

# 高功率横流CO<sub>2</sub>激光器脉冲预电离过程研究

毛英立 程兆谷 王润文 邓志 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文给出了对高功率横流CO<sub>2</sub>激光器脉冲预电离过程的理论和实验研究。表明了预电离过程中光电离的重要作用。实验结果表明,脉冲预电离可增大高功率横流CO<sub>2</sub>激光器的 $pd$ 值( $p$ 为放电气压、 $d$ 为放电间隔),增大放电区注入功率密度。对于提高此类型激光器的放电稳定性和输出激光功率是一种技术简单而有效的手段。

关键词: 脉冲预电离, 高功率横流CO<sub>2</sub>激光器。

## 一、引 言

Nighan<sup>[1]</sup>、Haas<sup>[2]</sup>等人对气体激光器放电稳定性理论和实验的研究表明了放电区中预电离对提高放电稳定性和输出功率具有有效的作用。而实际应用中,电子束预电离<sup>[3]</sup>、射频放电<sup>[4]</sup>确实产生了明显的效果,但这些方法都需要较复杂的技术且需价格昂贵的设备,另外,高能电子枪、射频的泄漏将对人身和环境产生不利影响。由TEA型CO<sub>2</sub>激光器上发展起来的脉冲预电离<sup>[5]</sup>,用于连续型器件同样获得成功<sup>[6]</sup>。由于其良好的预电离效果和技术上的简单可靠而不失为一种实用的方法。国内高功率CO<sub>2</sub>激光器通常采用直流自持放电,有些采用直流预触发<sup>[7]</sup>,也有利用多排放电针中前排对后排的预电离作用<sup>[8]</sup>。本文给出了在高功率CW CO<sub>2</sub>激光器上采用脉冲预电离的尝试和结果,分析了其中光电离作用的过程。在原自持直流放电的5kW级CO<sub>2</sub>激光器上进行脉冲预电离,大大提高了其放电稳定性、注入功率密度、 $pd$ 值及激光输出功率。

## 二、脉冲预电离过程分析

气体的放电击穿机制有多种,包括电子碰撞电离、电子崩引起光辐射而产生的光电离、离子碰撞电离、离子及亚稳态粒子碰撞阴极发出电子等过程。在高压短脉冲电场的情况下,主要击穿贡献来自前两种<sup>[9]</sup>。特别是光电离、空间中初始的电子在电场作用下定向运动形成电子崩而引起光辐射,使相当数量的气体分子发生电离,从而实现了初始的电子增加、继而进一步产生碰撞电离和光电离。

考虑如下模型<sup>[10]</sup>,空间存有少量电子,密度为 $\rho_0$ ,在脉冲场作用下引起光电离碰撞和电离,电子的碰撞电离系数为 $\alpha$ ,光电离产生的电子认为都是从阴极出发,系数为 $\gamma$ 。第一代电

流由  $\rho_0$  以及电离电子组成, 第二代电流由第一代的电离部分以及阴极上产生的光电子组成, 如此不断产生后继各代。用  $\xi = t/T$  表示时间, 其中  $T$  为电子在电极间的渡越时间, 阴极位置  $x=0$ , 阳极  $x=d$ 。若有电子流  $i(x, \xi)$ , 则它在外回路中引起的电流为

$$I_1(\xi) = \frac{1}{d} \int_0^d i(x, \xi) dx, \quad (1)$$

在阴极上引起的光电子流为

$$f_0(\xi) = i(0, \xi) = \gamma \int_0^d i(x, \xi) dx, \quad (2)$$

这些新的电子又产生新的光辐射和光电离<sup>[9]</sup>, 因此阴极上总的电子流为

$$f(\xi) = f_0(\xi) + \gamma d \int_0^\xi \exp\{\alpha d[1 + (\gamma/\alpha)](\xi - \eta)\} f(\eta) d\eta, \quad (3)$$

而引起外回路新增电流

$$I_2(\xi) = \int_{\xi-1}^\xi \exp[\alpha d(\xi - \eta)] f(\eta) d\eta. \quad (4)$$

由(1)式~(4)式即组成了描述各代电流发展的方程组, 首先考虑第一代电流。

当  $\xi \geq 0$  时, 初始的  $\rho_0$  引起电子流为

$$i(x, \xi) = \begin{cases} e\rho_0 v \exp(\alpha \xi d), & d \geq x \geq \xi d \\ 0, & \xi d \geq x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $e, v$  为电子电量和漂移速度。光电离产生的光电子流由(2)、(3)、(5)计算得

$$f(\xi) = (e\rho_0/T) \gamma d \exp(\alpha \xi d) \cdot \{(1 - \xi) + \gamma d[\xi - (\xi^2/2)]\}, \quad (6)$$

式中  $\gamma d$  较小, 取  $\exp(\alpha \xi d) \doteq 1$  以方便计算。外回路电流由  $I_1 + I_2$  组成, 将(5)代入(1), (6)代入(4)分别计算  $I_1, I_2$  然后相加得总电流

$$I(\xi) = (e\rho_0 d/T) \exp(\alpha \xi d) \{(1 - \xi) + \gamma d[\xi - (\xi^2/2)] + (\gamma d)^2 [(\xi^2/2) - (\xi^3/6)]\}. \quad (7)$$

第二代的初始电子由第一代产生的电子流  $f(\xi)$  构成, 重复上述计算过程得第二代电流

$$I'(\xi) = (e\rho_0 d/T) \gamma d \exp(\alpha \xi d) \left\{ (1/2)(\xi - 2)^2 + \gamma d \left[ (1/3) + (1/2)(\xi - 1) - (\xi - 1)^2 + (1/3)(\xi - 1)^3 \right] + (\gamma d)^2 \left[ (1/3)(\xi - 1) + (1/4)(\xi - 1)^2 - (1/3)(\xi - 1)^3 + (1/12)(\xi - 1)^4 \right] \right\}. \quad (8)$$

用同样的方法可以计算第三代及后继各代, 在脉冲电压高于气体击穿电压时, 各代电流变化的计算结果如图 1 中曲线 1 所示, 随着  $\xi$  增加, 电流逐渐增加, 各代电流间隔  $T$  一般由实验

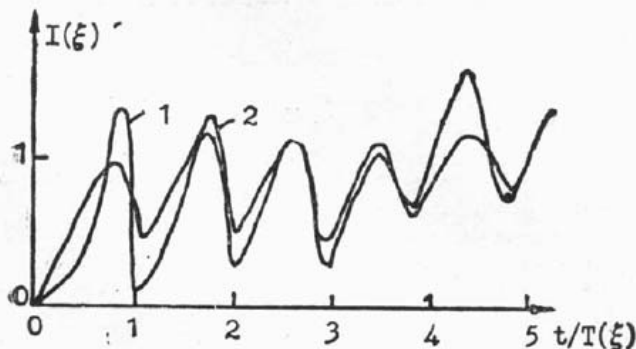


Fig. 1 The current development of pulse preionization. 1-Theoretical result; 2-Experimental result



Fig. 2 The damping oscillation of the current at the end of pulse

确定,本实验中  $T$  约为 100 ns,  $pd$  值为 40 cm·kPa。图中曲线 2 为实验结果,其周期性和时间量级正如理论所预料,但幅度相差较大,作者认为其原因主要在于所加脉冲并非理想的矩形波,而本身波形就有较大起伏,理论中是采用理想矩形波电场。图 2 的照片显示了在实验上脉冲结束处电流的衰减,约在脉宽 600 ns 之后,由于外加脉冲电场停止作用,外回路电流逐步衰减,但在衰减初期,由于电子崩的光电离仍在起一定的作用,从照片中可以明显地看到周期性的电流波动,但随着电子崩能量的降低和消失,此过程也逐步消失。

### 三、主放电与激光输出

#### 1. 电极结构

图 3 为激光器放电区结构。其中激光输出方向,放电方向与气流方向三轴相互正交,放电阳极为板条结构,阴极上游有一排脉冲预电离放电针,之后有三排主放电阴极针(本图中只画出一排),预电离产生的等离子体由气流带入主放电区放电。由于预电离的作用,主放电的场压比  $E/N$  值( $E$  为电场强度, $N$  为粒子密度)可以控制在较低的数值,因此,电离过程的作用减小,复合过程比重增大,放电稳定性相对于直流自持放电明显改善<sup>[5]</sup>。

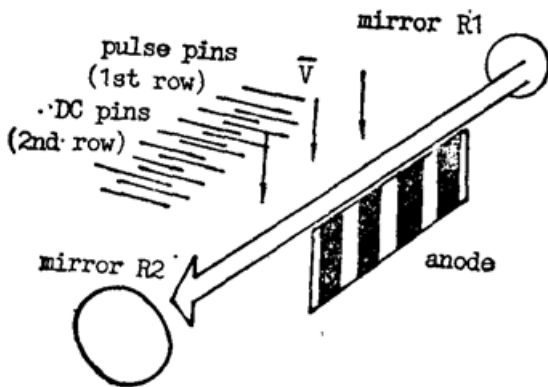


Fig. 3 The pin-plate discharge region of the laser,  $V$ -the gas flow direction.

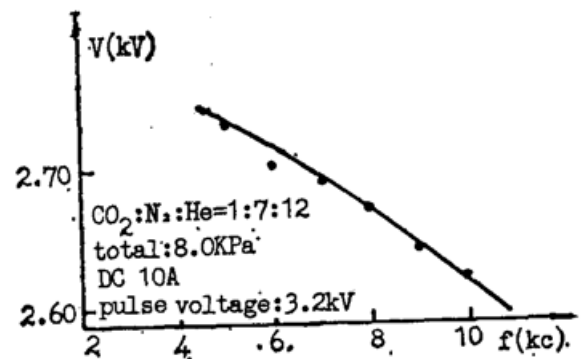


Fig. 4 The influence of pulse frequency on the voltage of DC discharge

#### 2. 预电离脉冲频率效应

图 4 给出了主放电电压随预电离脉冲频率的变化。在维持主放电电流不变的情况下,随着脉冲频率的升高,主放电电压下降,考虑放电电流密度  $j_e$  与电场  $E$  之间的关系。

$$j_e = en_e \mu E, \quad (9)$$

式中  $e$ 、 $n_e$ 、 $\mu$  分别为电子电量、密度和迁移率,在  $E$  变化不大的情况下, $\mu$  变化很小<sup>[13]</sup>,因此在电流密度  $j_e$  不变的情况下,预电离脉冲频率  $f$  升高即相当于预电离注入功率增大,预电离增强,电子密度  $n_e$  增大,由(9)式可以看出  $E$  将下降,也即主放电电压下降。

在图 4 中的频率若下降到 3 kHz 以下,则主放电开始发生不稳,继而出现弧光。这是由于预电离脉冲频率小于预电离等离子体的衰减频率  $f_a = n_e \beta$ ,  $\beta$  为等离子体复合系数。由于  $f < f_a$ , 预电离产生的等离子体由于本身的复合而在脉冲间隔内产生了预电离的空缺。主放电  $pd$  值较大,因此在预电离空缺段内将产生放电不稳。 $\beta$  值一般在  $10^{-7}$  左右<sup>[13]</sup>,而本实验中  $n_e$  范围为  $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , 因此  $f_a$  应在  $10^3 \sim 10^4 \text{ Hz}$ 。实验的结果为 3 kHz。

### 3. 激光输出

在原 5 kW CO<sub>2</sub> 系统上<sup>[11]</sup> 进行脉冲预电离放电出光实验。新的电极结构如图 3 所示。采用自持放电时的原电极间距和最大工作气压分别为 39 mm 和 6.7 kPa, 当采用脉冲预电离后, 在相同的气体比份的情况下, 最大电极间隔和工作气压达到 50 mm 和 14.0 kPa, 即  $pd$  值提高到 2.7 倍。最大注入放电区的电功率由原来 40 kW 提高到 86 kW。由于输出窗口透过率的限制, 选择在工作气压为 8.0 kPa, 而不是 10.7 kPa 进行激光输出实验, 激光功率可达 9 kW 以上。如图 5 所示。

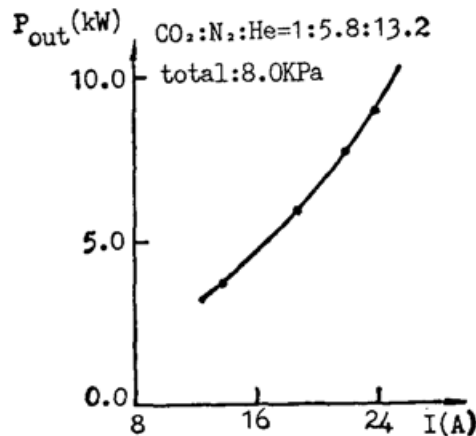


Fig. 5 The output power of laser vs. discharge current.

## 四、结 束 语

对脉冲预电离过程的分析表明, 其中光电离的作用与紫外预电离, 脉冲加强过程<sup>[14]</sup> 极为相似, 也有人称之为 PIE 型放电<sup>[6]</sup>。由于脉冲预电离对放电稳定性的作用, 改善了自持放电型激光器的性能, 大大提高了激光器的放电  $pd$  值、注入电功率和激光输出功率。另外, 由于其技术上的相对简单、因而具有推广价值。

感谢陆宾、赵国征同志在实验中给予的全力合作。

### 参 考 文 献

- [1] W. L. Nighan *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1974, **10**, No. 3 (Sep), 922~945.
- [2] R. A. Haas; *Phys. Rev. (A)*, 1973, **8**, No. 2 (Aug), 1017~1043.
- [3] C. A. Fensermacher *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**, No. 2 (Jan), 56~60.
- [4] H. E. Hugel; *Proc. SPIE.*, 1986, **650**, 2~9.
- [5] J. P. Reilly; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 8 (Aug), 3411~3416.
- [6] A. K. Nath *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**, No. 2 (Feb), 268~274.
- [7] 王哲恩等;《激光》, 1980, **7**, No. 7 (Jul), 1。
- [8] 李同宁等;《中国激光》, 1985, **13**, No. 1 (Jan), 56。
- [9] A. von Engel; *Ionized Gases*, (Oxford University Press, 1965, 2th ed), 205~211.
- [10] H. Schlumbohn; *Z. Phys.*, 1960, **159**, 212.
- [11] 毛英立等;《光学学报》, 1990, **10**, No. 2 (Feb), 119~123。
- [12] B. E. Cherrington; *Gaseous Electronics & Gas Lasers*, (Oxford, Pergamon Press, 1979), **115**.
- [13] J. J. Lowke *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, No. 10 (Oct), 4664.
- [14] H. J. J. Seguin *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, No. 7 (Apr), 418.

## Study of pulse preionization of high power CW CO<sub>2</sub> laser

MAO YINGLI, CHENG ZHAOGU, WANG RUNWEH, DENG ZHI AND WANG ZHIJIANG  
(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 15 May 1990; revised 6 May 1991)

### Abstract

The experimental and theoretical studies on the pulse preionization of high power CW CO<sub>2</sub> laser are presented in this paper and the photoionization process is emphasized. The results show that the pulse preionization can significantly increase the  $p*d$  value of the discharge, the input power density and the laser output. It is proved to be a simple but effective method for increasing power ability and improving discharge stability of a high power CW CO<sub>2</sub> laese.

**Key words:** pulse preionization, high power CO<sub>2</sub> laser.