kPa,电压 34 kV 条件下获得最高激光脉冲能量 32.84 J。

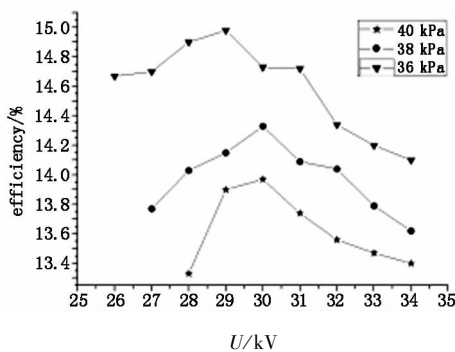
从图 3 中可以看出,不同气压条件下,激光器正常放电的工作区间下限不同:30 ~ 36 kPa 气压条件下,26 ~ 34 kV 电压条件下放电正常;38 kPa 气压条

件下,27~34 kV 电压条件下放电正常;40 kPa 气压条件下,28~34 kV 电压条件下放电正常。

计算得出不同气压条件下的电光转换效率,如图4所示,激光器的电光转换效率是激光器的重要参数之一,可通过计算输出能量与注入能量的比值得出。



(a) 气压分别为 30 kPa, 32 kPa, 34 kPa

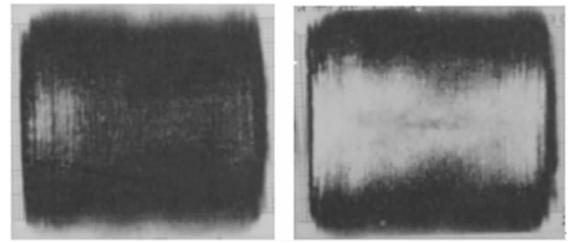


(b) 气压分别为 36 kPa, 38 kPa, 40 kPa

图4 不同气压条件下,激光电光转换效率

从图4可以看出,激光器的电光转换效率在13.4%~15.4%区间内;不同工作气压下,电光转换效率最大值对应的电压不同,且电光转换效率最大值对应的电压随着气压的升高而增大:在30 kPa时,在电压26 kV处得到最大电光转换效率15.37%;在32 kPa时,在电压27 kV处得到最大电光转换效率15.29%;在34 kPa时,在电压28 kV处得到最大电光转换效率15.20%;在36 kPa时,在电压29 kV处得到最大电光转换效率14.98%;在38 kPa时,在电压30 kV处得到最大电光转换效率14.33%;在40 kPa时,在电压30 kV处得到最大电光转换效率13.97%。

记录了激光单脉冲光斑,图5为单脉冲激光直接打在热敏纸上的记录。从图中可以看出,单脉冲激光输出光强比较均匀,光斑形状近似为长方形,光斑尺寸为50 mm×45 mm。



(a) 在气压 30 kPa, 电压 27 kV 条件下

(b) 在气压 34 kPa, 电压 33 kV 条件下

图5 单脉冲激光光斑

测量了激光脉冲波形,图6是在工作气压38 kPa,工作电压32 kV下测得的激光脉冲波形,这是这种激光器输出的典型脉冲波形,其脉冲宽度(FWHM)约为200 ns,加上脉冲拖尾在内的脉冲全宽度约为5 μs,此时激光输出脉冲能量为30.04 J,初始尖峰脉冲能量占脉冲总能量的约15%,峰值功率约为20 MW,脉冲功率约为6 MW。

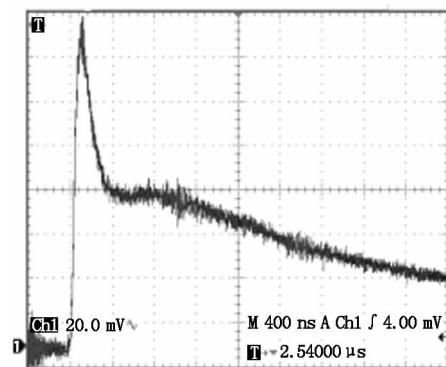


图6 32 kV, 38 kPa 条件下激光脉冲波形图

在激光单脉冲工作状态良好的前提下,进行了重复频率出光实验,在进行高重复频率实验时,需要快速更新主放电电极间的工作气体,切向风机很好的解决了这一问题,切向风机在放电区产生30 m/s的均匀的气流速度,在激光器在频率为150 Hz条件下,可以保证放电区的清洗系数大于3,确保了主放电电极之间始终保持稳定均匀的工作气体。实验中激光器的平均输出功率随脉冲重复频率增大而增大。在工作气压38 kPa,电源电压28 kV,重复频率150 Hz条件下,获得平均功率3.3 kW激光输出。

#### 4 结论

利用印刷电路板预电离技术和闸流管开关放电电路,在3.6 L的放电体积内,实现了稳定的辉光放电,获得了最大输出脉冲能量32.8 J,此时电光转换效率为14.20%,实验中电光转换效率最高达到15.4%,在重复频率150 Hz条件下获得平均功率

3.3 kW 激光输出。为进一步提高激光器的平均输出功率,在今后的工作中,可考虑采用管状同轴预电离结构<sup>[9]</sup>以改善预电离效果并适当提高风机转速以进一步提高激光器工作频率。

#### 参考文献:

- [1] Chatwin C R, McDonald D W, Scott B F. Design of a high R. R. F. carbon dioxide laser for processing high damage threshold materials [C]. Proceedings of SPIE, 1989, 1042:32 - 40.
- [2] Brown R T. Mini-TEA 1000-Hz CO<sub>2</sub> laser [J]. Applied Optics, 1984, 23(15):2485 - 2487.
- [3] A I Karapuzikov, A N Malov, I V Shertov. Tunable TEA CO<sub>2</sub> laser for long-range DIAL lidar [J]. Infrared Phys. & Technol., 2000, 41(2):77 - 85.
- [4] Zheng Yijun, Tan Rongqing, Ke Changjun, et al. Effect of pulse waveform on momentum coupling coefficient [J]. Chinese J. Lasers, 2006, 33(11):1472 - 1476. (in Chinese)  
郑义军, 谭荣清, 柯常军, 等. 脉冲波形对冲量耦合系数的影响 [J]. 中国激光, 2006, 33(11):1472 - 1476.
- [5] Yamanaka C. Super high-power laser systems and their application [J]. Optical and Quantum Electronics, 2000, 32(3):263 - 297.
- [6] Cheng Liang, Wan Chong Yi, Zhou Jin Wen, et al. A mini TEA CO<sub>2</sub> laser using printed circuit board preionization [J]. Chinese J. Lasers, 2002, A29(1):7 - 9. (in Chinese)  
程亮, 万重怡, 周锦文, 等. 印刷电路板预电离小型 TEA CO<sub>2</sub> 激光器 [J]. 中国激光, 2002, 29(1):7 - 9.
- [7] Zeng Yuan, Tan Rongqing, Chen Jing. Research on stability of tunable TEA CO<sub>2</sub> laser resonator [J]. Infrared & Laser, 2009, 39(9):928 - 930. (in Chinese)  
曾元, 谭荣清, 陈静. 可调谐 TEA CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔结构稳定性研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9):928 - 930.
- [8] Lü Yan, Wan Chong Yi, et al. Field uniformity analysis of an ernst electrode system [J]. Optoelectronics · Laser, 2005, 16(3):302 - 306. (in Chinese)  
吕岩, 万重怡. Ernst 电极系统电场均匀性分析 [J]. 光电子 · 激光, 2005, 16(3):302 - 306.
- [9] Ji Hong Xu, Tan Rong Qing, Liu Shi Ming, et al. Grating line selectable TEA CO<sub>2</sub> laser with tubulous preionizer [J]. Chinese J. Lasers, 2010, A37(9):2389 - 2394. (in Chinese)  
吉洪煦, 谭荣清, 刘世明, 等. 基于管状预电离的光栅选线 TEA CO<sub>2</sub> 激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37(9):2389 - 2394.