

# 高功率高效率封离式室温 CO 分子激光器

雷仕湛 张顺怡 童兴发 归振兴

茅文英 胡文富 黄美英

(中国科学院上海光机所)

## A high power high efficiency sealed-off CO molecular laser at room temperature

Lei Shizhan, Chang Shunyi, Tong Xinfa, Gui Zhenxin

Mao Wenying, Hu Wenfu, Huang Meiyong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia, Sinica)

A CO molecular laser operating at room temperature was developed. The effects of temperature of lasing gases and discharge conditions on the laser output power, efficiency for energy conversion were studied.

CO 分子激光器是 5 微米附近连续输出功率最强的激光器之一,它在大气污染探测、分子光谱研究,以及作为诸如自旋反转喇曼激光器泵浦源等方面可望有广泛的应用前景。

CO 分子激光器的增益系数随着工作气体温度升高而迅速降低,因此,CO 分子激光器通常是采用液氮冷却放电管,或者使用高速流动工作气体的办法来实现激光振荡,获得高功率输出<sup>[1~4]</sup>。无疑,这种工作方式对一切实际应用是不方便的。

近几年来,在接近室温(20°C 以下)的条件下工作的器件也研制成功,连续输出功率达到 20 瓦,能量转换效率为 12%<sup>[5~6]</sup>。我们研制了一台在室温条件下工作的 CO 分子激光器,并研究了工作气体温度、放电条件(放电电流、工作气体组分、总工作气压、气体纯度)对激光器输出功率、能量转换效率的影

响。

我们实验用的器件结构如图 1 所示,放电管是内径为 10 毫米、放电长度为 1800 毫米的石英玻璃管。阴极和阳极分别是用铝镁合金和镍做成的圆筒,直径为 40 毫米,长为 80 毫米。采用直流电源激发。共振腔长 2100 毫米,一端用曲率半径为 5 米的镀金全反射镜;输出端是用氟化钙为基板、表面镀多层介质膜的平面反射镜,反射率约 95%,CO 气体是自己制备的。

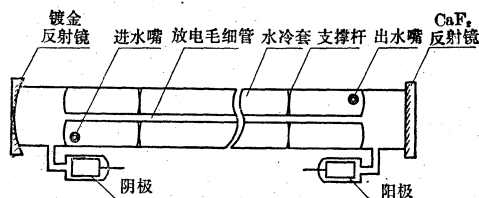


图 1 CO 激光器结构简图

收稿日期: 1978 年 12 月 26 日。

放电管经过适当高真空除气处理，真空度达  $1\sim 2\times 10^{-5}$  托。用 1 米平面光栅光谱仪(光栅为 150 条/毫米)，测量了输出激光波长。大部分输出波长在 5.1~5.7 微米范围内。输出功率用碳斗接收，以 1070 型多次反射灵敏检流计读数。在放电管壁温度  $20^{\circ}\text{C}$  (用水冷却)时，输出功率达到 20.5 瓦，效率 10%。连续工作 8 小时，输出功率保持在 15 瓦左右。

我们研究了激光器的输出功率与工作气体温度的关系，结果示于图 2。低于  $-10^{\circ}\text{C}$  的实验结果是用液氮加酒精做冷却液时获得的。管壁温度从  $20^{\circ}\text{C}$  降到  $-40^{\circ}\text{C}$ ，输出功率增加约 3 倍，能量转换效率增加 1.5 倍。从图中也看出输出功率和能量转换效率随工作气体温度的变化并非是单调的。从  $20^{\circ}\text{C}$  开始降低放电管壁的温度，输出功率随之缓慢地增大，在  $-10^{\circ}\text{C}$  附近达到极大，以后又随着温度降低输出功率出现下降的趋势，在  $-18^{\circ}\text{C}$  附近达到极小。此后，进一步降低气体温度，输出功率又迅速增大。文献[7]也曾得到类似的结果。输出功率随温度变化这种特性涉及到 CO 分子激光器的机理，还有待于进一步研究。

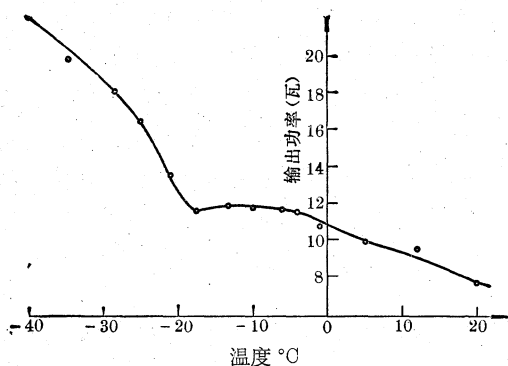


图 2 输出功率与管壁温度的关系

CO: Xe: He = 1: 3.3: 20;  $P=8.2$  托;  $I=20$  毫安

输出功率与放电电流强度的关系示于图 3。对于固定的 CO、Xe、He 气体混合比例，总气压存在使输出功率达到极大值的最佳放电电流强度。当总气压升高时，最佳放电电

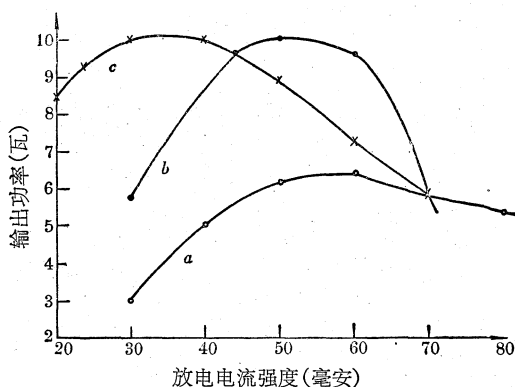


图 3 输出功率与放电电流强度的关系

a-P=7.6 托; b-P=12.6 托; c-P=9 托

CO: Xe: He = 1: 2.2: 30

流强度将向减小的方向移动。输出功率与放电电流强度的这种关系大概有两个方面的原因。放电电流升高，电子密度增大，有利于提高对 CO 分子的激发速率；但是，与此同时，因为输入的电功率增加，气体温度也升高。所以，放电电流强度的升高是有限的。

气体放电电流密度  $j$  与电场强度  $E$  的关系为：

$$j = \sigma E$$

式中  $\sigma$  是气体电导率<sup>[8]</sup>。当总气压升高时，气体电导率  $\sigma$  降低，要维持在相同的放电电流强度下工作，必须提高电场强度  $E$ ，这样一来，输入到工作气体中的电功率  $jE$  也就增加，它导致气体温度升高。为了让激光器保持在相同的气体温度下工作，就必须相应地降低工作电流。这就是最佳放电电流强度随工作总气压升高而降低的原因。事实上，当混合气体中加入氮气的比例比较高，最佳放电电流强度相应地就比较高，因为氮的导热率比较大，它有降低放电管中心附近气体温度的作用。

正如在研究  $\text{CO}_2$  分子激光器那样，工作气体中加入氦、氙、氮等辅助气体对 CO 分子激光器的输出功率和能量转换效率也都有很大的影响。要是在工作气体中不加入氦或氙，在室温条件下是比较难实现激光振荡的。图 4 给出 CO 和 Xe 的比例固定在 1:2 时，

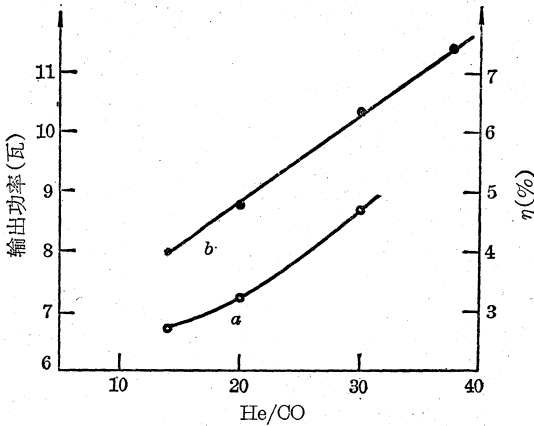


图4 输出功率、能量转换效率与 He/CO 的关系  
a— $\eta$ - $P_{He}/P_{CO}$  曲线; b—输出功率- $P_{He}/P_{CO}$

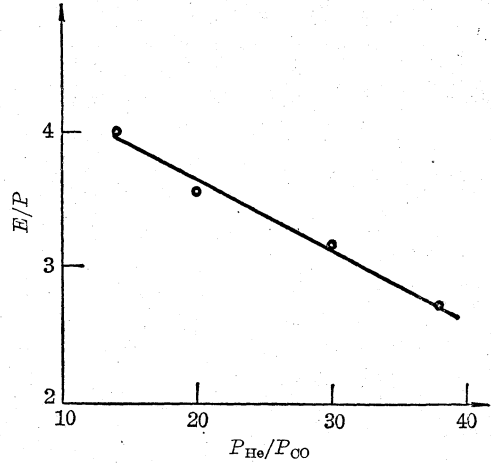


图5  $E/P$  与 He/CO 的关系

输出功率和能量转换效率随氦的气压变化的关系。He/CO 的比例从 10 增大到 30, 输出功率增加 35%, 而能量转换效率提高了约 1.2 倍, 即氦对提高能量转换效率比较明显, 而对输出的影响则不及 CO<sub>2</sub> 激光器显著。

氦气的热导率和电离电位都比较高, 前者带来的得益上面已叙述过。He 的电离电位高, 它的存在能提高气体放电中的电子温度, 同时通过彭宁效应而提高气体放电电子密度。从图 5 我们看出, 在 CO+Xe+He 混合物中, 氦的比例增高, 放电的  $E/P$  值降低。根据 [9] 研究 CO 气体放电中的能量按振动能级、电子能级和电离分子的分布, 我们可以估计, 当  $E/P$  值小于 7.2 伏/厘米·托时, 其中以激发 CO 分子振动能级为主要。根据研究 CO 分子振动激发函数, 估计电子能量在 1.7 电子伏时激发截面最大<sup>[10]</sup>。在混合气体中如果氦气比例低,  $E/P$  值比较高, 激发能量中用于激发 CO 分子振动能级的比例固然比较小, 而且因为电子温度比较低, 激发较高的振动能级截面也很小, 激光振荡功率和能量转换效率就比较低。当然氦的比例增高, 相应的 CO 气体含量就减少; 同时, 氦原子碰撞 CO 分子的弛豫速率也增加。所以, 氦的比例是有限的。

降低  $E/P$  值, 除了有利于增加激发速率

外, 还有减少 CO 分子离解速率的作用<sup>[11]</sup>。的确, 在氦的比例比较高时, 激光器的寿命也可以比较长。

图 6 是在 CO 和 He 的比例固定在 1:20 的条件下, 输出功率和能量转换效率随 Xe 的气压变化。Xe/CO 从 1.2 变化到 4.6, 输出功率增加了 1.8 倍, 而能量转换效率提高了 2.4 倍。在输出功率和能量转换效率方面, Xe 的作用比 He 都大。

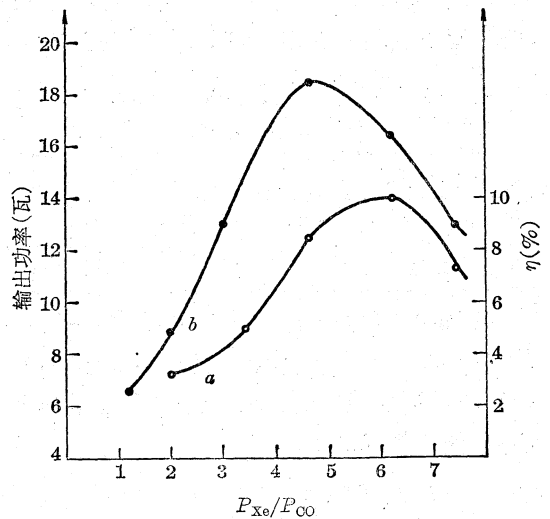


图6 输出功率、能量转换效率与 Xe/CO 的关系  
a— $\eta$ - $P_{Xe}/P_{CO}$  曲线; b—输出功率- $P_{Xe}/P_{CO}$  曲线

Xe 的电离系数很大, 与 He、CO、N<sub>2</sub> 相比, 它最高。混合气体中加入适量的 Xe 之

后, 电子密度增加,  $E/P$  值降低(图7)。但是, Xe 的份量太高时, 电子温度降低, 因而导致输出功率随 Xe 的增加反而出现下降的趋势。

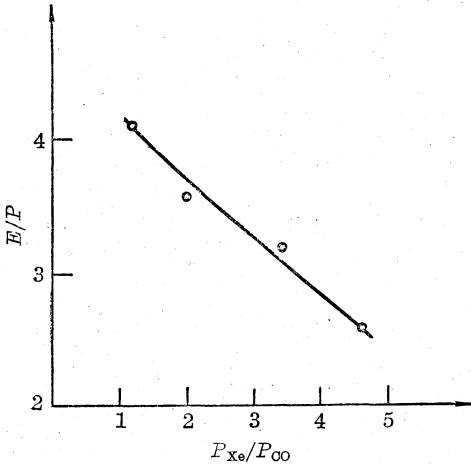


图7  $E/P$  值与  $P_{Xe}/P_{CO}$  的关系

在室温条件下, 工作气体中如果不加氦或氙, 就比较难获得激光振荡, 这可以从氦、氙对 CO 气体放电特性的影响以及对 CO 分子振动能级激发过程来了解。我们测量了在  $P_{He}/P_{CO}=18$ , 总气压为 6.9 托, 放电电流强度从 5 毫安到 40 毫安时, 气体放电中的  $E/P$  值以及相应的电子能量, 结果列于表 1。

表 1 CO+He 混合气体放电的  $E/P$  值和电子能量

放电电流(毫安)	5	10	20	30	40
$E/P$ (伏/厘米·托)	8.15	8.05	7.5	7.2	7.2
电子能量(电子伏)	2.24	2.20	2.05	1.97	1.96

在混合气体中不加 He,  $P_{Xe}/P_{CO}=2.8$ , 总气压 6.4 托, 放电电流强度从 20 毫安到 40 毫安时, 测量了放电的  $E/P$  值和相应的电子能量, 结果列于表 2。

表 2 CO+Xe 混合气体放电的  $E/P$  值和电子能量

放电电流(毫安)	20	30	40
$E/P$ (伏/厘米·托)	6.3	5.5	5.2
电子能量(电子伏)	0.33	0.28	0.26

根据表 1 的数据, 我们可以看到, 在 CO+He 的混合气体中, 当不加 Xe 时,  $E/P$  值比 7 大, 而且电子能量也大于 2 电子伏。根据前面我们提到过的事实, 当  $E/P$  值大于 7 时, 放电中有相当一部分能量不是用于激发振动能级; 而当电子能量大于 2 电子伏时, 激发振动能级量子数  $v \leq 8$  能级的截面已降到比较低。所以, 不加 Xe 时, 是比较难获得激光振荡的。从表 2 的数据我们可以看到, 在 CO+Xe 的混合气体中, 虽然  $E/P$  值是合适的, 但是电子能量太低, 根据 [10] 的计算结果, 电子能量低于 0.4 电子伏, 除了  $v=1 \sim 2$  这两个振动能级外(它们的激发截面此时也很低), 其余振动能级的激发截面接近于零。因此, CO+Xe 混合气体中不加氦也很难获得激光振荡。

$N_2$  对提高 CO 分子激光器的输出功率作用不大<sup>[6]</sup>, 反而使激光器能量转换效率降低。图 8 是激光器的输出功率和能量转换效率与  $P_{N_2}/P_{CO}$  变化的关系。在  $P_{CO}, P_{Xe}, P_{He}$  比例固定为 1:3.3:20 时,  $P_{N_2}/P_{CO}$  从 0 增加到 3, 能量转换效率下降了 62%。

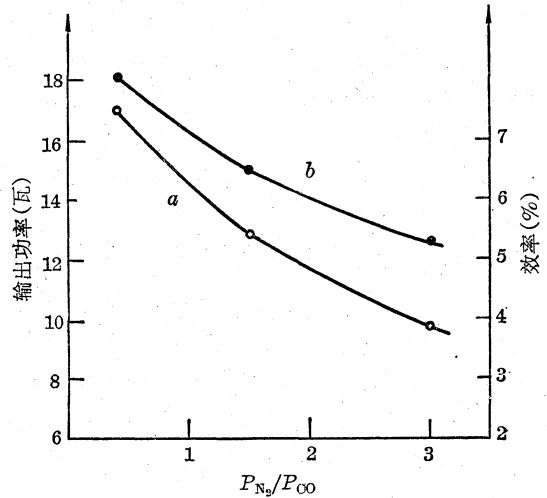


图 8 输出功率、能量转换效率与  $P_{N_2}/P_{CO}$  的关系

a— $\eta-P_{N_2}/P_{CO}$  曲线; b—输出功率— $P_{N_2}/P_{CO}$  曲线

$N_2$  分子的振动能级结构与 CO 分子的振动能级结构相似, 但 CO 分子有固有偶

极矩, 电子碰撞直接激发振动能级的截面比  $N_2$  分子的大。事实上, 即使电子能量在 0.5 电子伏, 激发 CO 分子振动能级的截面也比  $N_2$  分子大 30 倍左右。同时, CO 分子激光器并不象  $CO_2$  分子激光器那样是在不同的振动模之间建立能级粒子数反转, 它是在相同的一个振动模内的振-转能级之间建立激光作用的,  $N_2$  分子在  $CO_2$  分子激光器中那种选择激发振动能级的作用在 CO 分子激光器中不再起什么作用。自然,  $N_2$  分子就没有提高 CO 分子激光器输出功率的功能。

相反, 在工作气体中加入  $N_2$  之后, 它可能和放电管内残存的氧或 CO 分子分解产生的氧生成  $N_2O$  或 NO。实验中我们也发现, 在混合气体中加有  $N_2$  气体时, 在电极附近的管壁上有棕黄色的生成物, 它们可能是  $N_2O$

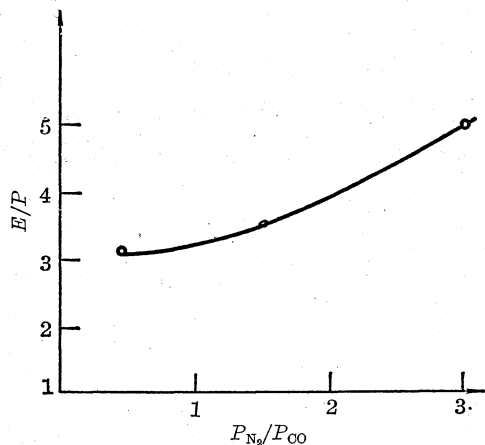


图9  $E/P$  与  $P_{N_2}/P_{CO}$  的关系

或 NO, 它们有强的负电性, 使得放电的  $E/P$  值提高 (见图 9), 因而也就降低了能量转换效率

通过上面的讨论, 我们可以得到这样的结论: 提高室温 CO 分子激光器的能量转换效率, 除了选择最佳工作条件之外, 工作气体的纯度显然也有重要意义。工作气体的纯度, 主要是 CO 分子气体, 受到制备条件的限制, 也与放电管的除气处理有关。工作气体中存在有氢、水蒸气, 不仅使能量转换效率降低, 而且往往也不容易获得激光振荡, [11] 认为要在室温条件下获得激光振荡, 需要利用钽管把混合气体中的氢清除掉。

### 参 考 文 献

- [1] R. M. Osgood *et al.*; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1970, **QE-6**, 145.
- [2] R. M. Osgood *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **13**, 409.
- [3] T. Kon *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**, 137.
- [4] T. Kon *et al.*; *Appl. Phys. Lett.* 1972, **21**, 213.
- [5] M. L. Bhaumik; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**, 188.
- [6] P. G. Browne *et al.*; *Scient. Inst.*, 1975, **8**, 870.
- [7] T. F. Kacheva *et al.*; *Sov. J. Quant. Elect.*, 1974, **3**, 484.
- [8] R. H. Bullis; AIAA, 9th Aerospace Science Meeting Jan. 25~27 1971, New York N. K.
- [9] W. L. Nighan; *Phys. Rev.*, 1970, **2A**, 1989.
- [10] O. J. Shuls; *Phys. Rev.*, 1964, **735A**, 988.
- [11] A. И. Максимов и др.; *Физика плазмы*, 1978, **4**, 352.