

电子束控制放电 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光器的动力学

霍芸生 郑承恩 包智香

(中国科学院上海光机所)

提 要

将气体分子振动能量的弛豫方程与腔内激光强度的变率方程联立,用四阶龙格-库塔公式数值求解。计算了电子束控制放电 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光器的增益系数、激光波形、激光输出效率等。对结果进行了讨论并与实验作了比较。

在室温条件下($\sim 300\text{K}$), H_2O 对 CO_2 激光下能级 ν_2 振动模的碰撞去活速率比对上能级的去活速率约大一个数量级^[1]。在电子束控制放电 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 激光器中,附加适量的 H_2O 可以有效地提高激光输出能量及效率。我们在热电子束控制放电器件上对此体系进行了实验研究,得到了 27 焦耳/升·大气压的激光输出。实验所用器件的放电长度为 74 厘米,有效激光体积 3.7 升,其详细结构见文献[2]。

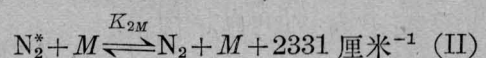
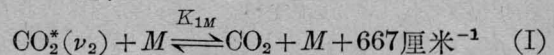
在文献[3]中,对此实验结果作了介绍并进行了半定量分析。本文从激光动力学角度对电子束控制放电 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系进行进一步研究。通过对电子能量分布的玻尔兹曼方程及分子振动能级的弛豫方程数值求解,求得在各种气体比分条件下的增益系数及激光输出效率等物理量,并与实验结果作了一些比较。

一、激光介质中的粒子碰撞 过程与速率方程

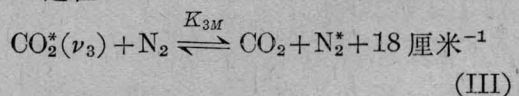
关于 CO_2 、 N_2 分子基电子态的振动能级,已在许多文献^[4,5]中介绍。 CO_2 是线性

对称的三原子分子,有三种正常的振动方式:对称伸长振动模 ν_1 、二重简并的弯曲振动模 ν_2 及非对称模 ν_3 。 N_2 是双原子分子,只有一个振动模。分子间发生碰撞时,可以发生不同的振动模之间的能量交换 ($V\text{-}V$ 过程),也可以发生振动能到平动能的转移 ($V\text{-}T$ 过程)。同一振动模的不同能级之间交换能量的速率比不同振动模之间的能量转移快得多,可认为同一振动模的不同能级所具有的粒子数服从振动温度为 T_1 的玻尔兹曼分布,不同的振动模一般处于非平衡状态。由于 CO_2 的 ν_1 、 ν_2 模之间存在费米共振,它们紧密地耦合在一起,可认为具有相同的振动温度。

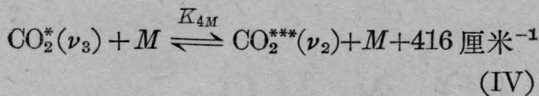
关于 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系中的振动弛豫,已在[1]中介绍。我们主要考虑了如下过程:
 $V\text{-}T$ 过程



$V\text{-}V$ 过程



收稿日期: 1978 年 10 月 19 日。



其中 M 可分别为 CO_2 、 N_2 或 H_2O 分子。

在电子束控制放电中, 高能电子束在激光介质中所产生的二次电子从主放电电场获得能量, 它能与气体分子发生非弹性碰撞, 将其激发到各个振动能级上去。

综合考虑电子对分子的碰撞激发过程、分子间碰撞时所发生的振动弛豫过程以及 $\text{CO}_2 00^0 1$ 能级的受激辐射与自发辐射过程, 可得到一组描述各个振动模的振动能变化、气体平动温度变化及腔内激光功率流密度变化的速率方程^[1, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho e_{v_{101}}) &= n_e n_{\text{CO}_2} X_2 h \tilde{\nu}_2 \\ &+ n_{\text{CO}_2} h \tilde{\nu}_2 K_1 (\varepsilon_{20} - \varepsilon_2) + 3 n_{\text{CO}_2} h \tilde{\nu}_2 K_4 \\ &\times \left[\varepsilon_3 \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{2} \right)^3 - e^{-\frac{500}{T}} (1 + \varepsilon_3) \left(\frac{\varepsilon_2}{2} \right)^3 \right] \\ &+ I g \frac{h \tilde{\nu}_1}{h \tilde{\nu}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho e_{v_{103}}) &= n_e n_{\text{CO}_2} X_3 h \tilde{\nu}_3 \\ &+ K_3 h \tilde{\nu}_3 n_{\text{CO}_2} n_{\text{N}_2} (\varepsilon_4 - \varepsilon_3) \\ &+ h \tilde{\nu}_3 n_{\text{CO}_2} K_4 \left[e^{-\frac{500}{T}} (1 + \varepsilon_3) \left(\frac{\varepsilon_2}{2} \right)^3 \right. \\ &\left. - \varepsilon_3 \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{2} \right)^3 \right] - I g \frac{h \tilde{\nu}_3}{h \tilde{\nu}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho e_{v_{104}}) &= h \tilde{\nu}_4 X_4 n_e n_{\text{N}_2} \\ &+ K_3 h \tilde{\nu}_4 n_{\text{N}_2} n_{\text{CO}_2} (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\ &+ n_{\text{N}_2} h \tilde{\nu}_4 K_2 (\varepsilon_{40} - \varepsilon_4) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho C_v \frac{dT}{dt} &= j E - g I \\ - \frac{d}{dt} \rho (e_{v_{101}} + e_{v_{103}} + e_{v_{104}}) & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dt} = CI (g - \delta) + \frac{A_{21} n_{001}^{j=19} C h \tilde{\nu}}{P} \quad (5)$$

其中弛豫速率

$$K_i = K_{i\text{N}_2} n_{\text{N}_2} + K_{i\text{CO}_2} n_{\text{CO}_2} + K_{i\text{H}_2\text{O}} n_{\text{H}_2\text{O}} \quad (i=1, 2, 4)$$

$e_{v_{101}}, e_{v_{103}}, e_{v_{104}}$ 分别为单位质量的气体混合物所具有之 $\text{CO}_2 \nu_1 \cdot \nu_2$ 模、 CO_2 的 ν_3 模及 N_2 的振动能。 $n_{\text{CO}_2}, n_{\text{N}_2}, n_{\text{H}_2\text{O}}$ 为单位体积所具有之 CO_2 、 N_2 、 H_2O 的分子数, n_e 是电子密度。 X_2, X_3, X_4 分别为平均每个电子对 CO_2 的 010、001 及 N_2 的 $V=1$ 能级的有效激发速率; $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 分别为 CO_2 的 ν_2, ν_3 模及 N_2 的平均振动量子数; T_1, T_3, T_4 分别是 CO_2 的 $\nu_1 \cdot \nu_2$ 模、 ν_3 模及 N_2 的振动温度, T 是气体温度, $\varepsilon_{20}, \varepsilon_{40}$ 分别为 $T_1=T$ 时的 ε_2 及 $T_4=T$ 时的 ε_4 的值; $h \tilde{\nu}_1, h \tilde{\nu}_2, h \tilde{\nu}_3, h \tilde{\nu}_4$ 分别为 CO_2 的 (100)、(010)、(001) 及 N_2 的 $V=1$ 能级的能量, $h \tilde{\nu}$ 为 $\text{CO}_2 10.6$ 微米激光光子能量; j, E 分别为主放电电流密度及电场强度; I 是激光功率流密度, g 是增益系数; δ 是腔内损耗, 取锗片反射率为 50%, 由激活介质长 74 厘米, 得 $\delta = 0.468\% \text{ 厘米}^{-1}$ 。

二、数值求解

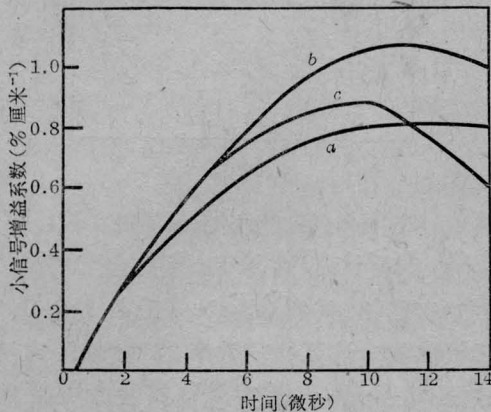
对于起始时在室温下处于热平衡的 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 气体混合物, 用四阶龙格-库塔公式^[6]对方程(1)~(5)联立求解。所用步长是 0.01 微秒, 控制精度 10^{-4} 。电子碰撞激发速率是对玻尔兹曼方程数值求解, 算出电子能量分布函数后得到的^[7], 所用弛豫速率见文献[1, 8]。

三、结果和讨论

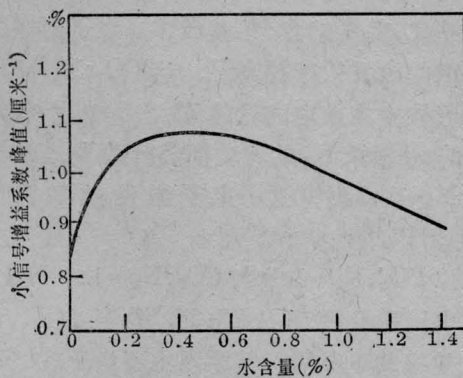
1. 小信号增益系数

图 1(a) 给出了 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$, 水含量分别为 0.47%、1.41% 时, 放电过程中小信号增益 G_0 的波形, 三者都在 10 微秒左右, 即电子束截止时达到其峰值 $G_{0\text{max}}$ 。图 1(b) 给出了 $G_{0\text{max}}$ 随水含量的变化。从计算结果可以清楚地看到水对激光能级的弛豫作用。加适量的 H_2O , 在对上能级的弛豫速率增加不很多的情况下, 可以有效地对下能级弛豫。

如当水含量从0增至0.47%时,上能级振动温度虽降低了44K,而下能级振动温度 T_1 却降低了近100K,故 G_{0max} 从0.811%增大至1.07%厘米⁻¹。当加了过量的水时,由于对上能级的弛豫很严重,故导致增益下降。例如当水气含量从0.47%增加到1.41%时, T_1 仅降低了28K, T_2 却降低了75K,因而 G_{0max} 从1.07%厘米⁻¹降至0.90%厘米⁻¹。



(a) 小信号增益系数随时间的变化,水含量为(a)0%;(b)0.47%;(c)1.41%



(b) 小信号增益系数峰值随水含量的变化

图 1

$CO_2:N_2=1:4$; $E/N=1.33 \times 10^{-16}$ 伏·厘米²

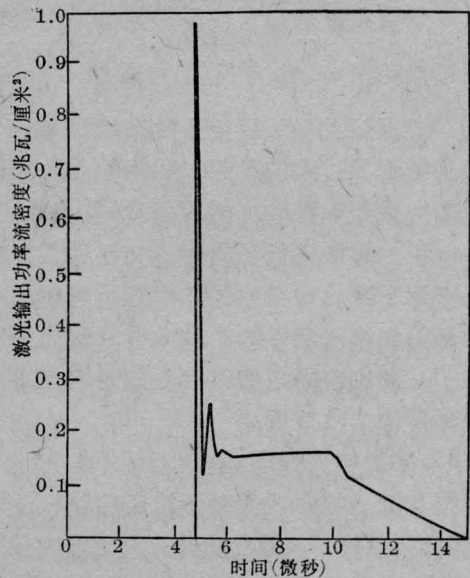
电子密度 $n_e=4.6 \times 10^{12}$ 厘米⁻³

电子束持续时间10微秒

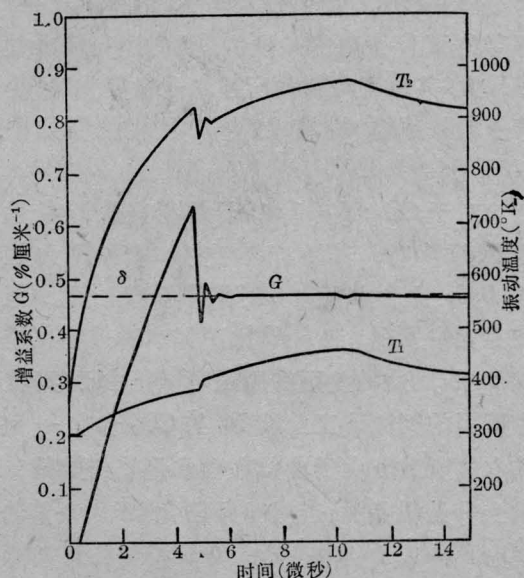
2. 激光及增益波形

图2(a)给出了 $CO_2:N_2=1:4$,水含量为0.47%时的激光输出波形;图2(b)给出了在腔内存在激光振荡的情况下,增益系数 G 及激光上、下能级的振动温度 T_2 、 T_1 随时间的变化。

激光波形与所拍摄的典型的热电子束控制放电 CO_2 激光器的激光波形^[2]基本一致。激光波形中第一个尖峰是增益开关尖峰,其峰值为0.97兆瓦/厘米²,以最大值的一半处计算的全宽度为0.08微秒。激光波形上的尖峰在时间上滞后于增益波形上相应的尖峰。例如激光的第一个尖峰比增益的第一个尖峰滞后0.12微秒。



(a)



(b)

图 2

这些尖峰结构反映了激光建立过程中, 激光能级粒子数密度、增益系数和激光功率流密度的相互影响和相互制约。方程(2)表明, 激光上能级粒子数的变化主要由电子碰撞激发、分子间的碰撞弛豫以及与激光功率流密度成正比的受激辐射项所决定。起始时, 激光辐射场尚未建立, CO_2 001 能级所受的受激辐射很微弱, 在电子泵浦下, 上能级粒子数及增益系数达到了较高的数值。由于增益超过损耗很多, 由方程(5)可看到, $\frac{dI}{dt}$ 也很大, 激光迅速增强, 以至于后来达到第一个峰值。由于 I 过大的结果, 强烈的受激辐射迅速抽空激光上能级, 使 T_2 和增益急剧下降。由于此时增益低于损耗, 又导致激光功率流密度下降。这样经过几度起伏以后, 在增益开关尖峰出现后约 1.3 微秒, 激光强度达到了一个比较稳定的数值, 此时增益系数与损耗系数非常接近。

3. 激光输出效率

图 3 所示的曲线为对于给定的 CO_2 与 N_2 的比例, 当 H_2O 含量变化时, 激光输出效率的变化。曲线 a 、 b 、 c 分别对应于 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:2, 1:4, 1:9$ 。对于 CO_2 与 N_2 的每种比分, 都存在 H_2O 含量的最佳值, 此时激光输出效率最大, 其原因与前面所述水含量变化时, 小信号增益系数 G_0 变化的原因相同(见图 1(b))。

对于 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$, 计算得当含 H_2O 量为 0.47% 时, 其激光输出效率达极大值 10.5%, 比含水量为 0 时效率提高一倍。但在实验中发现, 加 H_2O 比不加水时效率仅增加 30%。这种差别的原因可能是由于实验中所用的钢瓶装工业纯 N_2 与 CO_2 含有一定的水气所致。由于曲线在含水量较少的部分的上升是很陡的, 若对于原已含水 0.067% 的 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$ 的混合物, 可算得另外再加水时效率最多只能提高 24.5%, 与实验值 30% 比较接近。

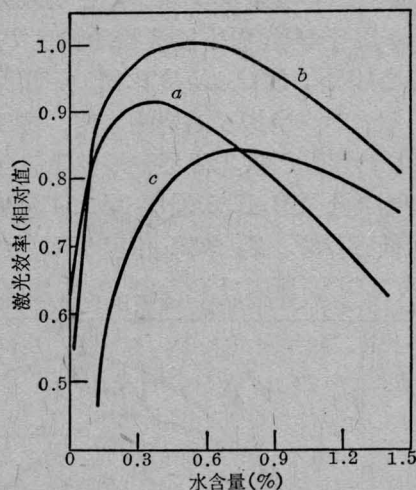


图 3 激光效率随水含量的变化

(a) $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:2$; (b) $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$; (c) $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$

对于图 3 中的 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4, 1:2, 1:9$ 的三根曲线, 计算得其效率的峰值之比为 $\eta_{1:4}:\eta_{1:2}:\eta_{1:9}=1:0.92:0.84$, 实验上所测得的这个比例是 $1:0.88:0.85$ 。

若以 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$ 与 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:2$ 的情况相比, 前者的含 N_2 量较多, 电子对激光上能级的激发效率较高^[7]。当 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$ 时, 气体中主放电能量的 73.2% 被用来对 CO_2 的 ν_3 模及 N_2 的振动模进行激发, 而在 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:2$ 时, 这一电子激发效率仅为 62.9%, 因此 $\eta_{1:2}$ 小于 $\eta_{1:4}$ 。

以 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$ 与 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$ 相比, 虽然电子激发效率从 73.2% 增至 84%, 但激光效率却下降了。其原因主要由于在气体混合物中工作气体 CO_2 的比分过低。由于有近似关系式:

$$G \propto \psi_{\text{CO}_2} (e^{-h\nu_3/T_2} - e^{-h\nu_1/T_1})$$

为维持激光振荡, 须有 $G \approx \delta$ 。对于 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$ 情况, 由于 ψ_{CO_2} 过小, 就必须使上能级振动温度维持在较高的值, 大约要高出 170K 左右。这对激光效率产生两个不利的影响: 一是在存在激光振荡的约十个微秒时间内, 激光上能级通过碰撞弛豫的能量损耗增加; 二是在上能级振动温度还相当高时, 激光振

荡即已终止。此时在激光上能级中还贮存着相当多的振动能,这部分能量已不能以激光振荡的形式输出。当 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:4$ 时,输送到激光上能级的能量中,以受激辐射的形式利用的部分占 33.8%,而在 $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$ 的情况下,这个比例仅为 24.9%,因此激光输出效率下降。

参考文献

[1] R. L. Taylor; *Reviews of Modern Physics*, 1969, 41, No. 1, 26.

- [2] “电子束控制 CO_2 激光器的实验研究”,《中国科学院上海光机所研究报告集》第四集,5~10(1977)。
[3] 郑承恩等,“附加气体对电子束控制放电 CO_2 10.6 微米激光器输出的效应”,《激光》,1979, 6, No. 4。
[4] Б. Ф. Гордиец; *УФН*, 1972, 108, No. 4, 655。
[5] O. R. Wood; *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62, No. 3, 355。
[6] 北京大学,清华大学,“计算方法”(上)。
[7] 霍芸生等,中国科学院上海光机所 103 组工作总结,“电子束控制放电 CO_2-N_2 混合物中电子能量分布函数的计算”(1978)。
[8] J. D. Anderson; *AIAA J.*, 1974, 12, No. 12, 1699。

快 报

放电自加热铜卤化物蒸气激光器

铜原子蒸气激光器是建立在自限跃迁基础上的激光器。它是以其第一共振能级作为上激光能级,而以置于其下的亚稳能级作为下激光能级,在共振辐射俘获的条件下达到粒子数反转实现受激振荡的。作为激光工作物质可采用纯铜或铜卤化物蒸气。纯铜变为蒸气需要 1500°C 以上的高温,而铜卤化物只需加温到 300°C 左右即可获得足够的铜原子密度。

我们用铜卤化物作为工作物质于去年 11 月初试制成一台放电自加热式铜蒸气激光器。其特点是不用炉子,靠放电自加热产生足够的铜蒸气密度;激光输出是连续脉冲式的,频率 10 千赫以上。激励铜蒸气所需要的短脉冲放电是采用多次重复频率谐振布鲁林线路来实现的。其中选用 ZQM₁-400/16 作为开关元件。激光管是由内径 $\phi 8$ 的石英管制成,极

间距离 250 毫米。CuCl 或 CuBr 粉末置于放电管中部侧管内。放电管内充 20 托氖气供放电起动和保护布氏窗口减少沾污。谐振腔是由一半径 3 米、对 5106 埃全反射的多层介质膜镜和一块对 5106 埃透过 60% 的介质膜镜组成,相距 ~ 650 毫米。

当充电电压为 3500 伏,重复频率 ~ 10 千赫时,放电自加热 5 分钟内就可观察到 5106 埃激光输出,同时在其全反射介质膜镜端可观察到 5782 埃激光输出。其平均输出功率 > 70 毫瓦,半极大值全宽度 ~ 30 毫微秒。使用 CuBr 作为激光工作物质时,在充电电压为 3500 伏、重复频率 16.7 千赫时,可以得到 300 毫瓦的激光输出。

(中国科学院上海光机所 梁宝根)