

# 选支CO-CO<sub>2</sub>复合激光器的研究

归振兴 张顺怡 沈桂荣 王润文  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文首次报道了一种新型的室温封闭的选支CO-CO<sub>2</sub>复合激光器及其工作特性。从5.2~6.3 μm和9.2~10.8 μm光谱区获得近二百条激光谱线, 强线功率分别达2.5 W(CO)和10 W(CO<sub>2</sub>)。并讨论了复合激光器中CO和CO<sub>2</sub>分子的激发过程。

关键词: CO-CO<sub>2</sub>复合激光器。

## 一、引 言

选支CO激光器和选支CO<sub>2</sub>激光器是红外区最强的可调谐光源。它们在激光光谱研究领域中日益发挥重要作用。由于CO激光器和CO<sub>2</sub>激光器有许多相似之处, 因此, 将二者合为一体是人们感兴趣的问题。早在1972年, 就报道过工作在5 μm或10 μm的CO-CO<sub>2</sub>激光器<sup>[1]</sup>, 随后, J. D. Barry等人采用液氮和水分段冷却的方式, 获得CO和CO<sub>2</sub>同时激射输出<sup>[2]</sup>, 但是, 由于CO激光器本身输出功率低, 随着CO<sub>2</sub>掺杂浓度的增加, 将显著降低CO激光的输出功率<sup>[3]</sup>, 因此, 要实现选支CO-CO<sub>2</sub>激光器的激光输出是比较困难的。随着高功率CO激光器的研制成功<sup>[4,5]</sup>, 为研制有实用价值的选支CO-CO<sub>2</sub>复合激光器奠定了基础。我们在充有CO激光介质的放电管中加入少量CO<sub>2</sub>气体, 并使用了离轴光栅选支腔的结构, 在5.2~6.3 μm和9.2~10.8 μm光谱区获得近二百条可调谐的激光谱线输出, 其中强谱线的功率分别达2.5 W(CO)和10 W(CO<sub>2</sub>), 成功地实现了室温封离型选支CO-CO<sub>2</sub>复合激光器的连续运转。

## 二、激光器和输出特性

选支CO-CO<sub>2</sub>复合激光器的结构与CO或CO<sub>2</sub>选支激光器大致相同, 其放电管内径为φ10 mm, 有效增益长度约1 m, 电极用黄金制成。谐振腔采用半外腔结构, 放电管的一端由布儒斯特角窗密封, 另一端是一块曲率半径为4 m的全反射镜, 它与平面光栅(刻线为150 lines/mm)组成离轴选支腔, 光栅工作在自准状态, 零级耦合输出。采用光电流调腔技术, 使CO和CO<sub>2</sub>激光振荡处于最佳状态, 用风吹流动半外腔内空气介质以保证激光器输出功率的稳定。用SD 2490型激光功率计读出谱线的强度, 并输入到X-Y函数记录仪记录。用光栅光谱仪测量谱线波长。激光器的水冷却温度在10°C左右。

收稿日期: 1987年10月12日; 收到修改稿日期: 1988年1月3日

### 1. CO<sub>2</sub>分压对CO和CO<sub>2</sub>输出光谱分布及谱线强度的影响

在CO-CO<sub>2</sub>激光器中,当少量CO<sub>2</sub>加入到CO激光介质中,将引起CO激光输出降低,为了保证CO和CO<sub>2</sub>都能振荡输出,首先要保证CO激光器处在最佳工作条件,器件中气体比例分别为CO:N<sub>2</sub>:Xe:He为1:2:1.5:16,总气压为20Torr时,输出CO谱线达120~130条,其功率谱的分布如图1(a)所示,具体谱线的波长和归属可参见[6],其中最强支功率,如P<sub>10-9</sub>(22)和P<sub>11-10</sub>(16)的功率达3.5W。在这种情况下,未测量到CO<sub>2</sub>的激光谱线。

基本固定CO-N<sub>2</sub>-Xe-He的比例和总气压以后,再加入CO<sub>2</sub>气体并改变其分压,可以获得一组CO和CO<sub>2</sub>的激光输出功率谱。图1(b)给出了三种CO<sub>2</sub>浓度,在最佳放电电流下测得CO[图1(a)]和CO<sub>2</sub>[图1(b)]的输出功率谱分布。可见,随着CO<sub>2</sub>分压的增加,激光器输出的CO功率谱强度减弱,谱线数减少,以至调谐的光谱区缩小,见图1(a)的下图。与此相反,输出的CO<sub>2</sub>激光功率谱却明显增强,谱线数增多,见图1(b)。

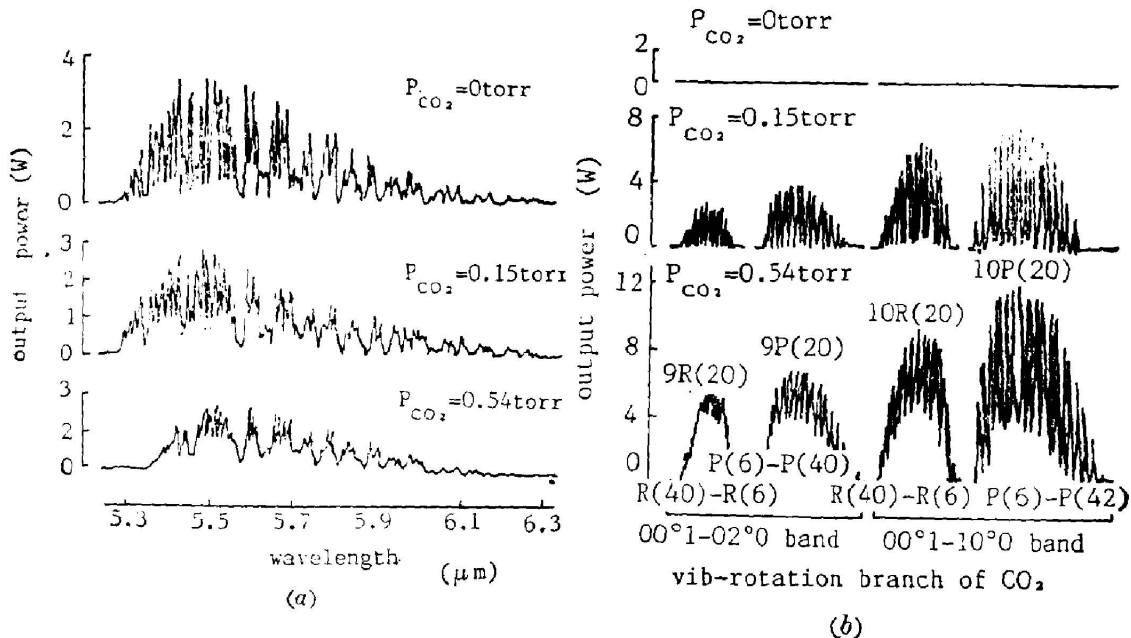


Fig. 1 Typical distributions of the output power of a CO-CO<sub>2</sub> compound laser for different partial pressure of CO<sub>2</sub> in a CO:CO<sub>2</sub>:Xe:N<sub>2</sub>:He=1:X:1.5:2:16 mixture at a total pressure of 24 Torr,  $i_0=15$  mA and  $T_w=12^\circ\text{C}$ .

(a) Distribution of the output power of CO lasing

(b) Distribution of the output power of CO<sub>2</sub> lasing

以CO谱线P<sub>10-9</sub>(22)、P<sub>11-10</sub>(16)和P<sub>14-13</sub>(22)、P<sub>15-14</sub>(16)以及CO<sub>2</sub>谱线00°1~02°0带的9R(18)和00°1~10°0带的10P(20)支为例,测量了激光器输出谱线强度与CO<sub>2</sub>浓度的依赖关系,结果示于图2。由图可见,随着CO<sub>2</sub>浓度增加,CO输出谱线的功率减小,CO<sub>2</sub>的功率增强,到0.5Torr时,谱线功率达到最大,再进一步增CO<sub>2</sub>浓度,输出也不再明显增长。

### 2. 输出光谱特性与放电电流和工作气压的关系

改变工作气压和放电电流,观察了复合激光器输出的CO和CO<sub>2</sub>激光功率谱分布,发

现 CO 的输出光谱特性和金电极选支 CO 激光器的结果基本相同<sup>[7]</sup>, 而 CO<sub>2</sub> 的谱线随气压的升高而增强、增多。

图 3 和图 4 分别给出了激光器输出的 CO 谱线 P<sub>10-9</sub>(22)、P<sub>11-10</sub>(16) 和 CO<sub>2</sub> 谱线 10P(20) 的强度与放电电流的关系, 以及在最佳电流下, 谱线输出功率与气压的关系。可见激光器输出的 CO 谱线功率最大时的最佳放电电流值随气压升高而减小, 其与气压的乘积几乎是常数(见图 4), 而且存在一最佳气压, 约 24 Torr, 这些特性与通常的气体激光器是相似的。然而, 对于输出的 CO<sub>2</sub> 激光谱线却出现了反常现象:

第一, 在同一气压下, CO<sub>2</sub> 和 CO 谱线的最佳电流值不同, CO<sub>2</sub> 的一般要低于 CO 的;

第二, CO<sub>2</sub> 谱线的最佳电流值几乎不随气压变化, 在本实验条件下, 气压在 16 Torr 到 31 Torr 范围内变化, 最佳电流基本恒定在 14±1 mA。

第三, CO<sub>2</sub> 谱线强度随气压升高而线性增加, 没有出现下降趋势。

复合激光器输出的 CO<sub>2</sub> 激光特性显然不同于普通的选支 CO<sub>2</sub> 激光器, 这是由该激光器的激发机理所决定的。

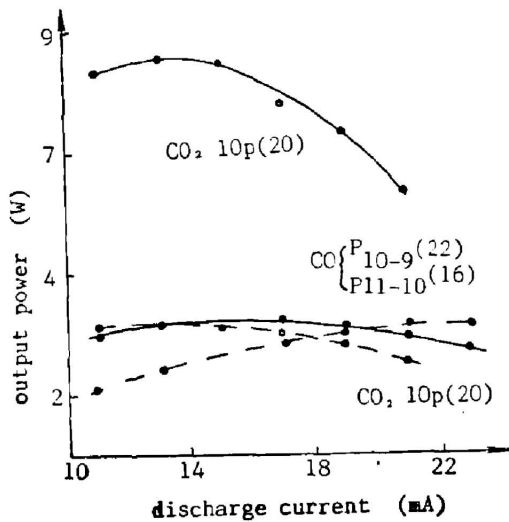


Fig. 3 Dependences of the output power of CO and CO<sub>2</sub> lasing lines on the discharge current for different pressure (— is 31 Torr, - - - is 18.5 Torr) in a CO:CO<sub>2</sub>:Xe:N<sub>2</sub>:He=1:0.23:1.45:2.2:15 mixture at the temperature of the tube wall of 5°C

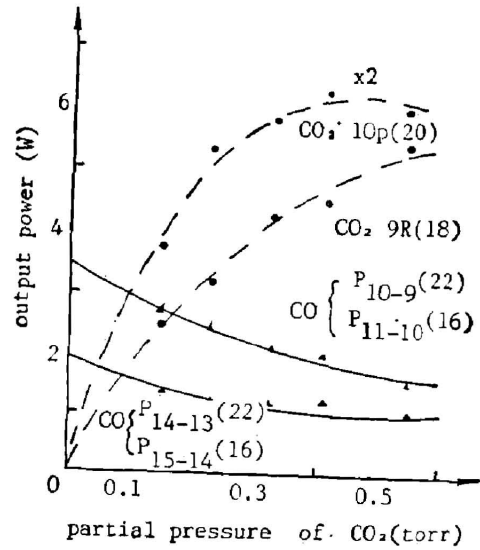


Fig. 2 Using Au electrodes, dependences of the output power of CO and CO<sub>2</sub> lasing lines on the partial pressure of CO<sub>2</sub> in a CO:CO<sub>2</sub>:Xe:N<sub>2</sub>:He=1:X:1.5:2:16 mixture at a total pressure of 24 Torr, *i*<sub>0</sub>=15 mA and *T*<sub>w</sub>=12°C

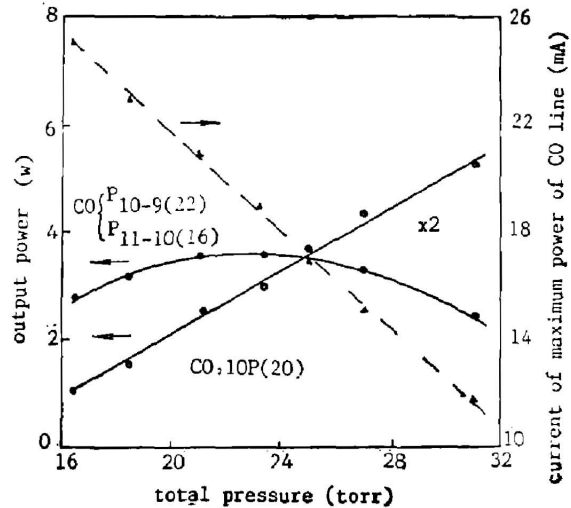


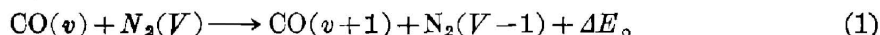
Fig. 4 Dependences of the maximum output power of CO and CO<sub>2</sub> lasing lines on the total pressure in a CO:CO<sub>2</sub>:Xe:N<sub>2</sub>:He=1:0.23:1.45:2.2:15 mixture at the temperature of the tube wall of 5°C

要获得较强和较宽的 CO、CO<sub>2</sub> 可调谐输出光谱, 控制混合气体中的 CO<sub>2</sub> 浓度是关键, 在本实验装置条件下, CO<sub>2</sub> 的分压在 0.2~0.4 Torr, 总气压在 23~27 Torr 比较理想。此时, 激光器输出的 CO 和 CO<sub>2</sub> 激光谱线比较丰富, 功率也适中。例如放电管内充入 24 Torr CO:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:Xe:He=1:0.23:2:1.5:16 的混合气体, 输出激光谱线近二百条, 其中属于 CO 从  $v=8\sim 7$  到  $v=20\sim 19$  的振转跃迁者 120 余条, CO<sub>2</sub> 从 00°1~02°0 和 00°1~10°0 的 P、R 支跃迁约 70 条。谱线功率在 5.4 μm 处达 2.5 W (CO), 在 10.6 μm 处达 10 W (CO<sub>2</sub>), 输出光束模式为 TEM<sub>00</sub> 模, 激光器已连续运转数百小时, CO 和 CO<sub>2</sub> 谱线的强度和分布都比较稳定。

### 三、激发机理的讨论

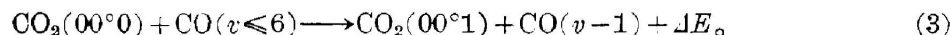
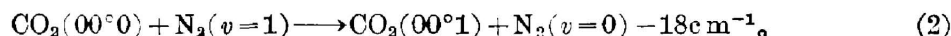
在 CO-CO<sub>2</sub> 复合激光器中, 加入少量 CO<sub>2</sub> 竟能获得数瓦的选支谱线输出, 这是出人意料的。为了弄清楚其激发的主要过程, 我们在 26 Torr 的 CO-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Xe-He, 比例为 1:0.1:2:1.6:15 的混合气体中先后不加 CO 或 N<sub>2</sub>, 观察了选支 CO 和 CO<sub>2</sub> 的谱线输出, 发现在没有 CO 的情况下, 无论 CO 还有 CO<sub>2</sub> 均无谱线振荡输出, 而混合气体中不加 N<sub>2</sub>, 则 CO 和 CO<sub>2</sub> 都有振荡输出, 不过它们的功率谱强度都比有 N<sub>2</sub> 时小, 特别是 CO<sub>2</sub> 谱线功率竟降低约 20 倍, 仅百毫瓦量级。由此可见, 在 CO-CO<sub>2</sub> 复合激光器中, CO 对 CO<sub>2</sub> 分子的碰撞激发是实现 CO<sub>2</sub>(00°1) 粒子数集居的主要途径。

我们知道, 在 CO-N<sub>2</sub>-Xe-He 的气体放电中, 由于 Xe 的作用, 降低了气体中电子的平均能量, 这对于电子直接激发 CO 和 N<sub>2</sub> 分子是十分有效的, 根据 Suhulz 的测量表明, 在电子能量分别为 2.3 eV 和 1.7 eV 时, 它们的非弹性碰撞截面非常大 [ $\sigma(e\cdot N_2)=3\times 10^{-16}\text{cm}^2$ ,  $\sigma(e\cdot CO)=8\times 10^{-16}\text{cm}^2$ ]<sup>[6]</sup>, 在电子能量为 1.0~3.0 eV 范围内, 对于 N<sub>2</sub> 和 CO ( $v\leq 8$ ) 的振动能级激发也都是很有效的。另一方面, 由于 N<sub>2</sub> 和 CO 第一振动能级接近共振 ( $\Delta E\approx 152\text{cm}^{-1}$ ), N<sub>2</sub> 和 CO 第二到第八振动能级的激发截面也和第一振动能级类似, 而且 N<sub>2</sub> 的亚稳态能级寿命比较长, 因此, 它可以通过 V-V 碰撞过程激发 CO 分子:



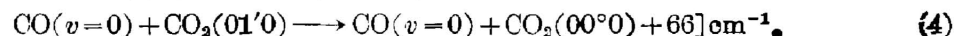
这种 V-V 激发截面是很大的, 这就是 CO 激光器实现高输出功率的主要因素之一。

当少量 CO<sub>2</sub> 气体被加到 CO 激光介质中, 可认为对整个气体放电状态 ( $E/P$ ) 影响不大, 气体中电子直接激发 CO 和 N<sub>2</sub> 分子, 以及 N<sub>2</sub> 对 CO 分子的 V-V 碰撞激发仍然占优势, 因此, CO 高振动态仍能获得较强的激光振荡。而对于 CO<sub>2</sub>, 由于 N<sub>2</sub> 和 CO 分子与 CO<sub>2</sub> 之间的近共振能量转移过程, 也被大量地激发到上激光能级:



(3) 式中特别是 CO ( $v=1$ ) 的振动能级与 CO<sub>2</sub>(00°1) 能级差仅  $-170\text{cm}^{-1}$ , 它们的碰撞截面比 N<sub>2</sub> 的还大 30 倍<sup>[9]</sup>。

另一方面, CO 还起着抽空 CO<sub>2</sub> 下能级的作用



其弛豫速率比氮还高, 这就更有利于 CO<sub>2</sub> 粒子数的反转。

由 CO 分子在各振动态的粒子数分布可知,  $v=1$  的 CO 粒子数总是占绝大多数, 而它对放电电流和气体温度的改变并不十分敏感<sup>[10]</sup>(在激光器工作参数的变化范围内, 其相对变化量很小)。当少量 CO<sub>2</sub> 气体加入到 CO 激光介质中, 在较低的电流下, 通过  $V-V$  泵浦, 就能把大量的 CO<sub>2</sub> 分子激发到上能级, 从而获得很强的激光输出, 这是因为, 电子直接激发 CO<sub>2</sub> 的作用是次要的, 可以忽略, 相反, 电流的增大导致气体温度上升, 反而使 CO<sub>2</sub> 输出降低, 结果见图 3。随着气压升高, 参加振荡的 CO 和 CO<sub>2</sub> 粒子数密度均提高, 因此输出的 CO<sub>2</sub> 激光功率几乎随气压线性增长, 当然, 它不可能无限增大, CO<sub>2</sub> 的最佳工作气压要比 CO 的高, 这是显而易见的(见图 4)。这也是由该激光器特有的激发机理所决定的, 因为 CO<sub>2</sub> 最佳工作电流比 CO 的低, 输出谱线的功率又高, 在相同气压下, CO<sub>2</sub> 工作的气体温度要低于 CO, 因此, CO<sub>2</sub> 最佳工作气压高于 CO。

综上所述, 在 CO-CO<sub>2</sub> 复合激光器中, CO 起着激发 CO<sub>2</sub> 分子和抽空下能级的双重作用, 因此, 混合气体中不加 N<sub>2</sub> 亦可以获得 CO、CO<sub>2</sub> 振荡; 而加 N<sub>2</sub> 不加一氧化碳则无任何输出。

在 CO 激光器中, CO 分子高振动态 ( $v>8$ ) 的激发, 主要是通过 CO 分子间的非谱  $V-V$  泵浦实现的。由于 CO 低振动态的分子与 CO<sub>2</sub> 分子碰撞而损失能量, 结果导致高振动态粒子数减少, 因此, CO<sub>2</sub> 的加入, 使得 CO 输出功率减小, 也是容易理解的。

#### 四、结 束 语

CO 和 CO<sub>2</sub> 激光器对气体的温度效应都十分敏感, 特别是 CO 激光器, 降低气体冷却温度对于获得更宽的调谐光谱范围和更强的谱线输出无疑是卓有成效的。林钧岫等人采用低温流动技术把 CO 光谱区延伸到  $8.43 \mu\text{m}^{[11]}$ 。我们相信, 采用某些技术措施, 可望实现宽谱带、多谱线输出的可调谐的选支 CO-CO<sub>2</sub> 复合激光器。

复合型选支 CO-CO<sub>2</sub> 激光器结构简单, 调谐方便, 其功能相当于两台激光器, 提高了经济效益, 因此, 它将在光谱研究, 非线性光学和污染检测领域受到关注。

#### 参 考 文 献

- [1] H. J. Seguin, J. Tulip *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 20, No. 11 (Jun), 435.
- [2] J. D. Barry, W. E. Boney *et al.*; *IEEE, J. Q. E.*, 1973, QE-9, No. 7 (Jul), 779.
- [3] V. S. Aleinikov, V. I. Masyshev; *Sov. J. Q. E.*, 1982, 12, No. 9 (Sep), 1219.
- [4] P. J. M. Peters, W. J. Witteman *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 37, No. 2 (Jul), 112.
- [5] 张顺怡, 归振兴等;《中国激光》, 1988, 15, No. 2 (Feb), 115.
- [6] 归振兴, 王裕民等;《光学学报》, 1984, 4, No. 12 (Dec), 1131.
- [7] 归振兴, 张顺怡等;《激光技术》, 1987, 11, No. 4, 24.
- [8] G. J. Schulz; *Phys. Rev.*, 1962, 125, No. 1, 229. G. J. Schulz; *Phys. Rev.*, 1964, 135, No. 4A, 988.
- [9] 赫光生, 雷化潜编著;《激光器设计基础》, (上海科学技术出版社, 1979年6月第一版), 130.
- [10] J. W. Rich; *J. A. P.*, 1971, 42, No. 7 (Jun), 2719.
- [11] 林钧岫等;《量子电子学》, 1984, 1, No. 2, 149.

## A branch-selected CO-CO<sub>2</sub> compound laser

GUI ZHENXING, ZHANG SHUNYI, SHEN GUIRONG AND WAN RENWEN  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 12 October 1987; revised 3 January 1988)

### Abstract

In this paper we report a new type sealed-off branchselected CO-CO<sub>2</sub> compound laser operating at room temperature for the first time. Approximate two hundred lasing lines were obtained in the region of 5.2~6.3  $\mu\text{m}$  and 9.2~10.8  $\mu\text{m}$ . the highest output power of the stronger lines was about 2.5 W(CO) and 10 W(CO<sub>2</sub>). The influence of CO<sub>2</sub> concentration in the gas mixture, discharge current and pressure on the power distribution of the lasing spectram of CO and CO<sub>2</sub> was investigated experimentally. The excitation processes for CO and CO<sub>2</sub> molecules in the compound laser have been analyzed.

**Key words:** CO-CO<sub>2</sub> compound laser.