

CO₂ 激光器早期过程的直接质谱诊断

王欲知 刘建生

(成都电讯工程学院)

提要: 用特殊工艺制作了一个平面型玻璃微小孔(孔径 10~20 μm), 配合抽速为 450 l/s 的涡轮分子泵, 实现高达 7 个数量级的差分效果。对 300 mm 波导型 CO₂ 气体激光管及 800 mm 普通 CO₂ 气体激光管, 进行早期过程的直接质谱诊断, 得到了一系列结果。

Direct analysis of gas components in CO₂ lasers during their early working period

Wang Yuzhi, Liu Jiansheng

(Chendu Institute of Radio Engineering)

Abstract: An extremely small hole of about 10~20 μm in diameter was made in a glass plate with special technology. A differential action of seven orders in pressure ratio was achieved with this hole and a turbo-molecular pump of 450 l/s. Using this system, direct analysis of gas components in 300 mm wave guide CO₂ lasers and 800 mm normal type has been performed during their early working period. Some results are presented.

一、引言

CO₂ 气体激光器在放电激励时, 包含着气体成份的分解、复合、电离、激发、辐射、迁移、扩散、分离等多种过程, 情况极其复杂。国内外学者采用光谱、质谱等现代测试手段, 以确定放电时组份的变化, 并研究这种变化对激光器稳定性、增益、输出功率、寿命的影响^[1]。然而, 迄今为止, 并没有得出适合于各种场合的普遍性规律。

1967年, J. A. Macken 等发表了关于

CO₂ 激光器中等离子体化学平衡的第一篇论文^[2], 1969年, Corrin 和 Corrigan 报道了电子碰撞 CO₂ 引起的分解速率^[3], 同年苏联学者 Gasilevich 等人^[4]报道了在大体积放电管中, 放电导致的化学平衡仅需几秒钟, 若体积更小, 则平衡时间更短。文献^[5]指出, CO₂ 分解过程是多样化的, 不仅有基态 CO₂ 的分解, 同时也有 CO₂⁺ 离子与电子碰撞复合分解; 以及多步碰撞分解, 还指出 CO₂ 分解过程有吸附电子的现象发生。

以上的实验研究都是采用流动气体系

收稿日期: 1985年2月12日。

统。1970年 Karube 和 Yamaka^[6] 发表了用金属阀门做为进样工具, 对封闭型 CO₂ 激光器的研究结果。

1972年, Austin 和 Smith 利用飞行时间质谱仪对放电管阴极区进行取样测试^[7]。1976年, Shield 测定了 CO₂ TEA 激光器充以 CO₂/N₂/He/O₂/CO/H₂/H₂O 放电时所产生的负离子。

在国内方面, 金蕊文采用了玻璃小泡取样的办法对激光管气体成份做了分析^[8]。但这种方法的局限性及误差是很大的。本课题组于 1983 年开展直接抽样分析的工作, 本文报道所取得的一些结果。

二、实验装置

实验装置如图1所示。采用国产 ZLS-150 四极质谱仪做为分析工具, 抽气系统由一抽速为 450 l/s 的涡轮分子泵及前级真空泵组成。由一特制的平面型玻璃小孔(孔径 10~20 μm)串于分子泵与激光管之间, 形成差分效果。由于孔径很小, 一级差分就已足够保证四极场规管的工作条件。涡轮分子泵的抽速对气体种类的依赖关系很小^[9], 即其质量歧视效应很小, 这有利于保证分析精度。

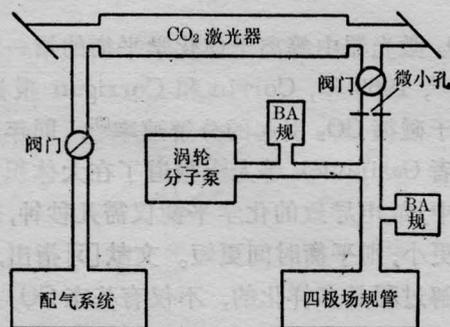


图 1

实验中采用的激光管是成都红旗玻璃厂的 800 mm CO₂ 激光管, 是定型产品, 在阳极端与阴极端设有旁支管, 以便抽样; 另一种管

是成都电讯工程学院制作的 300 mm 波导型 CO₂ 激光管。

这个抽样系统具有下述特点:

(1) 由于小孔很小, 分子泵抽速又较大, 故能获得高达 7 个数量级的差分效果。试验时, 高压端曾处于大气压条件下, 四极场规管仍能工作, 此时规管内约为 10⁻⁴ Torr 的压强。当高压端为 50~100 Torr 时, 规管内为 10⁻⁵ Torr 以下。

(2) 由于抽取气体量很少, 故能连续进行分析而不导致管内气体总压过快降低。图 2 表示 CO₂、CO 和 He 三种气体的谱峰随时间的变化。可见对 1~2 小时内的早期等离子体化学的研究, 是可以连续抽样鉴别的。

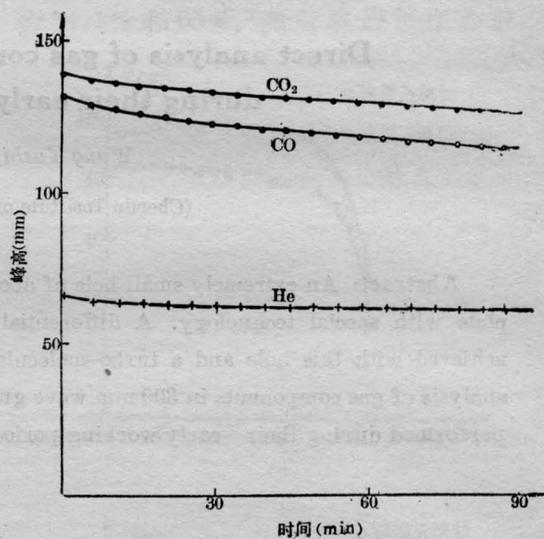


图 2 CO₂、CO 和 He 谱峰随时间的变化 (300 mm 波导管; P_总=10 Torr)

(3) 除了四极场规管, 原则上亦可采用任何一种气体分析器。

(4) 通过小孔的气流状态是复杂的。但因是一级差分, 进气端压强高, 不属分子流状态, 最可能是粘滞流状态和湍流状态, 即集团性流动占优势, 这比起分子流状态, 质量歧视效应要小些。

(5) 涡轮分子泵抽速与气体种类基本无关^[9], 避免了又一个质量歧视效应。

三、实验结果及其解释

实验时,可从阴极、亦可从阳极取样。一般从阴极取样,需要比较时,可从阳极取样。

CO₂激光器中,常用气体是CO₂-N₂-He-Xe或CO₂-CO-He-Xe。在研究混合气体之前,先分别研究了CO₂、CO的等离子体化学特性。

(1) 纯CO₂, 阴极取样

通常认为CO₂激光器功率下降、寿命终了都是CO₂的分解所致。图3示纯CO₂在放电时的分解情况。由图可知,在实验的条件下,CO₂的分解是很剧烈的,分解度接近80%,与Buser等人的结果相一致^[5]。

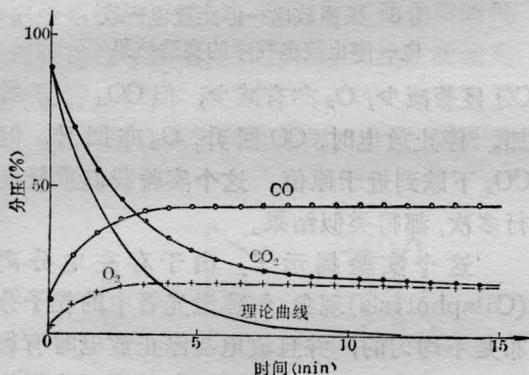


图3 纯CO₂放电时各个谱峰之变化
(300mm波导管; P_{CO₂}=9.8 Torr; I=7 mA)

按照离解方式: $\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + e$

可得:

$$n_{\text{CO}_2}(t) = n_{\text{CO}_2}(0)e^{-k_f n_e t} \quad (1)$$

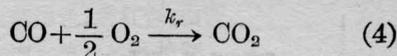
$$k_f = \frac{1}{n_e t} \ln \frac{n_{\text{CO}_2}(0)}{n_{\text{CO}_2}(t)} \quad (2)$$

式中 n_{CO_2} 为CO₂分子数密度, n_e 为电子数密度, k_f 为速率常数。由(1)可以定出 k_f 。式中

$$n_e = j_e / v_e e \quad (3)$$

j_e 为电流密度, v_e 为电子的漂移速率, 其值可由[9]查得。但由此定出的CO₂变化的理

论曲线与实验并不完全符合。这主要是由于分解的同时还存在下面的复合过程的缘故:



k_r 为复合速率系数。

由图3可见,大约经过10min,分解与复合就已达到平衡。在平衡时有

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}}{dt} = -k_f n_{\text{CO}_2} n_e + k_r n_{\text{CO}} n_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (5)$$

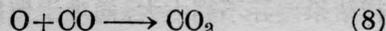
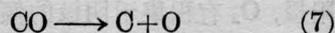
故得

$$k_r = k_f n_{\text{CO}}(t=\infty) n_e / n_{\text{CO}}(t=\infty) n_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}(t=\infty) \quad (6)$$

由此可定出 k_r 。

(2) 纯CO, 阴极取样

纯CO在激光管内放电时,谱峰的变化如图4所示。由图可知,放电导致CO减少,减少量约为15%;CO₂在放电过程逐渐出现,增大到接近8%(均以峰高计)。放电过程中有CO₂出现,表明有下述反应存在:



由上面反应知道,在CO放电过程中,有碳元素产生,这将造成管壁及气体的污染。

(3) CO₂-CO-He-Xe混合气体, 阴极取样与阳极取样

CO₂-CO-He-Xe是目前国内外CO₂激光器中较多用的填充气体,研究此种组份气体在激光器工作过程中的变化情况,具有典型意义。为充分揭示其过程,用300mm

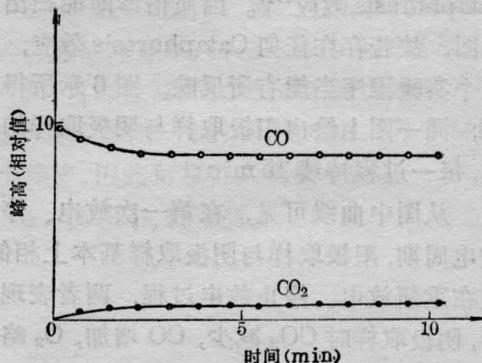


图4 纯CO放电时各个谱峰的变化
(P_总=10 Torr; I_{放电}=4.5 mA)

波导激光管进行了阴极取样与阳极取样的比较,结果如图5所示。

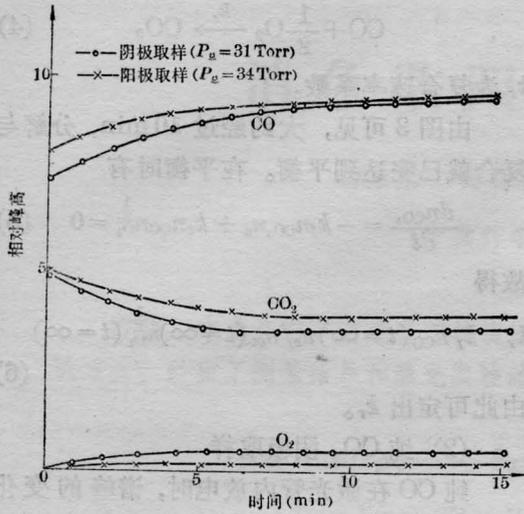


图5 混合气体放电时 CO_2 分解的曲线
($\text{CO}_2:\text{CO}:\text{He}:\text{Xe}=1.2:2:6:0.2$; $I_{\text{放电}}=8\text{mA}$)

从图中曲线可以观察到 CO_2 有浓集于阳极, O_2 有积集于阴极的倾向。但因两种取样结果差异不算太大,尚难于做出肯定结论。为进一步探明机制,特再采用 800mm 通常的封闭型 CO_2 激光管,做放电—停止放电—放电—停止放电实验。

在封闭型 CO_2 气体激光管中,均采用回气管与储气套相通的办法来克服放电过程的“电泳”现象,降低由此而引起的压强差。但这仅能消除总压强差,并不能消除分压强差,即消除了 Electrophoresis 效应,没有消除 Cataphoresis 效应^[11]。因质谱诊断能扫出质谱图,故若存在任何 Cataphoresis 效应,则这个实验程序当能有所反映。图6示所得结果,同一图上绘出阳极取样与阴极取样的曲线,每一过程持续 15min 。

从图中曲线可见,在第一次放电、停止放电周期,阳极取样与阴极取样基本上相似。但在重新放电、停止放电过程,两者表现迥异,阴极取样时 CO_2 减少, CO 增加, O_2 略有增加,停止放电阶段则基本不变。这是与第一周期基本相似的。阳极取样则表现特殊,

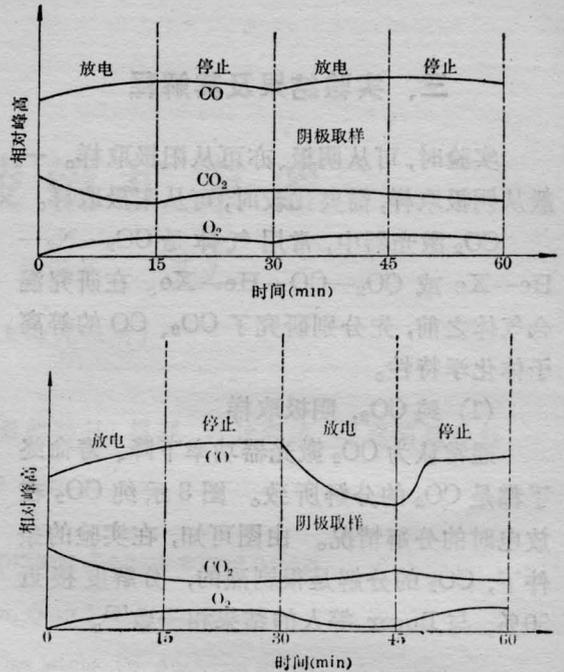


图6 采用放电—停止放电—放电—停止放电程序的实验结果

CO 显著减少, O_2 亦有减少,但 CO_2 明显增加。停止放电时, CO 回升, O_2 亦回升,但 CO_2 下落到近于原值。这个实验我们重复进行多次,都得类似结果。

这个实验揭示了:由于存在电分离 (Cataphoresis) 现象,气体激光管中的粒子分布是不均匀的,并且放电与停止放电时有粒子的重新分布现象。同时,亦说明了取样位置有重要影响。

由于多种过程存在,对封闭型激光管的质谱诊断研究,尚有大量工作可作。上面的实验结果仅仅是个开始。

此外,我们还拟逐步开展下列工作:(1)在平面微小孔上设一开关装置,避免管内气体连续损失,这就有可能研究长期过程,即寿命过程;(2)对小孔的气流特性特别是质量歧视效应进行全面的研究,以便做为修正的依据;(3)对气体成份的分析技术,发展成为半定量或定量的。

对中国科学院科学基金委员会的资助谨
(下转第 262 页)

虑。在高入射强度下,可以利用相邻级的相反效应来避免之。

多光子电离是一比较复杂的效应,影响比较严重时,可以完全破坏混频的条件。实验和理论的出入比较大。在采用碱金属进行UV段波长的产生时,这一效应具有显著影响。采用碱土金属时,由于相对稳定,在入射强度不高时这一效应并不显著。

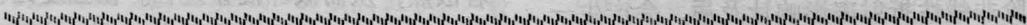
二聚体效应只对碱金属比较重要,采用碱土金属和惰性气体,可以不考虑这一效应。

从上面的讨论可以看出,在进行非线性四波混频产生VUV相干辐射时,主要的限制过程是吸收及其相关的非线性折射率的影响。在考虑最优工作条件时,应计及这些限制过程。C.R. Vidal曾建议,可以在计及所有的限制过程的影响后再进行位相匹配^[17]。

参 考 文 献

- [1] G. H. C. New, J. F. Ward; *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **11**, 556.
[2] P. N. Butcher, *Nonlinear Optics Phenomena*, Ohio State Uni. Columbus Ohio, 1965, p. 75.

- [3] J. A. Armstrong, J. J. Wynne; *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**, 1183.
[4] U. Fano; *Phys. Rev.*, 1961, **124**, 1866~1878.
[5] R. T. Hodgson *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **32**, 343.
[6] M. Matsuoka; *Opt. Commun.*, 1975, **15**, 84~86.
[7] R. Hilbig, R. Wallenstein; *Opt. Commun.*, 1983, **44**, 283., R. Wallenstein; *Opt. Commun.*, 1980, **33**, 119., R. Hilbig, R. Wallenstein; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, 913.
[8] 赵理曾, 聂玉昕; 《量子电子学》, 1984, **1**, No. 4, 217.
[9] C. R. Vidal, J. Cooper; *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**, 3370.
[10] G. C. Bjoklund; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 287~296.
[11] S. E. Harris, R. Miles; *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**, 385.
[12] G. C. Bjoklund; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, 729.
[13] D. M. Bloom *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, 301.
[14] E. A. Stappaerts *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, 330~333.
[15] S. E. Harris, D. M. Bloom; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**, 229.
[16] H. Puell, C. R. Vidal; *Opt. Commun.*, 1975, **27**, 165~170.
[17] C. R. Vidal; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, 3897.



(上接第280页)

致谢意。本工作得到张义德、李军建同志的协助,一并致谢。

参 考 文 献

- [1] J. M. Austin, A. L. S. Smith; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1972, **5**, 468~475,
[2] J. A. Macken *et al.*; *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1967, **12**, 669.
[3] Corrin, S. J. B. Corrigan; *J. Chem. Phys.*, 1969, **50**, 2570~2574.
[4] Gasilevich E. S. *et al.*; *Soviet Phys-Technical Physics*, 1969, **14**, 86~91.
[5] B. G. Buser, J. J. Sullivan; *J. Appl. Phys.*,

- 1970, **41**, No. 2, 472.
[6] Karube, Eiso Yamaka; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, 2031~2042.
[7] Austin J. M., A. L. S. Smith; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1972, **5**, 468~475.
[8] 金蕊文; 《四川激光》, 1980, No. 4.
[9] 王欲知; 真空技术, 1980年, 四川人民出版社, p. 259.
[10] Smith A. L. S., J. M. Austin; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1974, **1**, 314~322.
[11] Merle N. Hirsh, H. J. Oskam; *Gaseous Electronics*, **1**, Electrical Discharges, Academic Press, 1978, Cpt. 2, Part 2.3 & 2.4.