

文章编号: 1001-4322(2004)06-0697-04

# 紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器放电特性的实验研究\*

李小芬, 左都罗, 陈冰, 程祖海

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 横向激励大气压(transversely excited atmospheric, TEA) CO<sub>2</sub> 激光器的放电稳定性是决定该类型激光器应用效果的关键因素。通过对采用电感充放电电路的紫外预电离激光器的实验研究, 得到了激光器放电动态过程的规律, 并发现残余振荡是主放电后发生弧光放电的主要原因。实验中采用不同配比的气体, 并对电感充放电电路与改进后的硅堆充放电电路进行了比较。实验结果表明: 增加充电电感值可以降低主放电结束后储能电容上的残余电压; 而采用硅堆放电电路在主放电后仅有相对幅值很低的稳定残压, 两种方案都大幅度抑制了弧光放电的形成, 有效地提高了激光单脉冲能量。

**关键词:** 激光技术; TEA CO<sub>2</sub> 激光器; 放电特性; 输出特性

**中图分类号:** TN248.5

**文献标识码:** A

TEA CO<sub>2</sub> 激光器诞生于 20 世纪 70 年代初, 由于其具有高单脉冲能量、高峰值功率、可高重复率运行等特点, 在工业和科研中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。而放电稳定性是影响激光器性能的决定性因素之一, 除工作气体状态外, 放电稳定性还与预电离和放电电路等要素密切相关<sup>[2~11]</sup>。火花紫外预电离和简单充放电电路以其简单可靠的特点, 在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器中得到了广泛的应用。

图 1 给出了一种采用火花紫外预电离和简单充放电电路的激光器的电路,  $C_s$  表示储能电容,  $C_{pre}$  表示预电离电容。该电路采用电感  $L_{ch}$  作为充电时的旁路元件和放电时的高频阻断元件(以下简称为电感充放电电路), 在不少文献中, 这一电感被电阻代替<sup>[12]</sup>。采用电感的优点是: 对低频工作的充电过程基本没有影响, 对高频工作的放电过程能有效地起到阻断的作用。

对采用电感充放电电路的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的放电实验研究发现: 放电电压波形尾端不可避免地出现振荡, 这种振荡严重影响了气体放电的稳定性, 限制了单脉冲能量的提高。为此, 我们尝试了增加充电电感值和采用硅堆充放电电路来改善放电的稳定性。

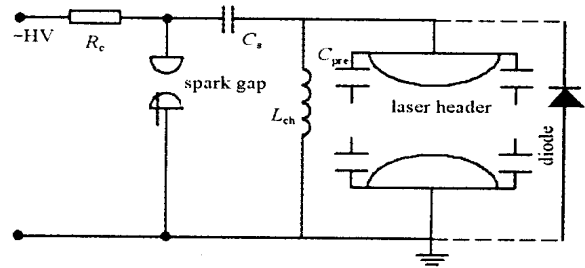


Fig. 1 Principle circuit of discharge circuit

图 1 激光器放电电路简图

## 1 实验装置

实验所用 TEA CO<sub>2</sub> 激光器主放电电极为近罗可夫斯基铜板电极。阴阳极板两侧各布置由 17 对用 500pF 电容耦合的钨针组成的火花放电阵列, 每对钨针的间距 6mm。该火花阵列产生强烈的紫外光辐射, 使整个放电体积形成体预电离。放电区激活体积为 3cm × 4cm × 61cm, 其中两电极板间距为 3cm。为了保证放电回路的分布电感尽可能小, 回路连线采用短的宽铜带。

用 Tektronix 公司的 P6015A 高压探头和 TDS430 数字示波器测量激光器阴阳极板间的放电电压。由于主电极和预电离电极在机械结构上紧密连接, 二者置于激光头中, 由一宽铜皮与外部连接, 故直接测量通过主电极的放电电流比较困难。实验中用阻抗匹配的高频同轴电缆和罗可夫斯基线圈<sup>[13]</sup>测量主放电和预电离电流之和, 即流经激光头的电流。激光脉冲经分束后, 其脉冲能量采用 Molectron 公司的 J25 焦热电探头和分束技术进行测量。

## 2 实验结果

### 2.1 电感充放电电路的典型实验结果

\* 收稿日期: 2003-09-26; 修订日期: 2004-01-09

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 航天科技创新基金资助课题

作者简介: 李小芬(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事高功率激光器的研究; E-mail: freesky572@163.com。

激光器的充放电基本过程如下:球隙未导通时,直流高压源通过  $R_c$  和  $L_{ch}$  对储能电容  $C_s$  充电;充电结束,球隙触发导通,电路处于放电状态;放电结束并且球隙关闭后,进入下一次充电过程。当工作气体配比为  $V(CO_2) : V(N_2) : V(He) = 1 : 1 : 4$  (体积比,下同)时,所得到的典型的稳定放电电压波形和流经激光头的放电电流的波形,如图 2 所示。 $U_c$  表示电压源提供的充电电压。从图 2(a) 中可以看到,激光器放电过程明显地分为四个阶段:(1) A 点,预电离火花隙击穿,预电离开始,由于回路分布电感和电阻的存在,放电电极两端电压迅速降低,预电离火花隙击穿后,预电离电容  $C_{pre}$  开始充电,放电电极两端电压又开始升高;(2) 电压上升至 B 点后,主放电区形成电子雪崩,主放电开始,由于主放电电流的快速增长,主放电电压再一次下降到一较低的水平,但这时主放电区已经形成了相当高的电子数密度;(3) 当放电电压再次上升到 C 点的水平时,自持辉光放电开始;(4) 至 D 点,自持辉光放电基本结束,残余电荷开始衰减振荡。典型的残余电荷衰减振荡波形如图 2 (b) 所示,其周期主要取决于储能电容  $C_s$  和充电电感  $L_{ch}$ 。当  $C_s = 0.25\mu F$ ,  $L_{ch} = 50\mu H$ ,  $U_c = 20 kV$  时,实验得到衰减振荡的周期约为  $24\mu s$ ,衰减振荡总时间约为  $80\mu s$ 。

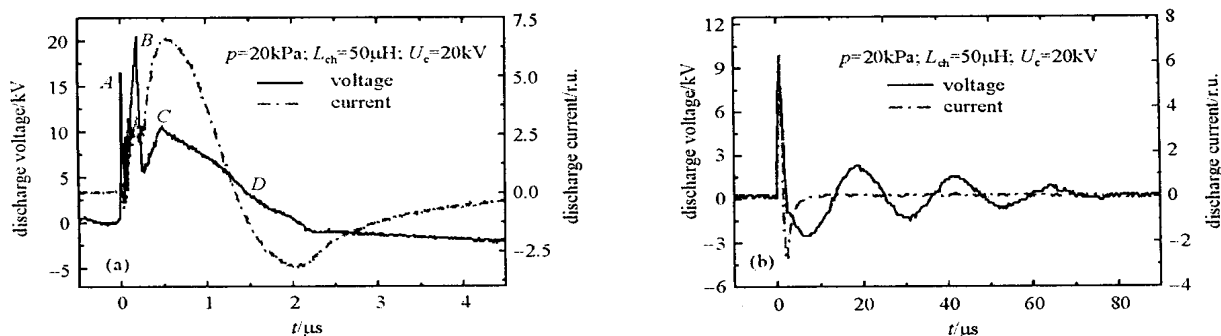


Fig. 2 Typical discharge voltage and current in the stable state, (a) part waveforms, (b) whole waveforms

图 2 典型的稳定放电电压和电流波形

图 3 给出了不稳定放电电压的典型波形。其中,图 3(a) 表示一种主放电时发生弧光放电的典型电压波形,在  $1.6\mu s$  处,辉光放电突然演变成弧光放电,电极板电压迅速下降,电容上的能量以快速振荡的方式消耗干净。消除这种不稳定现象要从改善激光器放电条件着手,如选择合适的工作气压、充电电压、以及和预电离电容匹配的充电电容等。图 3(b) 为典型残余过程起弧波形,实验发现这种现象更为常见,它的起因是:主放电结束后放电区仍存在少量不均匀分布的带电粒子,而且放电区温度已升高,当残余振荡电压高于某一水平时,主放电区局部击穿,导致起弧。从图 3 可看出:发生这种弧光放电时,主放电已经完结,虽然对激光脉冲的形成没有太大的影响,但使工作气体离解变性,影响气体的工作寿命,加速了放电不稳定性的发展。

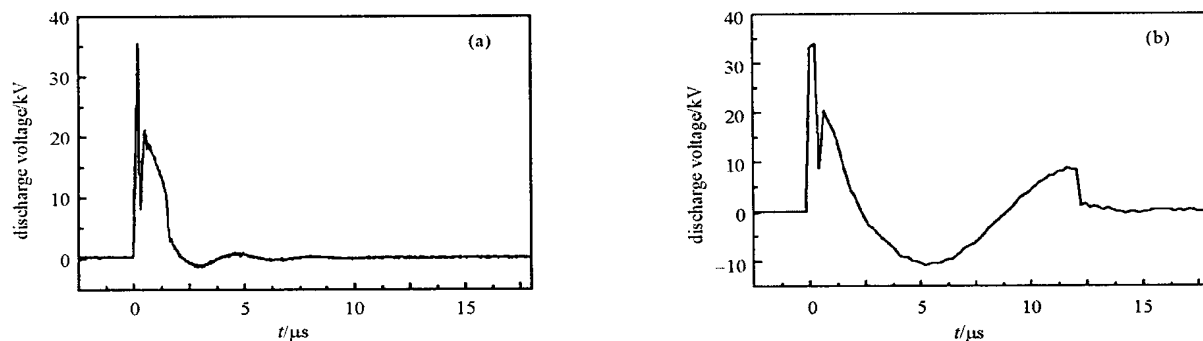


Fig. 3 Voltage waveforms of unstable discharge during the main discharge (a) and the survival discharge process (b)

图 3 典型不稳定放电波形

综合上述激光器放电动态过程和不稳定放电现象的分析,我们认为主放电电压尾端的残余振荡是电感充电电路不稳定放电的主要原因,如果尽量降低主放电后的残压,或者消除主放电后的振荡,就有可能使主放电后的弧光放电机会降至最低。

## 2.2 采取改善措施后的实验结果

采用分别为  $15, 50, 100$  和  $200\mu H$  的充电电感进行实验,发现在其它实验条件不变的情况下,充电电感的改变对放电电压和电流波形的影响不大,但会明显改变放电电压尾端的残压和放电稳定性,一般说来,充电电

感越大,电压尾端残压越低,放电稳定性越好。图 4(a) 给出了采用不同充电电感得到的典型的放电电压全局波形,由图可看出:电感为 50 $\mu$ H 时的残压振荡频率和残压幅值均高于 100 $\mu$ H 的情况。

如前所述,电感充放电电路对电感的要求是充电时低频导通,放电时高频阻断。这一要求的极限即是硅堆的特性。Serafetinides 等人<sup>[14]</sup>的 SiC 预电离放电电路就采用了硅堆作旁路和隔断元件。用图 1 中虚线表示的高压硅堆二极管代替图 1 中的充电电感  $L_{ch}$ ,就得到了我们的硅堆充放电电路。图 4(b) 给出了采用硅堆充放电电路得到的典型放电电压波形,主放电之后的残余电压波形是一条电位较低的平滑曲线,其残压值约 2kV,而图 4(a) 中采用 50 $\mu$ H 的电感电路测得的残压为 7.5kV,如 A 点所示,这是由于高压硅堆只能单向导电的缘故。可见,硅堆充放电电路不仅可以完全消除电感充放电电路尾端的振荡,而且可以极大地降低主放电之后的残压。

增加充电电感值和采用硅堆充放电电路都有利于减少主放电之后的弧光放电及改善激光器的放电稳定性。另外,采用单向导电开关氩闸管代替球隙开关实验,也实现了消除放电电压尾端振荡的目的,但采用氩闸管成本较高,综合效益不及上述两种措施。

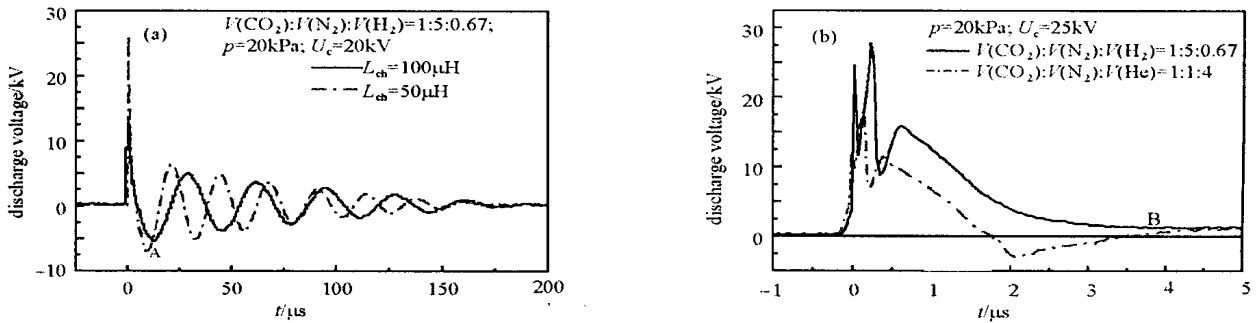


Fig. 4 Waveforms of discharge voltage under different circuits  
图 4 不同电路下的放电电压波形

### 2.3 输出特性实验结果

一般说来,激光器放电稳定性越好,输出激光脉冲能量也越高,据此特点可检验上述改善措施对激光器放电特性的影响。选用配比为  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:1:4$  和  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{H}_2)=1:5:0.67$  的两种工作气体做激光器输出特性的比较实验,工作气压均为 20kPa,激光器采用平凹腔,输出窗选用透过率为 40% 的 GaAs 平平镜,所得结果示于图 5。由图 5 可知:(1)增加充电电感对提高激光单脉冲能量具有明显的效果,充电电感由 50 $\mu$ H 增加到 100 $\mu$ H 时,两种工作气体的输出特性曲线几乎平行上移,当充电电压为 22 kV 时,含 He 气体产生的光脉冲能量增加约 6.7%,含 H<sub>2</sub> 气体的增加约 12.4%,但实验同时发现,激光脉冲的能量并不是随着充电电感量的增加而线性增加的,当电感大于 200 $\mu$ H 时,激光脉冲能量几乎不再增加,可见,借助增加充电电感值来改善激光器输出特性的作用是有限的;(2)采用硅堆充放电电路时,含 H<sub>2</sub> 工作气体的输出能量显著提高,相对于充电电感为 50 $\mu$ H 的情况,在充电电压为 22kV 时,激光单脉冲能量增加约 40.7%,而含 He 工作气体的输出能量没有发生明显变化。

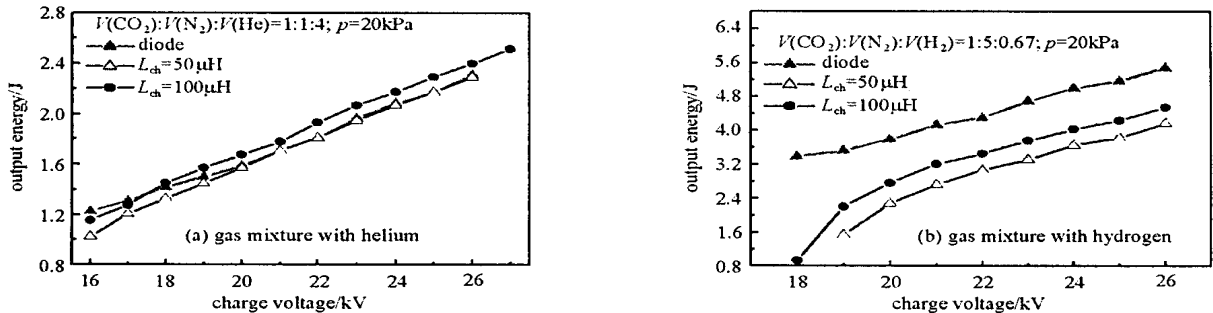


Fig. 5 Output characteristics of different circuits

图 5 不同电路条件下激光输出能量与充电电压的关系

不同工作气体在采用了两种改善措施后的实验中表现出较大差异,其原因在于:20kPa 的含 He 的工作气体,在实验的电压范围内已很好地击穿,储能电容的能量在很短的时间内经过主放电区释放,因此在放电电路

中采用电感或硅堆没有明显区别。而 20kPa 的含 H<sub>2</sub> 工作气体则不容易被击穿。采用电感充放电电路时,储能电容的能量容易通过电感释放。通过电感释放的能量,随电感增大而减小,因此单脉冲能量随充电电感的增大而增大。而采用硅堆放电路,储能电容的能量不能经过硅堆释放,主放电极两端维持较高电压的时间较长,气体的击穿程度加强,因此单脉冲能量相对于电感充放电电路能有较大提高。

### 3 结 论

本文研究了采用简单电感充放电电路作为激励电路的紫外预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的放电特性。研究结果表明:电路中的充电电感使放电电压尾端产生明显的振荡,导致激光器的放电特性变差,影响了输出性能。增加充电电感的电感值,可以降低主放电后储能电容上的残压,而用高压硅堆代替充电电感则可以完全消除电感充放电尾端的振荡,大幅度改善气体放电特性。用含 He 和含 H<sub>2</sub> 两种不同配比的工作气体试验,所得到的结果验证了上述结论。同时发现,这些改进措施对使用击穿电压高的含 H<sub>2</sub> 工作气体的实验特别有利,能提高激光单脉冲输出能量。

### 参考文献:

- [1] 楼祺洪,徐捷,傅淑芬,等.脉冲放电气体激光器[M].北京:科学出版社,1993.391-420. (Lou Q H,Xu J,Fu S F,et al. Gas laser with pulsed discharge. Beijing:Science Press,1993.381-420)
- [2] 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.
- [3] Serafetinides A A, Tsirikas G N, Atanasov P A. Plasma cathode TEA Ar laser development[J]. *Optics and Laser Technology*,1998,**30**:159-162.
- [4] Bruno W. Surface corona discharge preionisation of gas-flow TEA lasers[J]. *J Phys E: Sci Instrum*,1987,**20**(7):457-458.
- [5] Midorikawa K, Wakabayashi K, Nakamura K, et al. Discharge parameters of a high-pressure, ultraviolet-preionized, transversely excited CO<sub>2</sub> laser[J]. *J App Phys*,1982,**53**(5):3410-3416.
- [6] 吴谨,万重怡.紫外预电离 TE(A) CO<sub>2</sub> 激光器自持辉光放电的阻抗计算[J].激光杂志,2002,**23**(2):15-17. (Wu J, Wan C Y. Calculation of the glow discharge impedance of UV-preionized self-sustained TE(A) CO<sub>2</sub> laser. *Laser Journal*,2002,**23**(2):15-17)
- [7] Persephonis P, Giannetas V, Parthenios J, et al. Optimization of the optical output in a C-to-C pulsed gas laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*,1995,**31**(6):1059-1063.
- [8] 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.
- [9] You T Y, Tham K K, Siew W O, et al. Circuit modeling of a two-stage Blumlein-driven TEA N<sub>2</sub> laser[J]. *Meas Sci Technol*,1998,**9**:1247.
- [10] Biswas D J, Nilaya J P, Chatterjee U K. Latch proof operation of a switch of a high repetition rate laser with dc resonant charging[J]. *Rev Sci Instrum*,1995,**66**(10):4813-4816.
- [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. (Xi H J, Liu J S, Chen Z Z, et al. Investigation of a UV preionized TEA CO<sub>2</sub> laser and discharge characteristics. *Laser and Infrared*,1989,**19**(3):34-37)
- [12] Michael V D, Dietemar E R. Coupled gas discharge and pulse circuit analysis[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*,1991,**19**(2):329.
- [13] 王龙华,王晓红,刘晶儒.放电泵浦准分子激光器电路参数测定[J].强激光与粒子束,1994,**6**(3):477-480. (Wang L H, Wang X H, Liu J R. Measurement of the circuit parameters in a XeCl excimer laser. *High Power Laser and Particle Beams*,1994,**6**(3):477-480)
- [14] Serafetinides A A, Papadopoulos A D, Rickwood K R. SiC preionised TEA nitrogen and carbon dioxide lasers[J]. *J Phys E: Sci Instrum*,1987,**20**:917-920.

## Experimental study on discharge characteristic of a UV-preionized TEA CO<sub>2</sub> laser

LI Xiao-fen, ZUO Du-luo, CHEN Bing, CHENG Zu-hai

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The discharge stability is crucial to the application of a transversely excited atmospheric (TEA) CO<sub>2</sub> laser. The dynamic discharge process of a UV-preionized TEA CO<sub>2</sub> laser with a charge-discharge-circuit including an inductance was investigated experimentally. The results show that the transit from glow discharge to arc discharge is correlative with the rudimental vibration after the main discharge. Two methods are carried out to avoid the transition to arc discharge: one is to increase the charge inductance, and the other is to replace the charge inductance by a high voltage diode. Both methods can improve the discharge stability and increase the pulse energy effectively.

**Key words:** Laser technology; TEA CO<sub>2</sub> laser; Discharge characteristics; Output characteristics