

TEA CO₂ 激光器中气体组分对 放电状态的影响

高桂珍 文建国 蔡德芳

陈 阳 过巴吉 过 振

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 采用自制实时取样系统及四极质谱仪测量 TEA CO₂ 激光器放电过程中气体组分变化, 分析了测量结果对 TEA CO₂ 激光器放电状态的影响.

关键词 TEA CO₂ 激光器.

1 引 言

作者曾报道过小型封离式 TEA CO₂ 激光器的寿命研究^[1]. 高压脉冲 TEA CO₂ 激光器寿命终止的重要标志经常表现为放电的不稳定性, 从均匀的辉光放电瞬变为局部的弧光放电, 而使输出能量骤然跌落. 并且一旦出现弧光, 则后续放电中弧光的几率将以极大的速率增加, 继而使激光器无法工作.

由于 TEA CO₂ 激光器在放电过程中的 CO₂ 的不断分解, 当 O₂ 的浓度逐渐增大时, O₂ 产生 O⁻ 的速率比其它气体要大一个数量级以上, 由 O₂ 直接或间接产生负离子的速率也会变大, 因此放电等离子体中其它各种负离子密度都要大大增加. 为了抑制弧光, 控制负离子密度的途径为: 减少 O₂ 的浓度; 加快对 O⁻ 的去附着速率. 因为在放电过程中, 工作气体组分不断改变, 从而影响激光器的输出特性和放电特性. 开始工作阶段, 由分解引起 CO₂ 含量的减少, 使激光器输出功率下降, 但放电仍保持在稳定辉光放电状态; 工作一段时间后, O₂ 与各种负离子的含量增加, 影响到激光器放电状态, 在稳定的辉光放电中逐渐出现部分弧光放电, 进而发展到弧光占统治地位, 导致 TEA CO₂ 激光器寿命的终止^[2,3].

2 实验装置

实验装置如图 1 所示. TEA CO₂ 激光器放电管两端具有进气管和出气管, 使放电管和循环系统相连, 循环泵使工作气体不断循环以适合于重复率下工作, 并可适时将放电管内工作气体送入毛细管 5, 再通过减压管 4 二次减压进入质谱规管 2, 高纯氮气是为校正质谱仪和

比较基准而设置. 由于放电管工作气体气压为 0.1 Mpa, 而质谱室要求被测气体气压为 1.3×10^{-2} Pa, 进入放电管的工作气体由毛细管先通过减压管, 减压后再进入质谱室, 故称为减压法.

本分析系统有两个独到之处. 其一是循环泵将工作气体即时泵至毛细管, 而进入质谱室, 与通常的气体扩散法相比, 大大缩短了质谱图与反映的放电状态的时间差. 所以能适时测量工作气体组分在放电过程中的微量变化. 其二是毛细管为实时取样的微量空间, 空间体积为 4×10^{-1} mm³. 而包括放电管在内的全系统空间体积为 6×10^6 mm³, 每次取样量只占全系统的 7×10^{-6} , 由取样造成的气体损失微不足道, 不会影响正常放电状态, 使得该系统能在放电过程中连续、多次取样.

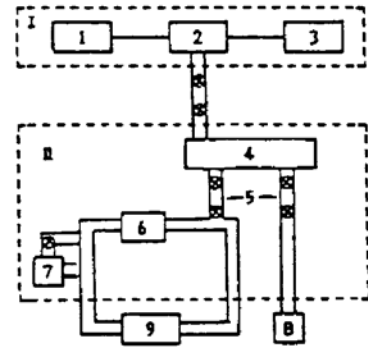


Fig. 1 The instant sample survey and mass spectrometer system

3 实验和分析

首先, 将单种气体 CO₂、N₂、He、H₂ 分别充入质谱规管, 对它们逐个进行质谱扫描, 测得 CO₂ 分子的主峰为 44, 碎片峰为 12、16、18; N₂ 分子的主峰为 28, 碎片峰为 14; He 的主峰为 4, 由于 He 很稳定, 未测到碎片峰; 受仪器灵敏度限制, H₂ 峰未测出. 然后在激光器中充入 H₂:CO₂:N₂:He=0.06:1:1:3, 总气压为 0.1 MPa, 将其送入质谱规管, 扫描出质谱图, 测得 CO₂、N₂、He 的主峰及它们的碎片峰, 如图 2, 所得结果和单种气体扫描谱相同. 并做了二组放电实验.

第一组放电参数条件为: 工作气体 H₂:CO₂:N₂:He=0.06:1:1:3, 总气压 0.1 MPa、放电电压 23 kV、工作频率 5 Hz, 工作气体在系统内循环, 通过常温催化剂. 放电上千次之后, 进行质谱扫描, 在质谱图上观察到 O₂ 峰, 其质谱精细结构如图 3 所示. 显然, 在放电过程中, O₂(32)峰从无到有, 急剧上升.

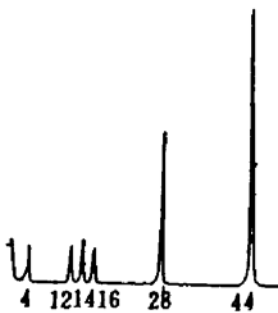


Fig. 2 The mass spectrum of mix gas of helium nitrogen and carbon dioxide

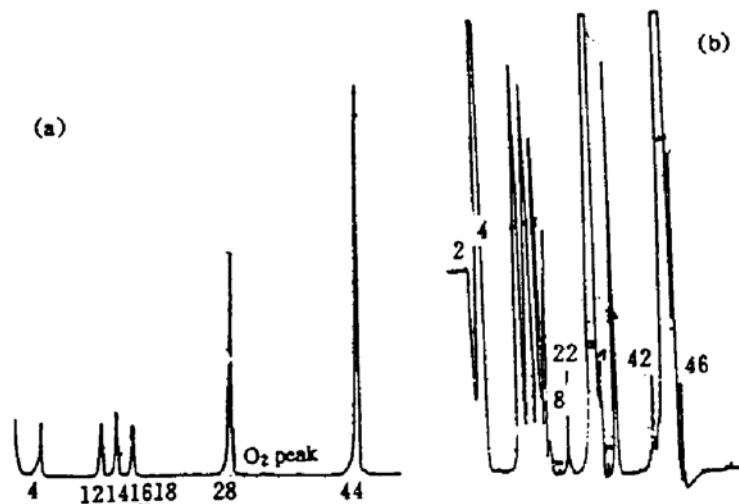


Fig. 3 (a) The mass spectrum after (b) The mass exact spectrum thousand discharges

图 4 为有 H₂ 时工作气体组分随放电次数的变化曲线. 当放电脉冲接近 8×10^3 次后, O₂

峰又骤然下降, 放电脉冲超过 20×10^3 次后, O_2 峰趋于平衡, 并且变得很小; 在放电过程中, $CO_2(44)$ 峰开始阶段呈下降趋势, 以后逐渐达到平衡.

图 5 为在此实验条件下, 激光器相对输出能量随脉冲放电次数变化的曲线: 随着放电继续, 开始时 CO_2 以分解为主, 使激光输出能量逐渐下降, 在 7×10^3 次附近下降近 30%, 以后由于 CO 与 O_2 复合作用和 H_2 的去附着效果, 逐渐达到动态平衡, 维持正常辉光放电, 能量输出稳定, 脉冲放电超过 3×10^5 , 会偶有弧光, 几率小于 2%, 放电可达 10^6 次以上.

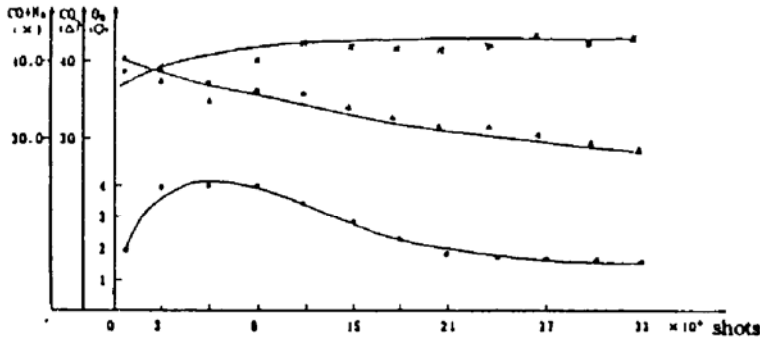


Fig. 4 The variation of gas composition with shots

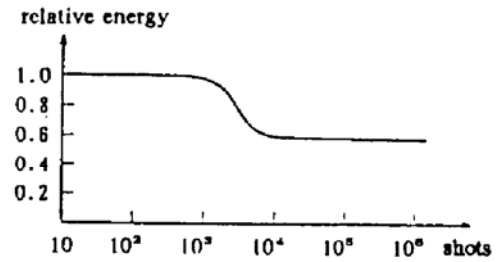


Fig. 5 The variation of the laser output power with shots

第二组放电参数条件为: 工作气体 $CO_2:N_2:He = 1:1:3$ 、总气压 0.1 MPa、放电电压 23 kV、工作频率 5 Hz. 放电过程中, 工作气体组分变化曲线如图 6 所示, 附着 $CO_2(44)$ 峰逐渐下降, $O_2(32)$ 峰上升, 而且速率变大, 放电脉冲超过 2×10^3 次便出现弧光, 且几率变大, 约 3×10^4 次时几率超过 50%.

脉冲放电的 TEA CO_2 激光器中, CO_2 分解和复合过程较 CW CO_2 激光器要复杂得多. 实验用激光器的电脉冲宽度 $\Delta t = 50 \mu s$ 、脉冲间隔 $\Delta T =$

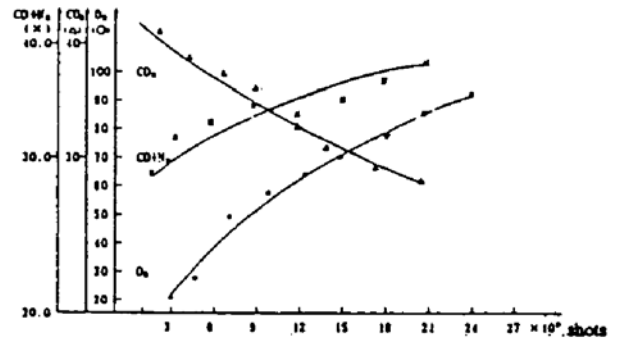


Fig. 6 The variation of gas composition as a function of laser operation without H_2

200 ms, 放电占空比为 2.5×10^{-4} . CO_2 分解过程只在 50 μs 内发生. 此期间内, 脉冲电压从零开始, 逐渐上升, 电极之间的自由电子逐渐加速并使工作气体开始电离, 当电压超过电极之间气体的击穿电压时, 气体由非自持放电过渡到自持放电, 自由电子骤然加速和增多, 气体工作电流骤然增大, 达到峰值, 随着施加电压下降和结束, 电流也逐渐减小和停止. 此期间, 自由电子的密度和能量、时间分布都不均匀, 呈脉冲形式; 受电极间场强影响, 自由电子空间分布也不均匀; 因此 CO_2 分解速率具有极不均匀的时间分布和空间分布.

对 CO 和 O_2 的复合过程, 在放电和间隔的两个期间内都发生. 放电时 CO_2 分解速率较大, CO 和 O_2 以及其他粒子运动速率很快, 复合速率较大, 这是一个快过程. 因为脉冲宽度窄, 受扩散速率限制, 该过程主要发生在放电空间, 虽然放电时间短暂, 然而复合过程的主导过程; 在间隙期间, 放电区内温度骤然下降, 同时工作气体由放电空间逐渐流向全空间系统, 复合过程在全空间内进行, 复合速率逐渐变慢而成为慢过程. 在本实验中, 间隙宽度为放电脉冲宽度的 4×10^3 倍, 复合速率虽慢但过程很长, 复合效果不可低估.

在 TEA CO_2 激光器中, 这种 CO_2 的分解反应主要发生在脉冲放电期间, 而复合反应则发

生在脉冲放电和间隙这两个期间的现象,与在连续 CO₂ 激光器中发生的分解和复合过程是很不相同的,前者要复杂得多。

图 4 和图 6 所示结果有两点要说明:其一,在 TEA CO₂ 激光器系统中,放电空间的放电电流并非处处均匀,工作气体组分的空间分布也是不均匀的,本实验并未测得空间各处的气体组分,而只是将全系统气体混合后再送入质谱仪进行检测,所以图示结果为气体组分的空间平均值。其二,TEA CO₂ 激光器为脉冲放电,即使在放电期间,放电电流在时间上也不是恒定的,所以气体组分在时间上很不均匀,本实验并未测量气体组分的时间分布,图 4 和图 6 结果为经过许多次脉冲之后气体组分的时间平均值。

在放电起始阶段,CO 和 O₂ 含量不高,复合效果不显著,此时气体组分的变化主要由分解过程决定,CO₂ 呈指数递减,而 O₂ 也呈指数递增,见图 4 和图 6。但随着放电过程继续,CO 和 O₂ 含量增加,其复合作用逐渐显著,特别是间隔期间的复合过程将加快,此时气体组分的变化将由分解过程和复合过程共同决定,CO₂ 和 O₂ 的变化速率明显改变,工作气体中无 H₂ 时, O₂ 组分逐渐上升,并趋于饱和。工作气体充 H₂ 时,开始阶段 O₂ 组分逐渐上升,当放电脉冲超过 7×10^3 次后,呈下降趋势,其重要原因是 $H_2 + O^- \rightarrow H_2O + e$ 。从实验可知,气体组分的改变直接影响到激光器工作状态,在开始阶段 CO₂ 组分减小,使输出功率下降,但放电仍保持在稳定辉光放电状态,当脉冲次数超过某一范围,放电将出现弧光,而导致激光寿命终止。其原因是:随放电过程继续, O₂ 浓度不断提高,当 O₂ 的浓度比较大时,由 O₂ 产生的 O⁻ 的速率比其它气体要大一个数量级以上,在此情况下,放电等离子体中具有最大密度的负离子可能是 O⁻ 和随之而产生的负离子簇形物 CO₃⁻、CO₄⁻ 等,因此放电等离子体中各种负离子密度都会有较大的提高,此时电子损失主要是由附着过程引起,这个值要远大于以复合为主的值,大量负离子的存在,将使放电产生收缩而形成弧光。实验还发现,在工作气体中加入适量高纯 H₂,放电的弧光几率极小,工作寿命提高三个数量级;因为除了 H₂ 能使 O₂ 的含量下降外,更主要的是: H₂ 对 O⁻ 是高结合附着速率的气体,加入 H₂ 可加快对 O⁻ 的去附着,减少 O₂ 的浓度。

在不同放电电压下 O₂ 含量随放电脉冲次数的变化曲线,见图 7 所示。在正常辉光放电情况下, O₂ 峰的上升速率和放电电压的高低成线性关系,放电电压越高, O₂ 峰上升速率越大,这是因为电压越高,电极间电场越强,电子动能越大,CO₂ 分子受撞击分解的几率越大。上述结果同放电电压越高,弧光几率越大的实验结果是一致的。

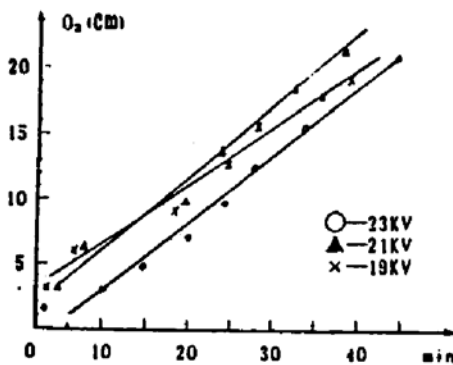


Fig. 7 The variation of O₂ as a function of discharge voltage

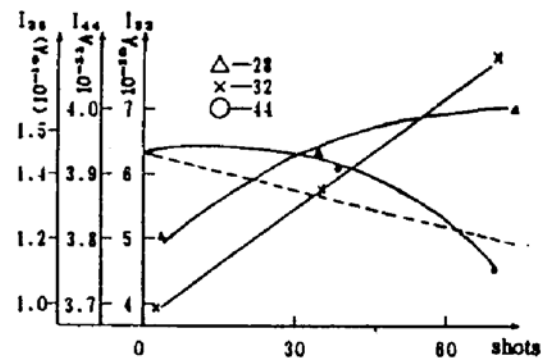


Fig. 8 The variation of gas composition as function of arc discharge

在弧光放电条件下, O_2 含量随弧光放电次数变化曲线, 如图 8 所示. 实验表明, 弧光放电时, O_2 含量将随弧光放电次数增加而急剧上升, 这是因为弧光时输入电通道被压缩在极小的窄区域里, 外电路能量不可能有效地注入到激光介质中去, 因而出现输出能量的陡然下降, 甚至为零, 其注入能量全部变成热能, 造成该窄区内的气体处于高温高热状态, 从而产生极高速电子, 进一步加速 CO_2 分子的分解. 并且在高温情况下, CO_2 和其它中性分子的热运动加剧, 它们之间的碰撞也可造成 CO_2 的较快分解. 基于上述原因, 致使 O_2 的含量急剧上升. 实验又发现, 若在均匀辉光放电中, 一旦出现弧光, 则后续脉冲放电中出现弧光的几率将以极大的速率增加, 甚至弧光几率接近 100% (图 9), 而造成 TEA CO_2 激光器寿命终止. 图 8 和图 9 两实验结果是一致的.

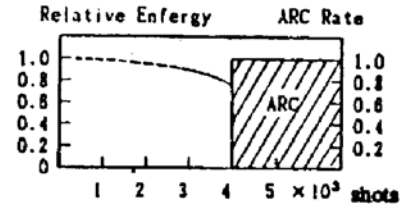


Fig. 9 The pulse output energy decreasing and the probability of arc increasing with laser operation

结 论 通过实时取样系统和四极质谱仪对 TEA CO_2 激光器气体组分变化的实验和分析得出:

- 1) 当工作气体为 $CO_2:N_2:He=1:1:3$ 时, O_2 含量呈指数增长, 当脉冲次数超过 1×10^3 次, 即出现弧光.
- 2) 当工作气体为 $H_2:CO_2:N_2:He=0.06:1:1:3$ 时, O_2 含量开始呈指数增长, 超过 7×10^3 次后逐渐下降, 最后趋于动平衡, 均匀辉光放电次数超过 10^6 次.
- 3) 放电电压与 CO_2 分解速率成线性关系, 电压越高, CO_2 分解相对速率越高.
- 4) 弧光放电下, CO_2 分解速率比辉光放电时高两个数量级.

参 考 文 献

- [1] 过 振, 俞之圻, 高桂珍, 小型 TEA CO_2 激光器. 光学学报, 1986, 8(9): 796~800
- [2] R. A. Hass, Plasma stability of electric discharges in molecular gases. *Phys. Rev. A.*, 1973, 8(2): 1018
- [3] W. L. Nighan, W. J. Wiegand, Influence state of negative-ion processes on steady-state properties and striations in molecular gas discharges. *Phys. Rev. A.*, 1975, 10(3): 922

Influence of Gas Composition on Discharge State in TEA CO_2 Laser

Gao Guizhen Wen Jianguo Cai Defang
Chen Yang Guo Siji Guo Zhen

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 11 May 1993; revised 12 July 1993)

Abstract The gas composition during discharge process in TEA CO_2 laser has been measured using a realtime system built by us and a four-pole mass spectrometer. Influence of the gas composition on the discharge state in TEA CO_2 laser has been analyzed.

Key words TEA CO_2 laser.