

文章编号: 0258-7025(2005)01-0001-04

# 顺序放电高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

吴 谨, 王东蕾, 唐永新, 刘世明, 万重怡

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 研制了一台高重复频率顺序放电 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 由共用光学谐振腔的两节相同放电组件组成, 单组件的有效增益体积为 2.5 cm×2.5 cm×55 cm。激光器允许以不同的双脉冲时间间隔和不同的脉冲重复频率工作并产生高峰值功率输出双脉冲。当两组件以 200 Hz 重复频率同步放电时, 激光器输出平均功率为 1.1 kW; 当两组件以 400 Hz 重复频率顺序放电时, 输出平均功率为 550 W, 双脉冲时间间隔为 2.5 ms。在同一脉冲重复频率下, 激光器的平均输出功率随双脉冲间隔的增大而减小。实验还测量了不同双脉冲间隔下, 激光器的输出双脉冲波形。

**关键词** 激光技术; 高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 同步放电; 顺序放电; 双脉冲输出

**中图分类号** TN 248.5 **文献标识码** A

## High Rep-Rate TEA CO<sub>2</sub> Laser with Sequential Discharge

WU Jin, WANG Dong-lei, TANG Yong-xin, LIU Shi-ming, WAN Chong-yi

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A high rep-rate TEA CO<sub>2</sub> laser with two sets of electrodes in the optical cavity is described. Each set of electrodes has an active gain volume of 2.5 cm×2.5 cm×55 cm. The device produces high intensity pulse pairs with varied time separations and varied rep-rates. When the two sets of electrodes discharge synchronously, the device generates an average output power of 1.1 kW with rep-rate 200 Hz. When the two sets of electrodes discharge sequentially, the device generates an average output power of 550 W with rep-rate 400 Hz and maximum pulse-pair interval of 2.5 ms. With the same rep-rate, the average output power from the device decreases with the increase of the pulse-pair time interval. In addition, the pulse-pair profiles with various time intervals are given.

**Key words** laser technique; high rep-rate TEA CO<sub>2</sub> laser; synchronous discharge; sequential discharge; pulse-pair output

## 1 引 言

1999 年, Rongqing Tan 等利用旋转火花隙实现了 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的顺序放电<sup>[1,2]</sup>。其方法是在一台紫外预电离高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器上, 将高压放电开关——旋转火花隙作特别的设计改造, 使其适用于共谐振腔的双电极对激光器作顺序放电。这种激光器的两对电极可以依次交替放电, 激光器输出的脉冲重复频率是单对电极放电时的两倍; 并且通过调节旋转火花隙驱动电机的转速, 输出激光的脉冲重复频率可以在一定范围内改变。但是, 采用这种结构的高重复频率顺序放电激光器, 其输出激光的脉冲间隔不能随意改变, 这在一定程

度上限制了它的应用。因此, 采用两个高压闸流管代替间隔固定的旋转火花隙作为高压放电开关, 可以克服触发脉冲间隔不可调的缺点, 实现更加灵活方便的顺序放电控制。

文献[3,4]报道了利用共谐振腔的双电极对错开一定时间间隔放电的方法实现了 TEA CO<sub>2</sub> 激光器双脉冲输出。本文的工作不仅实现了高重复频率同步放电和顺序放电, 而且实现了脉冲间隔可调的高重复频率双脉冲运转。

## 2 激光器设计与测量装置

激光器电路组成如图 1 所示。图中,

收稿日期: 2003-09-04; 收到修改稿日期: 2004-01-19

**作者简介:** 吴 谨(1965—), 男, 侗族, 湖南邵阳人, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士, 主要从事脉冲气体激光技术及应用研究。E-mail: jwu909@263.net

HVCCPS1 和 HVCCPS2 是两台相同的 12 kJ/s 高压电容充电电源, 高压储能电容  $C_1 = C_2 = 0.085 \mu\text{F}$ , 充放电用的旁路电阻  $R_1 = R_2 = 500 \Omega$ , 旁路电感  $L_1 = L_2 = 100 \text{ mH}$ , TH1 和 TH2 是高压氢闸流管(美国 PerkinElmer Optoelectronics 公司生产, 型号 LS-4111)。

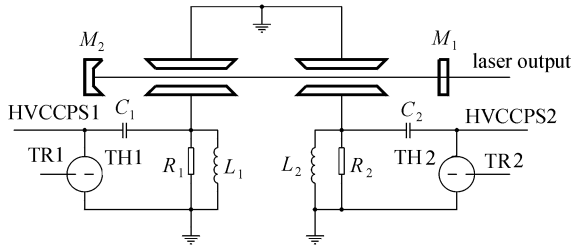


图 1 顺序放电 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的抽运电路

Fig. 1 Pump circuits of a sequential discharge TEA CO<sub>2</sub> laser

图 1 中 TEA CO<sub>2</sub> 激光器由两个相同的组件串联而成, 每个组件内有一对主放电电极和预电离电极。两对主放电电极均采用类似张氏电极面型, 放电横截面为  $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ , 每对电极的有效放电增益区长度为  $55 \text{ cm}$ 。两对电极沿光束传播方向相距  $25 \text{ cm}$ , 在这样的间距下, 第一对电极的放电对第二对电极之间的激光混合气体的扰动及放电稳定性影响很小<sup>[3]</sup>。采用放置在气流下游的电容耦合的单边火花针列阵预电离。激光混合气的循环流动由切向风机驱动, 流过主放电电极之间的气体流速不低于  $30 \text{ m/s}$ 。

两个激光器组件的充放电回路是完全相同的, 先由高压电容充电电源给储能电容充电, 然后触发高压闸流管实现对激光器能量的注入。闸流管的触发控制电路可以任意设定两个触发信号之间的时间间隔, 因此, 两对电极可以同步或依次顺序放电。高压开关式电容充电电源采用恒流充电, 充电电压和禁止充电时间可以方便控制。

激光混合气采用  $V(\text{CO}_2) : V(\text{N}_2) : V(\text{He}) = 1 : 1 : 4$ , 并加有少量 CO 和 H<sub>2</sub> 作为气体催化还原剂, 总气压为  $60 \text{ kPa}$ 。激光谐振腔全反端镜  $M_2$  采用曲率半径  $R = 20 \text{ m}$  的凹面铜镜, 输出耦合端采用砷化镓平面镜。输出激光脉冲能量经过 CaF<sub>2</sub> 衰减后由美国 Molelectron 公司生产的 J50HR 探头测量, 输出激光平均功率由北京机电研究院生产的手持式激光功率计 SJK-0.5 kW 测得, 激光脉冲波形由光子牵引探测器和数字示波器 TDS220 记录。

### 3 激光输出特性

根据两个闸流管的触发时间间隔  $\Delta t$ , 将这种结构的激光器分为三种工作方式:

1)  $\Delta t = 0$ , 称为同步放电。这时两个闸流管同时触发, 两对电极同步放电;

2)  $\Delta t = T/2$  ( $T$  为每个闸流管的触发周期, 下同), 称为顺序放电。这时, 两个闸流管交替触发, 两对电极顺序放电;

3)  $T/2 > \Delta t > 0$ , 称为双脉冲输出放电。这时, 一般关注的是  $T/2 \gg \Delta t > 0$  的情形。

下面将分别给出不同情形下激光器的输出特性。

#### 3.1 同步放电与顺序放电

图 2 为充电电压为  $25 \text{ kV}$ , 激光器工作于同步放电或顺序放电时, 储能电容  $C_1$  或  $C_2$  上的充放电电压波形, 图中, 横坐标的标度为  $2 \text{ ms/div}$ 。从图 2 (a), (b) 分别可以看出, 同步放电时, 储能电容  $C_1$  和  $C_2$  同时放电, 激光输出脉冲重复频率  $200 \text{ Hz}$ , 测得激光平均功率  $1.1 \text{ kW}$  (对应于每个脉冲能量为  $5.5 \text{ J}$ ); 顺序放电时, 储能电容  $C_1$  和  $C_2$  交替放电, 激光输出脉冲重复频率  $400 \text{ Hz}$ , 测得激光平均功率  $0.55 \text{ kW}$  (对应于每个脉冲能量为  $1.38 \text{ J}$ )。可见, 在这种激光器谐振腔中, 相对于同步放电而言, 顺序放电时, 输出激光脉冲重复频率加倍, 但是, 每个激光脉冲能量和激光平均输出功率大大下降。图 3 (a), (b) 分别为输出激光脉冲波形。从图 3 可以看出, 同步放电和顺序放电的激光输出光脉冲波形是有区别

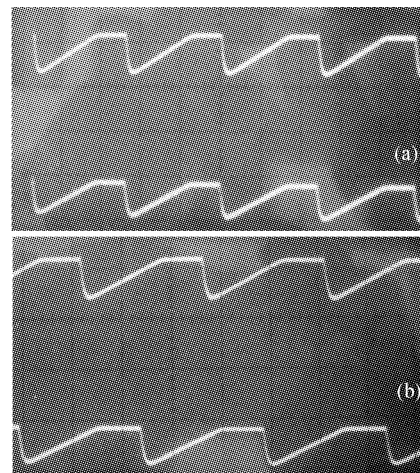


图 2 储能电容  $C_1$  和  $C_2$  上的充放电电压波形  
(a) 同步放电; (b) 顺序放电

Fig. 2 Voltage waveforms on storage capacitors  $C_1$  and  $C_2$

(a) synchronous discharge; (b) sequential discharge

的。图 3 中, 高频振荡信号的开始表示激光放电开始, 因此, 从触发激光器放电到有激光输出, 同步放电的时间延迟约  $0.9 \mu\text{s}$ , 顺序放电的时间延迟约  $1.5 \mu\text{s}$ 。这是因为同步放电的有效增益长度是顺序放电的两倍。增益长度越长, 越容易建立激光振荡。

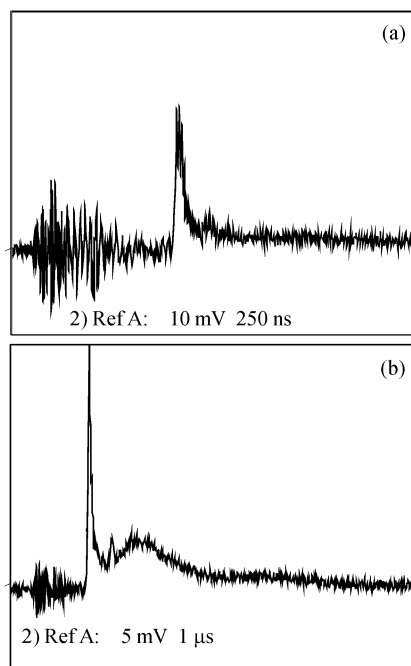


图 3 输出激光脉冲波形

(a) 同步放电; (b) 顺序放电

Fig. 3 Output laser pulse profiles

(a) synchronous discharge; (b) sequential discharge

### 3.2 双脉冲激光输出

控制两个闸流管的触发时间间隔, 可实现双脉冲激光输出。由于激光上能级倒空需要一定时间以及前一个脉冲放电会引起激光气体的扰动, 这个时间间隔对激光输出脉冲能量及激光脉冲波形都会有影响。

图 4 为每个闸流管的触发频率为 200 Hz 时, 触发时间间隔对激光输出平均功率的影响。图中, 上部的虚线代表同步放电时激光器的平均输出功率, 下部的实线是顺序放电时激光器的平均输出功率, 两线之间的五角星表示不同的触发时间间隔下激光器的平均输出功率。可以看到, 触发时间间隔小于  $10 \mu\text{s}$  时, 激光器的平均输出功率随触发时间间隔的增加而近似直线下降; 触发时间间隔大于  $12 \mu\text{s}$  后, 触发时间间隔对激光输出平均功率的影响很小。这其中的原因可以结合图 3(b) 进行解释。从图 3(b) 可以看出, 顺序放电时, 激光脉冲的持续时间约  $7 \mu\text{s}$ , 在激光脉冲结束后的几个微秒内, 激光介质中

仍然存在粒子数反转, 这些反转粒子数对于紧接着而来的激光振荡仍将有贡献。

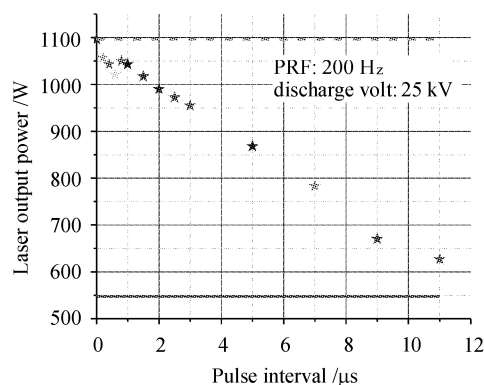


图 4 激光平均输出功率与触发脉冲间隔的关系

Fig. 4 Average laser output power versus triggered pulse interval

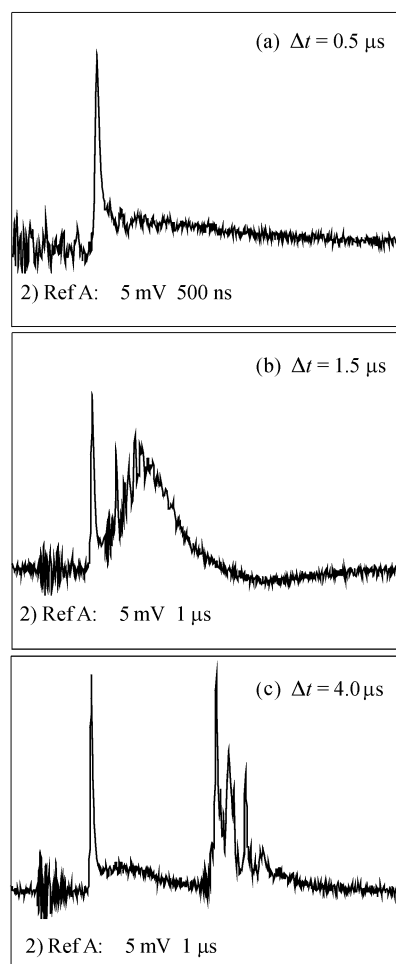


图 5 不同触发时间间隔下激光输出光脉冲波形

Fig. 5 Laser pulse profiles with different  $\Delta t$

图 5 为三个不同的触发时间间隔下, 激光器输出的脉冲波形。图 5(a) 中, 触发时间间隔约  $0.5 \mu\text{s}$

$\mu\text{s}$ , 输出激光脉冲波形类似于同步放电(见图 3(a))。在图 5(b)中, 触发时间间隔约  $1.5 \mu\text{s}$ , 这时, 可以观察到第二个放电产生的增益开关效应, 不过与图 5(a)相比较, 整个激光脉冲的拖尾“隆”起来了, 80%以上的激光脉冲能量集中在这个隆起的部分。在图 5(c)中, 触发时间间隔约  $4.0 \mu\text{s}$ , 这时, 已经非常明显地看出两次触发放电的结果。图 5(b), (c)中, 由于第二个脉冲到来时, 第一个脉冲激发产生的反转粒子数并未弛豫结束, 第二个脉冲的能量显得比第一个脉冲的能量要大, 并且, 第二个激光脉冲的建立时间也会比第一个脉冲短。因此, 图 5(b)中, 两个激光脉冲的间隔约为  $0.8 \mu\text{s}$ , 图 5(c)中, 间隔约为  $3.2 \mu\text{s}$ , 都比相应的触发脉冲间隔要短。

结合图 4 和图 5, 可以说, 利用这种结构的激光器, 通过适当控制双脉冲的触发时间间隔, 和同步放电相比, 一方面可以大大抑制增益开关效应产生的尖峰脉冲, 将 80%以上的激光能量集中到拖尾中; 另一方面, 可以实现较宽的脉冲激光输出。和采用脉冲形成网络放电<sup>[5]</sup>获得宽脉冲激光输出相比, 本文所提供的激光器结构, 因为两对电极的放电是互相独立的, 所以更容易获得稳定的激光放电。

## 4 结 论

从不同的放电角度, 研究了一种高重复频率顺序放电激光器的输出特性。通过改变两个高压闸流管的触发方式, 这种激光器可以获得不同的激光脉冲输出方式: 同步放电的大脉冲能量输出、顺序放电

的高重复频率输出和脉冲间隔可变的双脉冲输出。三种工作方式中, 同步放电时, 激光输出脉冲能量最大, 输出激光脉冲重复频率等于每个闸流管的触发频率; 顺序放电时, 输出激光脉冲重复频率是每个闸流管触发频率的两倍; 双脉冲输出时, 激光脉冲对的重复频率等于每个闸流管的触发重复频率, 双脉冲之间的间隔可以任意调节。值得指出的是, 双脉冲输出时, 如果双脉冲之间的间隔很小, 第二个脉冲产生的增益开关效应受到一定程度的抑制, 激光输出是一个“宽脉冲”。为获得长脉冲激光输出提供了一种可行的方法, 同时, 采用这样的结构, 扩展了 TEA  $\text{CO}_2$  激光器的应用范围。

## 参 考 文 献

- 1 Rongqing Tan, Chongyi Wan, Jilan Qi *et al.*. A sequential discharge TEA  $\text{CO}_2$  laser with high repetition rate and high output power [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(5): 393~396
- 2 Chongyi Wan, Shiming Liu, Jinwen Zhou *et al.*. High repetition rate industrial TEA  $\text{CO}_2$  laser with average output power of 1.5 kW [C]. *SPIE*, 1994, **2502**:87~94
- 3 Li Xiangyin, Shi Zhenbang. Configuration analysis of double-pulsed laser with two pairs of electrodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(6):531~535  
李相银, 施振邦. 双电极对双脉冲激光器结构分析[J]. *光学学报*, 1991, **11**(6):531~535
- 4 Li Xiangyin, Sun Ning, Shi Zhenbang. A double-pulse TEA  $\text{CO}_2$  laser with adjustable pulse interval [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(2):169~173  
李相银, 孙 宁, 施振邦. 脉冲间隔可调的双脉冲 TEA  $\text{CO}_2$  激光器[J]. *光学学报*, 1990, **10**(2):169~173
- 5 Y. Okita, K. Yasuoka, A. Ishii *et al.*. Long-pulse, high-repetition-rate transversely excited  $\text{CO}_2$  laser for material processing [C]. *SPIE*, 1994, **2118**:22~31