

# TEA CO<sub>2</sub> 激光器的增强脉冲效应

谢培良 王凤云 张锡刚

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文报导了 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的增强脉冲效应, 对于 400 托到 2 个大气压下的 CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He 混合物, 有增强脉冲时, 激光能量输出可增加 20~30%。

## Enhanced-impulse effect of TEA CO<sub>2</sub> lasers

Xie Peiliang, Wang Fungyun, Zhang Xigang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** The enhanced-impulse effect of TEA CO<sub>2</sub> lasers is described. For CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He mixtures at pressure from 400 torr to 2 atm, the output energy can be increased by 20~30% with the existence of enhanced-impulses.

### 一、引言

在横向激励的高气压激光器中, 为维持稳定的辉光放电模型, 已经有若干种成功运转的预电离技术, 如紫外光预电离、电子束预电离、X 射线预电离、放射线预电离等等。紫外光预电离因其结构简单, 成本低廉, 使用较为广泛。为了改善紫外光预电离放电特性, 国外曾对连续运转的 CO<sub>2</sub> 激光器, 在紫外光预电离后, 加上高压雪崩增强脉冲, 研究它对激光器性能的影响, 实验表明<sup>[1~3]</sup>, 加入雪崩脉冲, 可以增加预电离初始电子密度, 因此有可能实现分别控制离化电子密度  $n_0$  和振荡激发泵浦  $E/N$ , 从而改善紫外光预电离激光器的性能。

我们对 TEA CO<sub>2</sub> 激光器作了增强脉冲

实验, 在气压 400 托到 2 大气压下, 研究了增强脉冲对激光器放电特性及输出能量的影响, 实验证明, 在有增强脉冲时, 激光器输出能量均有所增加。

### 二、实验结果

实验装置如图 1, 放电室工作区为  $2 \times 2 \times 47$  厘米<sup>3</sup>, 阴极为张氏石墨电极, 阳极为透过率 56% 的带圆孔的铜板, 其下置有 24 对紫外光预电离火花隙,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别是增强脉冲、主放电、紫外光预电离电源的电压。器件运转时, 增强脉冲需要有快的上升时间, 故用充气球隙, 球隙的触发延时可调, 正常工作时增强脉冲延迟调到紫外光预电离后约 0.8 微秒, 主放电延迟增强脉冲约 0.2 微

收稿日期: 1982 年 3 月 9 日。

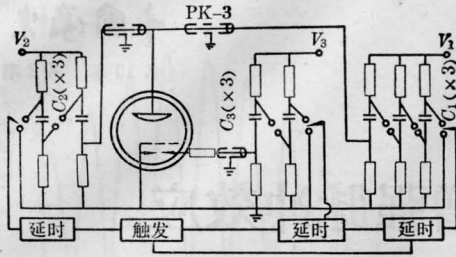


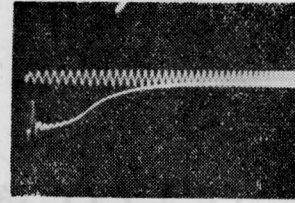
图1 实验装置

$V_1$ —10~20 千伏;  $V_2, V_3$ —15~20 千伏;  
 $C_1$ —4.05 毫微法;  $C_2$ —0.04 微法 (0.06  
 微法);  $C_3$ —0.04 微法; PK-3—连接电缆

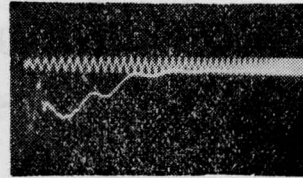
秒。反射镜为  $R$ 5 米的金膜镜, 输出窗为锗平镜。

放电电压与电流波形用电阻分压器及低感电阻测得, 由 OK-19 高压示波器显示, 图 2 为  $\text{CO}_2$ - $\text{N}_2$ - $\text{He}(1:1:8)$  1.6 大气压时的示波图, 测量得到增强脉冲电流宽度约为 100 毫微秒。从图 2 得知, 加上 45 千伏的增强脉冲后, 电压与电流峰值均增加了, 电流峰值增加近 20%。图 2a(2)、图 2(b)(4) 的波形并不是增强脉冲与主放电原来波形的线性叠加, 可以认为, 加上增强脉冲后, 因预电离电子密度的改变引起等离子体阻抗变化, 而导致放电波形的改变。

图 3 为  $\text{CO}_2$  激光体系不同气体组分、一定主放电电压时, 在加入增强脉冲  $V_{\text{脉}}=45$  千伏后, 激光能量增加的百分比值  $K$  与气压  $P$  的关系, 激光输出能量由定标能量计测得。图 3 表明, 气体组分及  $V_{\text{主}}$  一定时,  $P$  较高时  $K$  值也高。测量得到<sup>[4]</sup>在 TEA  $\text{CO}_2$  激光器中, 紫外光预电离初始电子密度随气压的升高成指数减少。在放电条件相同时, 激光输出能量则随初始电子密度成对数增加<sup>[5]</sup>, 因而气压升高时, 除  $E/N$  效应外, 初始电子密度的减少将会减低激光输出能量。加上增强脉冲后, 使初始电子密度增加。从增强脉冲电流波形估算, 在足够高的增强脉冲下, 在  $P$  较高时, 增强脉冲所产生的电子密度增量比较高, 所以在我们的实验条件下, 气压较高时  $K$  值也高。

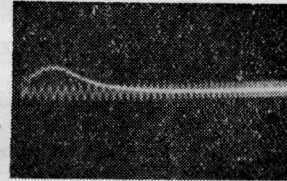


(1)

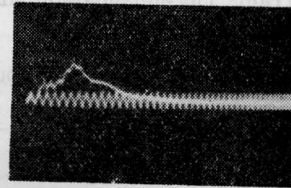


(2)

(a) 电压波形



(3)



(4)

(b) 电流波形

图 2 放电电压示波图(a)与电流示波图(b)  
 $\text{CO}_2$ - $\text{N}_2$ - $\text{He}(1:1:8)$ , 1.6 大气压,  $V_{\text{主}}=36$  千伏,  
 时标 10 兆赫, 图 a(1), b(3)— $V_{\text{脉}}=0$ ; 图 a(2),  
 b(4)— $V_{\text{脉}}=45$  千伏。

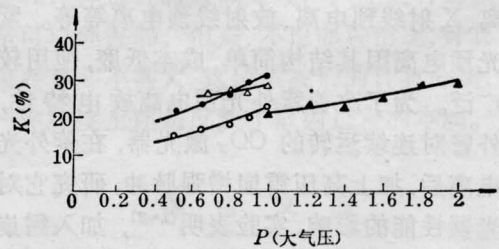


图 3 有增强脉冲( $V_{\text{脉}}=45$  千伏)时, 激光能量增加百分比值  $K$  与气压  $P$  的关系

- △  $\text{CO}_2$ - $\text{N}_2$ - $\text{He}(1:1:8)$   $V_{\text{主}}=32$  千伏
- ▲ 1:1:8,  $V_{\text{主}}=36$  千伏
- 1:1:3,  $V_{\text{主}}=36$  千伏
- 1:1:3,  $V_{\text{主}}=32$  千伏

图4为1大气压下,不同气体组分在有与无增强脉冲时,激光器效率 $\eta$ 与 $E/N$ 的关系。曲线表明,有最佳 $E/N$ 值,在 $V_{脉}=45$ 千伏时,对1:1:8气体组分得到 $E/N=6.0 \times 10^{-16}$ 伏·厘米<sup>2</sup>, $\eta=9\%$ ;对1:1:3气体组分得到 $E/N=6.5 \times 10^{-16}$ 伏·厘米<sup>2</sup>,激光器效率 $\eta=11\%$ 。

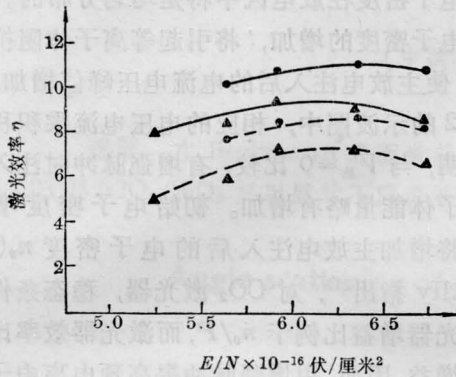


图4 激光器效率 $\eta$ 与 $E/N$ 的关系

● 1:1:3 ▲ 1:1:8 虚线: $V_{脉}=0$ ; 实线: $V_{脉}=45$ 千伏

图5为不同混合物组分在不同气压下,激光能量增加 $K$ 值与 $V_{脉}$ 的关系,由图中可知,增强脉冲电压增加, $K$ 值也增加。曲线初始段是线性的,随后逐步过渡到平缓的曲线。

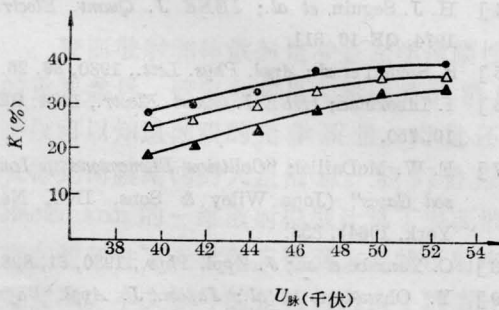


图5 激光能量增加百分比 $K$ 与增强脉冲电压 $U_{脉}$ 的关系

△ CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He(1:1:8), 1大气压, 32 千伏;  
▲ CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He(1:1:8), 1.8 大气压, 36 千伏;  
● CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He(1:1:3), 32 千伏, 1 大气压

该器件对于CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He(1:1:3),  $P=1$ 大气压,  $C=0.06$ 微法,  $V_2=18$ 千伏,  $V_{脉}=45$ 千伏时,激光输出为2焦耳。

### 三、结果讨论

我们实验所用的紫外光预电离放电为欠阻尼振荡,放电电流 $i(t)$ 为:

$$i(t) = \frac{2V}{[4(L/C) - R^2]^{1/2}} \exp(-\beta t) \sin \omega t \quad (1)$$

式中 $\beta=R/2L$ ;  $\omega = [4(L/C) - R^2]^{1/2} / 2L$ 。

对1:1:8, 1大气压的混合气体,  $V_3=20$ 千伏时,测得预电离电流振荡周期为1.6微秒,  $R$ 为0.3欧,  $L$ 为3微亨。紫外光预电离研究表明<sup>[6]</sup>, CO<sub>2</sub>气体对 $\lambda < 1150$ 埃的紫外波长基本上是不透明的,而在1170埃 $< \lambda < 1240$ 埃及 $\lambda > 1600$ 埃有窗口,但在该波长范围内,He、N<sub>2</sub>离化横截面很小<sup>[7]</sup>,难以实现单光子离化。不过我们用的商品气体总含有几ppm 烃类及其他杂质气体,这些杂质对单光子过程有很大贡献<sup>[6,8]</sup>,单光子离化所产生的电子密度为:

$$n_e = \frac{n_i \sigma_i I_0}{d^2} \exp(-\alpha d) / \text{厘米}^3 \quad (2)$$

$I_0$ 为光子流; $\alpha$ 为气体平均吸收系数; $d$ 为离紫外源的距离; $n_i$ 、 $\sigma_i$ 分别为离化气体密度及离化横截面。上式表明,紫外光预电离电子密度 $n_e$ 与紫外光子流 $I_0$ 有关,故与 $i(t)$ 有关, $n_e$ 的空间分布是不均匀的。国外<sup>[9]</sup>及我们的测试得到,CO<sub>2</sub>激光气体混合物中,紫外光预电离初始电子密度随CO<sub>2</sub>含量增加成指数下降,因而对CO<sub>2</sub>含量较高的气体混合物,应注意增强预电离强度,以补偿 $n_e$ 的下降。预电离电子密度 $n_e$ 随 $i(t)$ 变化达峰值后将衰变,其衰变规律与气体组分、杂质含量等有关,衰变并不完全服从电子复合律<sup>[10]</sup>。

我们在作增强脉冲实验时,取 $V_{脉}=1.2 \sim 1.5 V_{主}$ ,为了充分利用预电离电子密度,在紫外光预电离延迟约0.8微秒后加增强脉冲,增强脉冲加入后,电子密度速率方程为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e V_d (\alpha - a) - r n_e^2 \quad (3)$$

式中  $\alpha$ 、 $a$ 、 $r$  分别为电子的电离系数、附着系数、复合系数； $V_d$  为电子漂移速度。如果在增强脉冲加入时，紫外光预电离初始电子密度为  $n_{e0}$ ，在极短的时间  $\Delta t_1$  内，上述参数可视为常数，(3)式积分得：

$$n_{e1} = \frac{k n_{e0}}{(k - r n_{e0}) \exp(-k \Delta t_1) + r n_{e0}} \quad (4)$$

式中  $k = (\alpha - a) V_d$ ，对于 1:1:8 混合物， $V_d = 18$  千伏，1 大气压下， $n_{e0}$  约  $1 \times 10^8$  / 厘米<sup>3</sup>，对于  $V_{pk} = 45$  千伏，由 OK-19 示波器测得的增强脉冲电压波形，并采用 Rowke 给出的<sup>[12]</sup>  $r = 10^{-7}$  厘米<sup>3</sup>/秒以及不同  $E/N$  值时的  $\alpha$ 、 $a$ 、 $V_d$  值，例如，增强脉冲放电后，当  $E/N = 2.5 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup> 时， $\frac{\alpha}{N} = 4 \times 10^{-21}$  厘米<sup>2</sup>， $\frac{a}{N} = 1 \times 10^{-20}$  厘米<sup>2</sup>， $V_d = 4.3 \times 10^6$  厘米/秒；当  $\frac{E}{N} = 5 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup> 时， $\frac{\alpha}{N} = 5 \times 10^{-18}$  厘米<sup>2</sup>， $\frac{a}{N} = 3 \times 10^{-20}$  厘米<sup>2</sup>， $V_d = 8 \times 10^6$  厘米/秒。经运算可以求得增强脉冲加入后电子密度随时间的变化，其最大值约达  $1.2 \times 10^{10}$  / 厘米<sup>3</sup>。

增强脉冲结束后，由于电子复合，电子密度将衰减，经  $\Delta t_2$  后， $n_{e1}$  值为

$$n_{e2} = \frac{n_{e1}}{1 + r n_{e1} \Delta t_2} \quad (5)$$

紧接在增强脉冲后加上主放电，主放电延时增强脉冲约 0.2 微秒， $n_{e2}$  衰减不多。当主放电注入后，放电室中电子密度在极短时间  $\Delta t_3$  内为

$$n_{e3} = \frac{k n_{e2}}{(k - r n_{e2}) \exp(-k \Delta t_3) + r n_{e2}} \quad (6)$$

在阴极位降忽略情况下，主放电瞬间电流值  $I(t)$  与放电室中电子密度  $n_e(t)$  有关<sup>[12]</sup>；

$$I(t) = e A V_d(t) n_e(t) \quad (7)$$

$A$  为放电区面积。由测得的  $V(t)$ 、 $I(t)$  可以估算  $n_e(t)$ ，对 1 大气压 1:1:8 气体混合物， $V_{\pm} = 32$  千伏， $V_{pk} = 45$  千伏时，得到峰值电子密度约  $2.5 \times 10^{13}$  / 厘米<sup>3</sup>。

因此，对于紫外光预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器，在紫外光预电离后加增强雪崩脉冲，可使预电离初始电子密度进一步增加，增加后的电子密度在放电区中将是均匀分布的。初始电子密度的增加，将引起等离子体阻抗变化，使主放电注入后的电流电压峰值增加。从图 2 的示波图中，相应的电压电流乘积积分表明，与  $V_{pk} = 0$  比较，有增强脉冲时注入等离子体能量略有增加。初始电子密度增加也将增加主放电注入后的电子密度  $n_e(t)$ ，Reilly 指出<sup>[1]</sup>，对 CO<sub>2</sub> 激光器，稳态条件下激光器增益比例于  $n_e/P$ ，而激光器效率比例于增益，因而，用增强脉冲提高预电离电子密度可以增加 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出能量。

黄美英同志参加了部分实验，以致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] J. P. Reilly; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, 3411.
- [2] A. E. Hill; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, 670.
- [3] H. J. Seguin et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, 418.
- [4] H. J. Seguin et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, 311.
- [5] S. Suzuki et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**, 26.
- [6] I. Liberman; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, 750.
- [7] E. W. McDailiel; "Collision Phenomena in Ionized Gases" (Jone Wiley & Sons, INC, New York, 1964), 353.
- [8] C. Yamabe et al.; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 898.
- [9] Y. Ohwadano et al.; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1980, **19**, 1493.
- [10] V. M. Borisov et al.; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1977, **7**, 450.
- [11] U. Nundy; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, 69.
- [12] J. J. Lowke; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 4664.