

## 紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的实验研究

曹建建<sup>1,2</sup>, 梁思远<sup>1,2</sup>, 李殿军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了采用火花针紫外预电离高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器系统的结构及其实验研究结果。该激光器的脉冲放电行为由旋转火花开关和高压脉冲触发器进行控制, 并通过自动翻转电路实现对称张氏电极之间的均匀辉光放电。通过改变激光器工作气体气压、充气配比及注入能量, 测量单脉冲输出能量。实验结果表明, 激光器的输出能量及电光转换效率随 CO<sub>2</sub> 或 N<sub>2</sub> 充气压改变存在最佳点, 最佳点与注入能量有关。输出能量及电光转换效率与总充气压呈线性关系。该激光器在单脉冲放电条件下比在高重复频率时能够注入更多的能量和充入更高的气压, 脉冲能量最大输出可达 53J 以上, 经过进一步地参数优化, 该激光器最高的电光转换效率达到 17% 以上。

**关键词:** TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 紫外预电离; 工作气体气压和充气配比; 转换效率

**中图分类号:** TN248.2<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## Experimental Research on UV-preionized TEA CO<sub>2</sub> Laser

CAO Jian-jian<sup>1,2</sup>, LIANG Si-yuan<sup>1,2</sup>, LI Dian-jun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

**Abstract:** Results and configuration of a high-repetition-rate pulsed-discharge TEA CO<sub>2</sub> laser with spark-pins ultraviolet preionization are described. The uniform glow discharges between two symmetrical Chang electrodes through an auto-preionization electrocircuit are controlled by a high-voltage pulsed trigger and a rotary spark-gap switch. The experimental dependence of single pulse output of laser emission as functions of pressure and proportion of gas mixture and of injected energy. The results indicate that the single pulse output and opto-electric conversion efficiency has an optimal point with the pressure of CO<sub>2</sub> or pressure of N<sub>2</sub> and this point can be changed with injected energy. The single pulse output and opto-electric keeps a linear relation with the gas pressure. In the situation of the single pulse mode, the laser can inject much energy and fill up high gas pressure comparing the repetition pulsed-discharge mode, simultaneously, the maximum pulsed output energy of 53J is obtained. The highest conversion efficiency reaches 17% after further parameters optimization.

**Key words:** TEA CO<sub>2</sub> laser; UV-preionized; pressure and proportion of gas mixture; efficiency

### 1 引言

高功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器在很多领域内具有广泛的应用。近年来, 特别是在激光空间探测与激光推进<sup>[1-4]</sup> 领域中的理论和实践需要, 对于 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的深入研究提出了更高的要求, 如 2000 年, Leik N. Myrabol<sup>[5]</sup> 利用脉冲能量为 1kJ、重复频率 10Hz、脉宽 30 $\mu$ s 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 成功地将飞行

器发射到 71m 高度, 这是迄今为止飞行时间最长、发射高度最高及飞船最重的实验记录, 限制这一记录提高的主要因素是缺乏更大功率的激光器, 由此促使 TEA CO<sub>2</sub> 激光器在输出功率、输出能量、稳定

作者简介: 曹建建(1983 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: jianjia6573@sina.com  
收稿日期: 2007-08-27

性、运转寿命以及光束质量等技术指标上的进一步提高。激光器的工作性能与工作气体状态、预电离和放电电路等要素密切相关<sup>[6-12]</sup>, TEA CO<sub>2</sub> 激光器的基本区别之一就是预电离方式的不同, 本文重点介绍火花针放电紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器及其正常工作时充气气压、充气配比对效率的影响的实验研究结果。

## 2 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

本文介绍的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器由光学谐振腔、储能放电腔、旋转开关系统、气体循环冷却系统以及计算机控制系统组成。光学谐振腔采用常规的平凹稳定腔结构, 优点是工作稳定可靠。平凹稳定腔的全反射镜采用无氧铜镀金反射膜, 曲率半径为  $R = 18\text{m}$ 。输出镜采用 ZnSe 材料半反射膜, 透过率  $T = 70\%$ 。这种结构形式的谐振腔输出的激光光束为混合型高斯模式。储能腔放电回路由储能电容、谐振充电电路、放电回路以及激光放电电极构成, 是整个激光器的核心部分。激光器注入能量的大小, 由储能电容的容量和充电电压决定。谐振充电电路的谐振系数为  $1.6 \sim 1.8$ 。放电回路采用了 L-C 自动翻转电路形式, 即在包括预电离火花针和主放电电极构成的放电回路内, 旋转火花开关一次触发放电就可以完成从预电离到主放电的整个过程, 电路原理如图 1 所示, 整个放电电路主要由延时电感  $L_1$ 、充电电感  $L_2$  和  $L_3$ 、主放电电容  $C_1$ 、预电离电容  $C_2$ 、锐化电容  $C_3$ 、主放电电极、预电离火花针、旋转开关和高压触发器组成。采用火花针放电紫外预电离形式对工作气体进行预电离, 该方式具有技术结构简单、制造成本低、运转费用少、体积相对较小等优点, 预电离电极由 80 对侧面放置的火花放电针组成, 主电极由一对对称放置的改进型张氏电极组成, 使用不锈钢材料制成。电极长度为  $1.2\text{m}$ , 宽  $50\text{mm}$ , 电极间距为  $40\text{mm}$ 。旋转开关系统包括火花开关、气体循环风机以及高压脉冲触发器等, 构成了整个激光器脉冲放电控制的执行器件。激光器运转时要求在开关打开的瞬间内导通极大的电功率, 并且要求迅速地彻底关断。为了防止连弧放电, 气体需快速交换冷却, 气体循环风机是激光器的辅助部分, 最大风速达  $120\text{m/s}$ , 其任务是快速带走放电后的高温等离子体及其产生的热量。气体循环冷却系统由两台大功率轴流风机实现, 最大风速为  $80\text{m/s}$ , 给出  $3 \sim 5$  倍的清洗系数。气体循环系统的流道设计非常重要, 要求经过流道进入放电区的气流均匀稳定, 否则, 气体密度分布不均匀产生的扰动将直接导致放

电弧光的产生。经测试, 本系统的风速不均匀性在整个放电区内小于  $10\%$ 。激光器工作时产生的热量通过两组散热器进行散热, 在高重复频率工作条件下, 整个气体的温升在  $2^\circ\text{C}$  左右范围内。计算机控制系统组成了整个激光器的控制系统。该系统通过各种执行元器件不仅实时地监测激光器所有分系统的工作状态, 同步地显示激光器的工作温度、气体压力、电压波形等参数, 而且可以控制和调节激光器的工作频率、充电电压、循环气体风速、开关气压等所有与工作有关的参数。

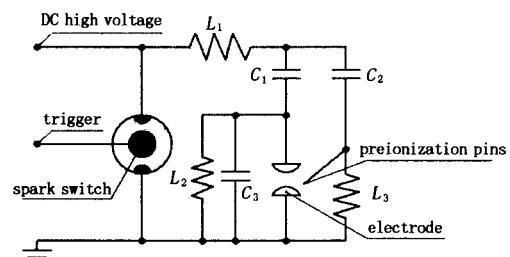


图 1 TEA CO<sub>2</sub> 激光器电路原理图

Fig. 1 TEA CO<sub>2</sub> laser electrocircuit sketch

## 3 实验过程及结果

激光器的工作介质是 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He 混合气体, 延时电感  $L_1 = 12\mu\text{H}$ , 这时放电延迟时间为  $400\text{ns}$ , 紫外预电离产生的气体阻抗更接近于实际的阻抗匹配条件<sup>[13]</sup>。对激光器输出能量与混合气体工作气压参数、注入能量的关系进行了实验研究。作为对比, 改变混合气体充气气压、充气配比及激光器注入能量, 测量并记录输出激光脉冲能量。实验采用单脉冲放电形式, 单脉冲能量直接由加拿大 Gentec 公司生产的 ED-500LIR<sup>+</sup> 探头测量。实验过程如下:

1) 初始混合气体比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 12:9.6:43.2 = 19:15:66, 总压强为  $64.8\text{kPa}$ , 在注入能量分别为  $268\text{J}$ ,  $296\text{J}$ ,  $324\text{J}$  时, 依次测量脉冲能量; 保持其他气体气压不变, 只增加 CO<sub>2</sub> 充气气压, 依次充入 CO<sub>2</sub>: +  $1.2\text{kPa}$ , +  $2.4\text{kPa}$ , +  $3.3\text{kPa}$ , 分别在上述注入能量下测量单脉冲能量, 记录数据, 得到关系曲线如图 2 所示。

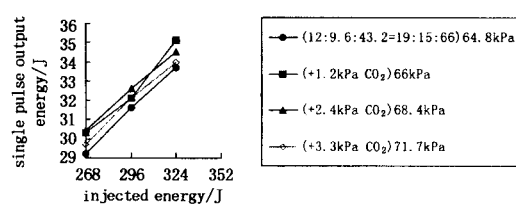


图 2 CO<sub>2</sub> 分气压、注入能量与单脉冲输出能量关系

Fig. 2 result of the single pulse output energy related to the partial pressure of CO<sub>2</sub> and injected energy

2) 初始混合气体比  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 12:9.6:43.2 = 19:15:66$ , 总压强为 64.8kPa, 在注入能量 268J, 296J, 324J, 352J 时, 依次测量脉冲能量; 只增加  $\text{N}_2$  充气压, 依次充入  $\text{N}_2: + 1.6\text{kPa}, + 3.2\text{kPa}, + 3.6\text{kPa}, + 6.0\text{kPa}$ , 分别在上述注入能量下测量单脉冲能量, 记录数据点, 得到关系曲线如图 3 所示。

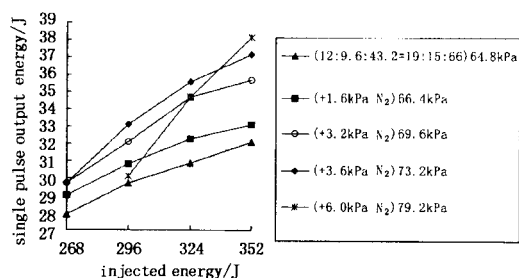


图3  $\text{N}_2$  分气压、注入能量与单脉冲输出能量关系

Fig. 3 result of the single pulse output energy related to the partial pressure of  $\text{N}_2$  and injected energy

3) 初始混合气体比  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 7:5.6:25.2 = 19:15:66$ , 总压强为 37.8kPa, 保持充气配比不变, 依次增加总充气压, 在注入能量 240J, 268J, 296J, 324J, 352J 时, 依次测量脉冲能量, 得到关系曲线如图 4 所示。

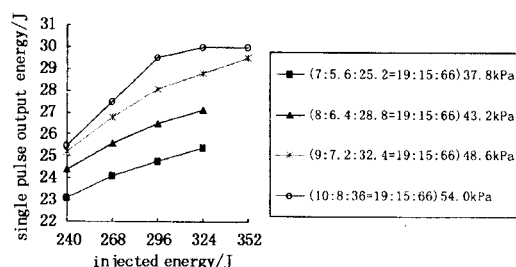


图4 总气压、注入能量与单脉冲输出能量关系

Fig. 4 result of the single pulse output energy related to the pressure of gas mixture and injected energy

由图 2、图 3 可以看出, 在保持其他参数不变的情况下, 改变  $\text{CO}_2$  或  $\text{N}_2$  的充气配比, 激光输出能量和电光转换效率均有所变化; 激光器的输出能量与注入能量呈线性关系, 注入能量越多, 输出能量就越大, 曲线未见饱和, 但是注入能量不宜过大, 否则会出现弧光放电等不稳定现象; 电光转换效率随充气配比的改变存在最佳点, 且最佳点与注入能量有关, 如图 2 所示: 当注入能量 296J 时, 最佳充气配比为  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 15.6:9.6:43.2$ ; 当注入能量 324J 时, 最佳充气配比为  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 13.2:9.6:43.2$ 。

由图 4 可以看出, 输出脉冲能量及电光转换效

率与总充气压呈线性关系。在同一注入能量下, 输出能量、转换效率随总充气压的增高线性增大, 但气压太高 (图中所示为 54.0kPa) 时, 注入能量达到某一值 (图中所示为 324J), 曲线达到饱和, 输出能量始终保持在某一值。在同一充气压下, 虽然输出脉冲能量随注入能量的增大线性增大, 但是经计算可知其电光转换效率线性减小。可以得出结论: 激光器的工作性能与注入能量、工作气体充气压及充气配比有关, 选择适当的注入能量、提高工作气体气压和改善充气配比是实现高能量、高电光转换效率的有效措施。

在放电延迟时间为 400ns 时, 对充气压、充气配比等参数进一步优化, 目前, 该激光器的电光转换效率最高可到达 17% 以上。该激光器也能够以高达数百赫兹重复频率的脉冲方式工作, 但在对于单脉冲放电以及在较低频率放电工作而言, 在更高的放电电压和更高的气体压力条件都可以实现稳定的正常辉光放电, 一个有代表性的实验结果是, 在放电电压 48kV、气体压力  $7.8 \times 10^4 \text{Pa}$  条件下, 激光器的单脉冲能量最大值达到 53J, 相当于单位增益激活介质提取能量为 20J/L。在各种条件下, 激光器输出的时间波形几乎保持一致, 其典型脉冲波形如图 5 所示。激光器输出的近场光斑参如图 6 所示。图 6(a) 是一个照射在热敏纸上的  $40\text{mm} \times 50\text{mm}$  的长方形单个脉冲光斑照片, 激光能量 38J; 图 6(b) 是一个照射在耐火砖上  $40\text{mm} \times 50\text{mm}$  的长方形重复脉冲光斑照片, 平均功率激光 8kW, 照射时间 4s。

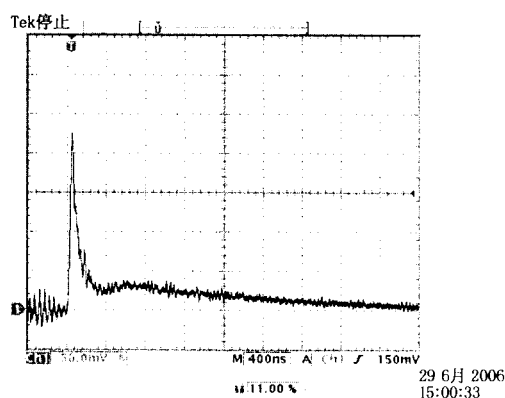
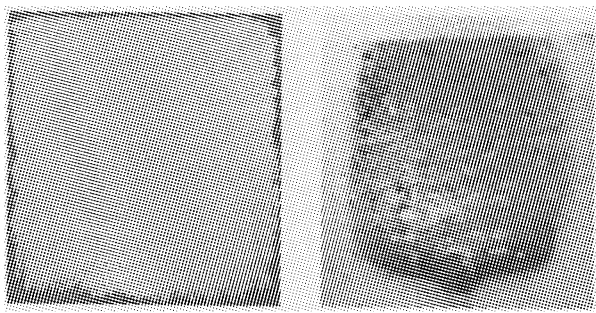


图5 典型激光脉冲波形图

Fig. 5 output pulse shape



(a) 单个脉冲照射热敏纸 (b) 重复脉冲照射耐火砖  
(a) single pulse on thermosensitive paper (b) repetitive pulses on firebrick

图6 激光近场光斑

Fig.6 near field laser spot

### 参考文献:

- [1] L N Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator(LTD) project[C]//AIP Conf. Proc.,2003, 664:79-60.
- [2] W L Bohn, W O Schall. Laser propulsion activities in Germany[C]//AIP Conf. Proc.,2003,664:49-94.
- [3] V Hasson. Review of design concepts and diagnostics for 100kW-class repetitive pulsed CO<sub>2</sub> laser [C]//SPIE, 2003,5120:717-730.
- [4] 翟冰洁,左都罗,程祖海,等. 空气呼吸模式激光推进实验研究[J]. 光学与光电技术,2005,3(1):14-17.
- [5] Leik N Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]//Andrew V Pakhomov ed. Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, published in AIP Conference Series,2003,49-60.
- [6] 张莉莉,任德明,胡孝勇,等. 一种新型 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的实验研究[J]. 光学技术,2006,32(1):131-133.
- [7] 吴谨,王东蕾,唐永新,等. 顺序放电高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器[J]. 中国激光,2005,32(1):1-4.
- [8] 李小芬,左都罗,程祖海,等. 紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器放电特性的实验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(6):697-700.
- [9] Singal V P, Vijayan R, Narayan B S, et al. A highly efficient electron beam controlled switchless multi-joule TEA CO<sub>2</sub> laser[J]. Infrared physics and technology,2003,44:69-73.
- [10] Satyanarayana D V, Mohan M S, Nundy U. All solid state switched high efficiency pulser sustainer TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. Rev Sci Instrum,1995,66(3):2391-2393.
- [11] 奚惠江,刘金授,陈宗柱,等. 紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器放电特性的研究[J]. 激光与红外,1989,19(3):34-37.
- [12] Bruno W. Surface corona discharge preionization of gas-flow TEA laser[J]. J. Phys E:Sci Instrum,1987,20(7):457-458.
- [13] 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.
- [1] LBO 525nm 绿光激光器 [J]. 激光与红外,2007,37(2):20-22.
- [3] 张玉萍,郑义,张会云,等. 高稳定 LD 泵浦腔内倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 连续绿光激光器[J]. 光子学报,2006,35(07):12-15.
- [4] T Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. JOSA B,1986,3(9):1175-1180.
- [5] 禹国俊,姚建铨,郭丽,等. LD 纵向泵浦的 946nm Nd:YAG 准三能级激光系统的研究[J]. 量子电子学报,2003,20(6):675-679.
- [6] 刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. 激光二极管抽运的全固体 457nm 深蓝激光器[J]. 光学学报,2002,22(8):980-982.
- [7] 王青圃,张行愚,李平,等. 腔内倍频的准三能级连续激光器理论[J]. 中国科学 E 辑,2003,33(10):954-960.
- [8] Glenn E James, Evans M Harrell II, Rajarshi Roy. Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers. II [J]. PRA,1990,41(5):2778-2790.

(上接第 125 页)

### 5 结论

通过对两个和三个基频纵模起振条件下,不同损耗大小时的基频光抖动、倍频光抖动和倍频光功率的频谱 FFT 分布分析可以看出,在腔内倍频激光器中,腔内基频光纵模所经历的损耗对于倍频光噪声行为存在着很大的影响。当腔内基频光纵模损耗变大时,倍频光抖动周期变小,尖峰个数明显增多。通过对倍频光频谱 FFT 分析发现,当损耗参数变大时,输出功率的频谱 FFT 分布包络有向高频移动趋势,且上面叠加的尖峰变多变密。这在高频部分表现更为明显,说明激光器的噪声变大并趋于高频化。

### 参考文献:

- [1] 吕彦飞,檀慧明,高兰兰,等. LBO I 类临界相位匹配内腔和频 593.5nm 激光器[J]. 激光与红外,2005,35(1):45-47.
- [2] 曹洪忠,檀慧明,王保山,等. LD 端面泵浦 Yb:YAG/