

# 密封型 CO<sub>2</sub> 激光器超脉冲特性研究

沈宇震 祝有信 石立深 牛振亚

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 对连续输出 20W 的密封型 CO<sub>2</sub> 激光器超脉冲运转特性进行了数值模拟和实验研究, 确定了最佳激励条件, 获得了峰值功率 200W 的超脉冲输出。

## 1 引言

激光加工和激光医疗要求一台 CO<sub>2</sub> 激光器能够以连续和脉冲两种方式运转。CO<sub>2</sub> 激光器连续运转时气压较低以避免气体温度升高, 能级弛豫时间缩短, 输出功率下降, 但低气压不利于脉冲运转时获得高峰值功率。超脉冲技术是用比连续运转更高的注入功率密度快速放电泵浦低气压 CO<sub>2</sub> 激光器, 利用增益开关效应产生高峰值、长脉冲激光输出, 即超脉冲输出。CO<sub>2</sub> 激光器所产生的超脉冲能够有效地提高金属材料的切割、焊接质量, 并在医学, 热处置方面有重要应用。近些年来超脉冲技术在国外已为激光加工机和激光治疗仪所使用, 但在国内还处于研究阶段。本文报导了连续输出 20W 的密封型 CO<sub>2</sub> 激光器超脉冲特性的理论和实验研究。

## 2 基本原理

CO<sub>2</sub> 激光器系统的能级结构和跃迁过程如图 1 所示。根据图 1, 能级粒子数密度和光子数密度的变化方程为:

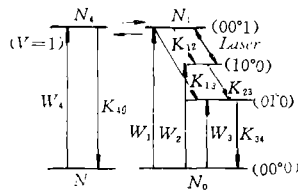


图 1 CO<sub>2</sub> 激光器系统能级结构和跃迁过程简图

$$dN_1/dt = -(K_{12} + K_{13} + K_{14} + \varphi\delta C)N_1 + \varphi\delta CN_2 + K_{41}N_4 + W_1 \quad (1)$$

$$dN_2/dt = (\varphi\delta CK_{12} + K_{12})N_1 - (K_{23} + \varphi\delta C)N_2 + W_2 \quad (2)$$

$$dN_4/dt = K_{14}N_1 - (K_{41} + K_{40})N_4 + W_4 \quad (3)$$

$$d\varphi/dt = -\varphi/\tau + \varphi\delta C(N_1 - N_2) + K_{12}N_1G \quad (4)$$

由于放电脉冲长,注入功率高,应考虑气体温度的变化:

$$dT/dt = MCvdQ/dt \quad (5)$$

式中  $N_1$ 、 $N_2$  分为  $\text{CO}_2(00^1)$ 、 $(01^0)$  能级的粒子数密度,  $N_4$  为  $N_2(V=1)$  能级的粒子数密度,  $\varphi$  为光子数密度。  $K_{12}$ 、 $K_{13}$ 、 $K_{23}$  分为  $\text{CO}_2(00^1)-(10^1)$ 、 $(00^1)-(01^1)$ 、 $(10^0)-(01^0)$  的驰豫速率系数。  $K_{41}$ 、 $K_{40}$  为  $\text{CO}_2(00^1)$  和  $N_2(V=1)$  之间的共振转移速率系数,  $\delta$  为受激辐射截面,  $G$  满足下式:

$$G = \lambda^2/A \quad (6)$$

其中  $A$  为谐振腔反射镜面积,  $\lambda$  为激光波长。在这里重点考虑快速放电情况下泵浦速率对激光器脉冲运转的影响。根据:

$$W_1 = N_e(t)N_0X_1 \quad W_2 = N_e(t)N_0X_2 \quad W_3 = N_e(t)NX_3 \quad (7)$$

式中  $N_0$ 、 $N$  为  $\text{CO}_2$ 、 $N_2$  基态粒子数密度,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分为  $\text{CO}_2(00^1)$ 、 $(10^0)$  能级、 $N_2(V=1)$  能级的有效激发速率,  $N_e(t)$  为电子密度, 电子密度和注入功率密度的关系满足下式:

$$\epsilon = JE = (e^2/M_e)N_e n(e/n\delta_m C_e) \quad (8)$$

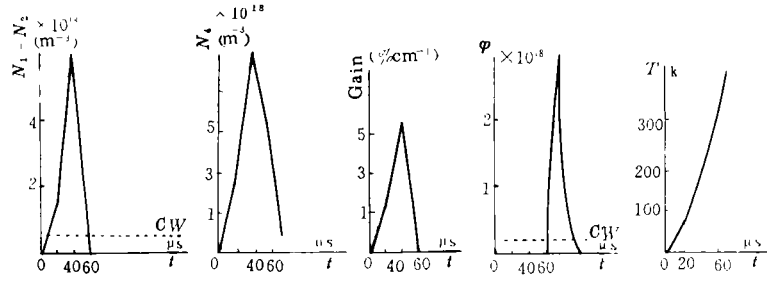
其中  $J$  为电流密度,  $E$  为电场强度,  $n$  为中性粒子密度,  $M_e$  为电荷质量,  $\delta_m$  为电子与分子碰撞动量损失截面,  $C_e$  为电子热运动速率。

由(1)–(8)式可见,注入功率密度的提高使电子密度增加,各能级泵浦速率随着增加。当非常高的注入功率是由前沿极陡、具有超调的放电脉冲所产生时,这个激励脉冲能够在极短的时间内提供足够的能量,把几乎全部  $\text{CO}_2$  分子从基态快速泵浦到激发态,粒子数的快速反转形成增益开关效应,从而使低气压  $\text{CO}_2$  激光器也能够产生高峰值激光输出,这就是超脉冲技术的基本思想,而这种思想来源于 Hill 的快速放电泵浦和增益开关技术<sup>[1]</sup>。

根据上述思想,利用数值方法求解(1)–(5),得到激光器在高注入功率密度下超脉冲运转时速率方程的解。求解过程中快速脉冲电流强度的变化满足:

$$I = \begin{cases} I_p \exp(t/t_c) \\ I_p \\ I_p \exp(-t/t_d) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $I_p$  为矩形放电脉冲峰值电流强度,  $t_c$ 、 $t_d$  分为放电脉冲上升、下降时间,图 2 是当注入功率密度达到  $40\text{W}/\text{cm}^3$  时,反转粒子密度、 $N_2$  分子数密度、增益、光子数密度、气体温度在一个放电周期中随时间的变化,方程(1)–(5)中各驰豫速率系数的取值见文献<sup>[2][3]</sup>。求解(1)–(5)的稳态解。对脉冲运转与连续运转进行比较,理论计算表明,对实验中所用的  $\text{CO}_2$  激光器,采用超脉冲技术,能够在放电脉冲期间获得比连续运转高得多的注入功率密度,由图 3 可见,随着注入功率密度的提高,输出功率不断提高,当注入功率密度达到  $50\text{W}/\text{cm}^3$  时,获得了最大峰值功率输出,峰值功率比最大连续输出高出十几倍。如此高的注入功率密度远远超出了激光器连续运转时的承受能力,但超脉冲运转时放电快速进行,放电时间远小于弧光形成时间和放电不稳定性的增长时间<sup>[4]</sup>,因此激光器在高注入功率密度下能够维持稳定辉光放电。



(a)反转粒子数密度 (b)N<sub>2</sub>分子数密度 (c)增益 (d)光子数密度 (e)气体温度

图2 速率方程组的理论解曲线

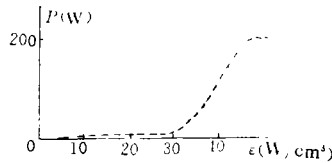


图3 超脉冲输出随注入功率密度变化的理论曲线

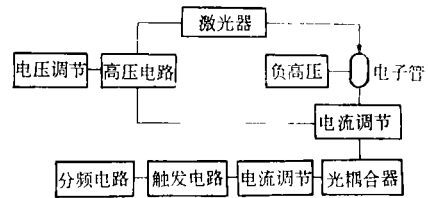


图4 电源结构简图

由(7)式可以看出提高注入功率密度可以通过提高放电电压和放电电流来实现。在一定电压调节范围内主要通过提高放电电流。根据：

$$I_p = I_A / D \quad (10)$$

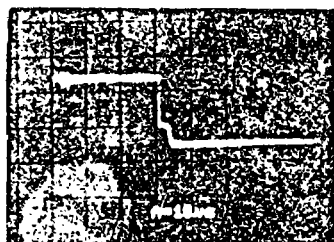
其中  $I_A$  为平均电流,  $D$  为占空比, 由(8)式可见放电电流的提高有两种途径, 一种是保持一定放电脉宽即占空比, 提高平均电流, 但对于长放电脉冲, 为获得激光器超脉冲运转所需的高注入功率密度, 需要非常大的平均电流, 这使放电脉冲期间气体温度升高, 不利于激光器运转。另一种途径是保持一定平均电流, 使用窄放电脉冲即小占空比, 这样可以在小平均电流下获得高注入功率密度, 同时小平均电流、窄放电脉冲有利于气体温度的降低, 对提高激光器超脉冲运转性能有重要作用。对于实验中所使用的密封型 CO<sub>2</sub> 激光器应采用第二种方法提高注入功率密度。

### 3 实验装置

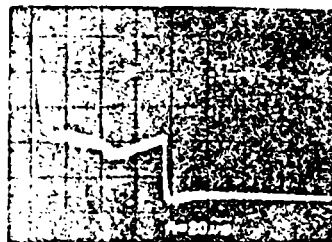
#### 3.1 电源设计

根据激光器超脉冲运转的特点, 对激光器电源进行设计。电源结构简图如图4所示。电源由控制电路和主放电回路构成。控制电路由可预置数分频电路和单稳态触发电路所组成。可预置数分频电路通过晶振分频产生 0—2kHz 的振荡频率。调节单稳态触发器的时间常数, 选取放电脉宽, 占空比能够从零到连续可调。上述脉冲信号能够产生前沿, <50ns 的矩形触发脉冲。为防止放电时高压部分对弱电部分的影响, 采用光耦合器对两部分进行隔离, 光耦合器应满足脉冲信号频响要求, 保证触发信号理想传输。通过光耦合器的脉冲信号经放大通过调整管对电子管灯丝电流进行调制, 从而控制主回路放电电流, 调整管应选用导通时间短并具有高反压的晶体开关管, 以保证输出的调制脉冲窄而陡。电路中其它元件的选取如三极管、运算放大

器等都应满足脉冲信号频响要求。上述设计使电源能够产生前沿小于 1 微秒,后沿小于 5 微秒,具有超调的阶跃放电脉冲,为激光器超脉冲运转创造了条件。图 5((a)和(b)分为触发信号波形和放电信号波形。



(a) 触发脉冲波形



(b) 放电脉冲波形

图 5

3.2 实验装置 实验装置如图 6 所示,实验采用的密封型 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔长 1 米,放电管长 0.83 米,内径 9 毫米,总气压 16Torr,CO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>: He=1: 1: 5,最大连续输出 20W,激光器输出的脉冲信号经分束器分成两束,一束由功率计接受,用来测量平均功率,另一束经焦距  $f=200\text{mm}$  的扩束器扩束后通过透过率为 20%和 50%的衰减器,再由 Hg—Cd—Fe 探测器接收,经放大器放大后由示波器记录激光脉冲信号波形。调制盘用来调制连续信号,使调制信号与连续信号幅度相等,在示波器上比较超脉冲信号与调制信号幅度,以便获得激光脉冲峰值功率并对实验结果进行进一步验证。

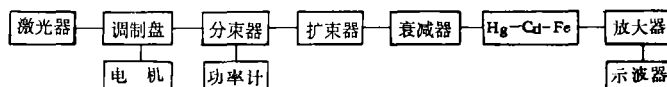


图 6 实验装置简图

## 4 实验与结果分析

### 4.1 超脉冲激光的获得

首先利用调制盘对连续输出进行调制,使调制信号与连续输出幅度相等,图 8(a)为调制信号波形,通过 Td—Cd—Hg 探测器记录调制信号以便与超脉冲信号比较。

在实验中通过电压调节控制主回路电压,对不同放电频率选取最佳平均电流并保持不变,通过调节单稳态触发器的 RC 时间常数,压缩放电脉冲占空比提高峰值电流,从而提高放电脉冲的注入功率密度。在接收器上比较激光脉冲信号幅度和调制信号幅度,以获得脉冲信号峰值功率。图 7 为放电频率 600Hz 时超脉冲峰值功率、平均功率随注入功率密度变化的实验曲线。实验表明当注入功率密度提高到 8 瓦/厘米<sup>3</sup> 时,开始有超脉冲现象产生,脉冲峰值功率为最大连续功率的两倍。随着注入功率密度的不断提高,脉冲峰值功率和平均功率不断增强,脉冲形状从截锥形逐渐变化为尖峰形。当注入功率密度增加到 40 瓦/厘米<sup>3</sup> 时,获得了最大超脉冲输出见图 8(b),脉冲峰值功率为 200 瓦,是最大连续功率的 10 倍。此时放电脉宽 35 微秒,激光

脉宽 100 微秒,平均功率比连续功率下降一半。

上述实验中获得的超脉冲波形和实验曲线与前面理论计算的结果(图 2、3)符合. 实验中激光器运转时测得的  $E/N$  值(电场强度与中性粒子数密度的比值)为 4.5 瓦/帕米,根据 Nighan 的理论结果<sup>[5]</sup>此时全部电子能量的 90%以上直接用于  $\text{CO}_2(00^1)$ 和  $\text{N}_2$  的振动态激发,因而能够在快速放电脉冲期间实现粒子数的快速反转,产生增益开关效应,从而证实了前面的理论分析。

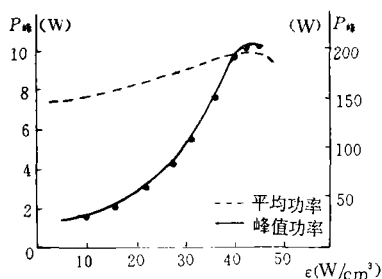


图 7 超脉冲输出随注入功率密度变化的实验曲线

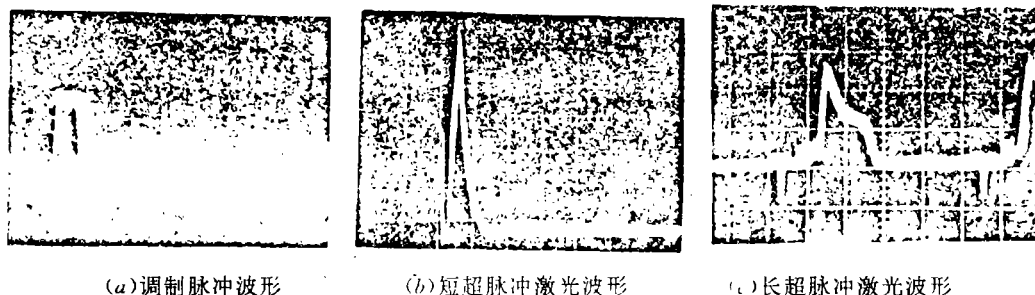


图 8

#### 4.2 超脉冲与放电脉宽的关系

在相同注入功率密度下,改变放电脉冲宽度,得到脉冲峰值功率的曲线(图 9)曲线表明由于密封型  $\text{CO}_2$  激光器冷却性差,对于超脉冲运转所需的高注入功率密度,应合理选择放电脉宽。放电脉宽越长,越不利于气体温度的降低,不利于获得有效的超脉冲输出。图 8(c)为长放电脉冲激励下所产生的超脉冲波形。光波形表明激光脉冲峰值功率的获得主要依靠激励快速进行所产生的增益开关效应,脉冲激励后期仅起到维持振荡的作用。

#### 4.3 超脉冲与放电频率的关系

图 10 是对不同放电频率,选取最佳注入功率密度所得到的超脉冲最大峰值功率和平均功率曲线。曲线表明存在最佳放电频率范围,在这里为 600Hz—700Hz,在这个频率范围内,放电脉冲在高注入功率密度下有利于粒子数反转,并且在非放电期间能够使气体温度有效降低,因此能够产生高峰值功率和平均功率。放电频率较低时,放电脉冲长,气体温度高,不利于获得有效脉冲输出。放电频率高时,放电脉冲窄,不利于粒子数积累,只有进一步增加注入功率密度,才能使脉冲峰值功率、平均功率得到提高。因此随放电频率的提高需要更高的注入功率密度,但由于电源等条件限制,注入功率密度有一定极限。

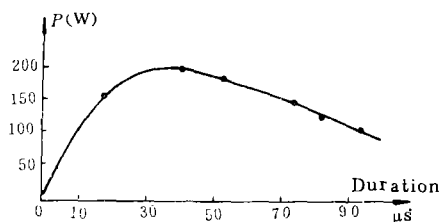


图9 超脉冲激光输出与放电脉宽的关系曲线

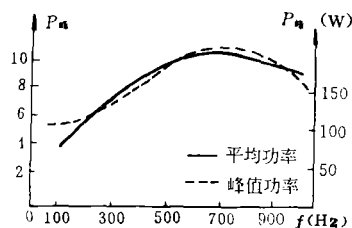


图10 超脉冲激光输出与放电频率的关系曲线

## 5 结 论

本文对密封型  $\text{CO}_2$  激光器的超脉冲特性进行了理论和实验研究,确定了最佳放电频率、放电脉宽以及注入功率密度等。为获得更有效的超脉冲输出,应增强气体冷却效果,如使气体快速流动,从而获得较长的超脉冲输出,提高脉冲能量。此外还可适当选取气体配比,以及采取预电离措施,提高放电脉冲的稳定,性和均匀性。

### 参 考 文 献

- [1] Alan E. Hill, "Multijoupe Pulses from  $\text{CO}_2$  Lasers", *Appl. Phys. Letts.* Vol12, No9, 324 (1969)
- [2] Kenan Danisman et al, "Optimization of Affecting Parameters in Relation to Pulsed  $\text{CO}_2$  Laser Design", *Spie*, Vol1412, 218 (1991)
- [3] Thomas B. Melancon, "A Model of Temperature Effect in Pulsed and Wave  $\text{CO}_2$  Laser and Optimization Using Respose Surface Methodology" AD—A213760, (1989)
- [4] W. J. Wiegand and William L. Nighan, "Influence of Fluid Dynamic Phenomena on the Ocurrance of Constriction in CW Convention Laser Discharge", *Applied physics letters*, Vol26, No10, 554 (1975)
- [5] William L. Nighan and H. Bennett, "Electron Energy Distributions and Vibrational Excitaion Rates in  $\text{CO}_2$  Laser Mixtures", *Applied. physics. letters*, Vol14, No10, 240 (1969)

### Study on Super Pulse of Sealed $\text{CO}_2$ Laser

Shen Yuzhen, Zhu Youxin, Shi Lishen and Niu Zhenya

(Changchun Intitute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

Numerical simulation and experimental study on super pulse of sealed  $\text{CO}_2$  laser are described. Optimal discharge condition is determined and super pulse with 200W peak power output his been obtained.

Key words : Super pulse, Sealed  $\text{CO}_2$  laser, Discharge condition