

# H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 序列带激光的影响

李 乐 王克勤 李海沧  
(上海市激光技术研究所)

## 提 要

本文研究了 H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 序列带激光的影响。研究表明 H<sub>2</sub> 能大幅度提高序列带激光的小信号增益系数及其输出功率, 并且 H<sub>2</sub> 对序列带和常规带激光具有相似的影响。

## 一、引 言

CO<sub>2</sub> 常规带激光作用来自 CO<sub>2</sub> 分子 00<sup>0</sup>1 → (10<sup>0</sup>0, 02<sup>0</sup>0)<sub>I,II</sub> 的受激跃迁; 而 CO<sub>2</sub> 序列带激光则来自 00<sup>0</sup>2 → (10<sup>0</sup>1, 02<sup>0</sup>1)<sub>I,II</sub> 的受激发射。过去, 大量的实验研究表明在普通的封离型低气压 CW CO<sub>2</sub> 常规带激光器中加进适量的 H<sub>2</sub> 能大大提高常规带 CO<sub>2</sub> 激光的输出功率。然而, 它们在封离型低气压 CW CO<sub>2</sub> 序列带激光器中所起的作用至今还未见有过研究报告。本文将报道我们在这方面所作的研究工作。

利用一支普通的封离型 CW CO<sub>2</sub> 序列带激光器, 研究了 H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 序列带激光小信号增益系数  $g_0$  以及激光输出功率的影响。结果发现, 和在通常的常规带激光器中发生的情形相似, 在混合工作气体中适量地加进 H<sub>2</sub> 能有效地提高 CO<sub>2</sub> 序列带激光的输出功率。进一步实验发现加进 H<sub>2</sub> 后提高了 CO<sub>2</sub> 序列带激光小信号增益系数, CO<sub>2</sub> 序列带 10P(19) 的增益系数由原来的约 20% cm<sup>-1</sup> 提高到 37% cm<sup>-1</sup>, 提高了约 85%, 同时该线的激光功率也相应地提高了三倍。实验还发现, H<sub>2</sub> 对序列带激光小信号增益的影响与它对常规带的影响十分相似。

本文将首先介绍实验测量及其结果, 然后通过一简化的理论模型说明 H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 序列带激光增益的影响以及对激光功率的影响, 同时还将说明 H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 序列带激光和常规带激光的作用有何内在的联系。

## 二、实验测量和结果

在普通的封离型 CO<sub>2</sub> 常规带选支器件中插入一被加热到高温的纯 CO<sub>2</sub> 气体吸收池便获得了来自 00<sup>0</sup>2 → (10<sup>0</sup>1, 02<sup>0</sup>1)<sub>I,II</sub> 的 CO<sub>2</sub> 序列带激光振荡(简称 002 带激光; 相应地对常规带激光跃迁, 简称为 001 带), 关于 CO<sub>2</sub> 002 带激光作用原理可参见文献[1], 激光腔体结构如图 1 所示。放电管的增益长度为 1.6m, 管径 1.3cm。放电管内充有 1.4 Torr Xe, 1.3 Torr CO<sub>2</sub>, 2.6 Torr N<sub>2</sub>, 7.1 Torr He 及少量的 H<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub> 吸收池采用玻璃制的杜瓦瓶

式结构,池内充有 50 Torr  $\text{CO}_2$  气体。采用一级输出耦合形式,输出耦合镜  $M_1$  的透过率为 15%。折叠腔体的两个臂长分别为 2.2 m 和 1.5 m。之所以采用三镜折叠腔,主要考虑到激光腔体较长,若做成直腔式将会有较大的衍射损耗。

在图 1 所示实验装置上,首先观察了  $\text{H}_2$  对  $\text{CO}_2$  序列带激光输出功率的影响。通过改变放电管内混合工作气体中  $\text{H}_2$  的分压强  $P_{\text{H}_2}$ ,测量了  $\text{CO}_2$  002 带激光输出功率随  $P_{\text{H}_2}$  的变化关系。当激光器运转于 002 带  $10P(19)$  时,得到如图 2 所示的变化曲线。

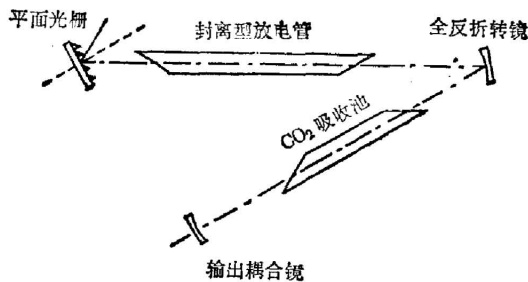


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

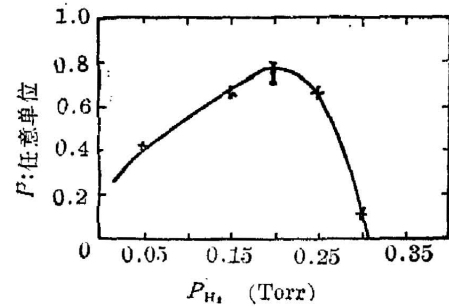


图 2  $\text{H}_2$  对  $\text{CO}_2$  序列带  $10P(19)$  输出功率的影响  
Fig. 2 Variation of sequence  $10P(19)$  line output power as a function of partial pressure of  $\text{H}_2$  added in gas mixtures

( $P_{\text{Xe}}=1.4$  Torr,  $P_{\text{CO}_2}=1.3$  Torr,  $P_{\text{N}_2}=2.6$  Torr and  $P_{\text{He}}=7.1$  Torr)

由图 2 所示结果可见,在  $\text{H}_2$  分压  $P_{\text{H}_2}$  小于 0.2 Torr 时,  $\text{CO}_2$  002 带激光输出功率随  $P_{\text{H}_2}$  的增加而迅速上升,  $\text{H}_2$  对 002 带激光功率的提高起着重要作用。在  $\text{H}_2$  最佳分压下 ( $P_{\text{H}_2}=0.2$  Torr), 002 带激光的输出功率比不加  $\text{H}_2$  时增长了将近三倍。另外,将我们的实验结果与 Witteman 等<sup>[3]</sup>人的实验结果相比较,发现  $\text{H}_2$  对  $\text{CO}_2$  002 带和 001 带激光输出功率的影响极为相似,表明  $\text{H}_2$  对这两带激光功率的影响必有某些内在的联系。

为了进一步弄清楚  $\text{H}_2$  的作用,我们研究了  $\text{CO}_2$  002 带激光的小信号增益行为。用图 1 所示的实验装置作为探测激光器,用另一根增益长度为 1 m,管径为 1 cm 的放电管作为待测放大管,测量了不同  $\text{H}_2$  分压下,  $\text{CO}_2$  002 带激光的小信号增益系数。测量装置如图 3 所示。图中探测激光器部分同图 1 所示装置。放大管中充有 1.4 Torr Xe, 1.7 Torr  $\text{CO}_2$ , 3.4 Torr  $\text{N}_2$ , 9.3 Torr He 及微量  $\text{H}_2$ 。

实验发现,当放大管中充有 0.2 Torr  $\text{H}_2$  时,序列带  $10P(19)$  激光的小信号增益系数高达  $37\% \text{ cm}^{-1}$ ,比以前报道的在普通水冷型封离器件中获得的增益高得多。作为比较,现将我们的测量结果与前人的一些实验结果列入表 1。由表 1 可知,在我们实验条件下,序列带  $10P(19)$  的小信号增益系数 ( $37\% \text{ cm}^{-1}$ ) 是至今报道最高的。虽然 Reid 等<sup>[1]</sup>人也曾获得过高达  $33\% \text{ cm}^{-1}$  的增益系数,但那时需要将放电管管壁温度冷却到液态  $\text{CO}_2$  情况下才能得到。

比较一下实验条件,主要差别在于混合工作气体中充入了 0.2 Torr 的微量  $\text{H}_2$ 。由此可见,在普通的低气压封离型  $\text{CO}_2$  激光器件中,适量地充入一些氢气,对提高  $\text{CO}_2$  序列带激光的小信号增益有着十分重要的作用。

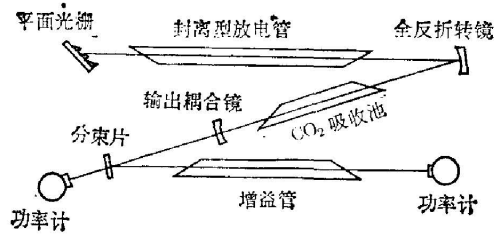


图 3 测量增益装置的示意图

Fig. 3 Experimental arrangement to measure small-signal-gain

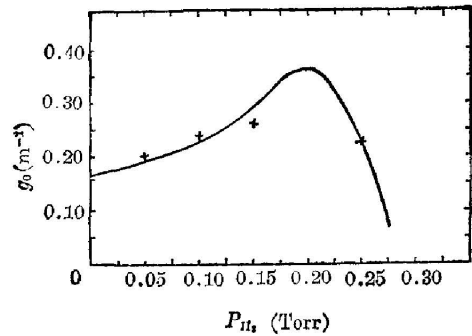
图 4 序列带 10P(19) 线小信号增益测量值与混合工作气体中 H<sub>2</sub> 分压的函数变化关系Fig. 4 Measured small-signal-gain of sequence 10P(19) line as a function of partial pressure of H<sub>2</sub> added in gas mixtures表 1 CO<sub>2</sub> 序列带 10P(19) 线小信号增益测量值一览表

Table 1 Summary of some measured gains of sequence 10P(19) line

| 管 径                         | 1cm  | 1cm  | 1cm  | 1cm  |
|-----------------------------|--|--|--|--|
| 混合工作气体                      | 0.2 Torr H <sub>2</sub><br>1.4 Torr Xe<br>1.7 Torr CO <sub>2</sub><br>3.4 Torr N <sub>2</sub><br>9.3 Torr He | 0.7 Torr CO <sub>2</sub><br>2.0 Torr N <sub>2</sub><br>9.0 Torr He | 0.75 Torr Xe<br>0.7 Torr CO <sub>2</sub><br>2.0 Torr N <sub>2</sub><br>9.5 Torr He | 0.6 Torr CO <sub>2</sub><br>1.2 Torr N <sub>2</sub><br>8.2 Torr He |
| $g_0$ (% cm <sup>-1</sup> ) | 37   | 22   | 33   | 15   |
| 实验条件                        | 封离型,<br>水 冷<br>sealed-off,<br>water cooling  | 封离型,<br>水/冰冷却<br>sealed-off,<br>water/ice cooling                  | 封离型,<br>冷却到 -60°C<br>sealed-off,<br>coded to -60°C                                 | 封离型,<br>水 冷<br>sealed-off,<br>water cooling                        |
| 参考文献                        | 本 文  | [1]  | [1]  | [2]  |

我们进一步测量了不同 H<sub>2</sub> 分压下序列带 10P(19) 激光的增益系数。测量结果如图 4 所示。

根据图 4 测量曲线可见, 当混合工作气体中 H<sub>2</sub> 分压  $P_{H_2}$  小于 0.2 Torr 时, 序列带激光的增益系数随  $P_{H_2}$  的增加而增加; 当  $P_{H_2}$  大于 0.2 Torr 时, 增益有极大值。

比较图 2 和图 4 的测量结果, 可以看到序列带激光的增益系数和输出功率的最佳 H<sub>2</sub> 分压都是 0.2 Torr。同时还可看到, H<sub>2</sub> 对序列带激光小信号增益的提高是增加它的激光输出功率的主要因素。在最佳 H<sub>2</sub> 分压时, 002 带 10P(19) 的小信号增益比不加 H<sub>2</sub> 时提高了约 85%, 而功率却相应地提高了近三倍。显见, 功率的提高幅度大于增益的提高幅度。

### 三、实验结果讨论

首先, 简要地说明 H<sub>2</sub> 对提高 CO<sub>2</sub> 序列带激光小信号增益系数的机理。

大家知道, CO<sub>2</sub> 分子激光的增益系数在简谐近似下可表示成

$$\left. \begin{aligned} \alpha_R &= \frac{C_1 N_l B_l (J+1)}{\lambda(J) \Delta\nu(J)} \left[ \frac{N_u B_u}{N_l B_l} \exp\left(-\frac{E_u(J+1)}{kT_r}\right) - \exp\left(-\frac{E_l(J)}{kT_r}\right) \right], \\ \alpha_P &= \frac{C_2 N_l B_l J}{\lambda(J) \Delta\nu(J)} \left[ \frac{N_u B_u}{N_l B_l} \exp\left(-\frac{E_u(J-1)}{kT_r}\right) - \exp\left(-\frac{E_l(J)}{kT_r}\right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\alpha_R$  和  $\alpha_P$  分别表示 R 支和 P 支线的增益系数;  $B_u$ 、 $B_l$  分别是上、下激光能级的转动常数;  $E_u$ 、 $E_l$  则是转动能;  $T_r$  为转动温度;  $\lambda$  和  $\Delta\nu$  为激光波长及频宽;  $J$  为转动量子数。  $C_1$ 、 $C_2$  和  $N_u$ 、 $N_l$  分别代表比例常数和上、下激光振动能级上的粒子数, 对常规带

$$N_u = N_{001}, \quad N_l = N_{100} \quad (2)$$

对序列带激光, 则有

$$N_u = N_{002}, \quad N_l = N_{101} \quad (3)$$

这里脚标 001, 100, 002 及 101 分别代表 CO<sub>2</sub> 分子 001, 100, 002 和 101 能级。

分别对常规带和序列带的激光作用过程求解速率方程, 可求得 001 带和 002 带激光上、下振动能级粒子数差为

$$\left. \begin{aligned} N_{001} - N_{100} &= \frac{N_{001}^e(T_3) - N_{100}^e(T_1)}{(I/I_s)_{001} + 1}, \\ N_{002} - N_{101} &= \frac{N_{002}^e(T_3) - N_{101}^e(T_1, T_3)}{(I/I_s)_{002} + 1}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} (I/I_s)_{001} &= A_{001}(\tau_{\nu_2} + \tau_1) \rho_{001}, \\ (I/I_s)_{002} &= A_{002}(\tau_{\nu_2} + \tau_{101}) \rho_{002}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $(I/I_s)_{001}$  和  $(I/I_s)_{002}$  分别为 001 带和 002 带腔内光强  $I$  与其饱和强度  $I_s$  之比;  $A_{001}$  和  $A_{002}$  分别为与两带有关的常数;  $\tau_{\nu_2}$ 、 $\tau_1$  及  $\tau_{101}$  分别是 CO<sub>2</sub> 分子  $\nu_2$  振动模、100 能级和 101 能级的弛豫时间;  $\rho_{001}$  和  $\rho_{002}$  分别为两带的光子数密度。  $N_{002}^e(T_3)$ 、 $N_{001}^e(T_3)$ 、 $N_{100}^e(T_1)$  和  $N_{101}^e(T_1, T_3)$  分别为 CO<sub>2</sub> 分子 002、001、100 和 101 振动能级粒子数的平衡值, 可统一表示成

$$\left. \begin{aligned} N_{\nu_1 \nu_2 \nu_3}^e(T_1, T_2, T_3) &= N_{\text{CO}_2} \exp\left(-\frac{\nu_1 h \nu_1}{kT_1}\right) (\nu_2 + 1) \exp\left(-\frac{\nu_2 h \nu_2}{kT_2}\right) \exp\left(-\frac{\nu_3 h \nu_3}{kT_3}\right) z, \\ z &= \left[1 - \exp\left(-\frac{h \nu_1}{kT_1}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{h \nu_2}{kT_2}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{h \nu_3}{kT_3}\right)\right], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  分别是 CO<sub>2</sub>  $\nu_1$  模、 $\nu_2$  模及  $\nu_3$  模的有效振动温度;  $N_{\text{CO}_2}$  为 CO<sub>2</sub> 分子的总粒子数。

在小信号近似下, 有  $(I/I_s)_{001} \ll 1$  和  $(I/I_s)_{002} \ll 1$ 。考虑到(6)式, 则(4)式可化为

$$\left. \begin{aligned} N_{001} - N_{100} &\doteq N_{001}^e(T_3) - N_{100}^e(T_1), \\ N_{002} - N_{101} &\doteq N_{002}^e(T_3) - N_{101}^e(T_1, T_3) = [N_{001}^e(T_3) - N_{100}^e(T_1)] \exp\left(-\frac{h \nu_3}{kT_3}\right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据(1)式, 并结合(7)式可知  $T_1$  和  $T_2$  越低, 而  $T_3$  越高, 则增益系数越高。实验表明<sup>[8]</sup>, 在混合工作气体中加进 H<sub>2</sub>O 可有效降低  $T_1$  和  $T_2$  温度。由于在放电管中加入 H<sub>2</sub>, 经放电后, CO<sub>2</sub> 分解后与 H<sub>2</sub> 反应生成 CO 和 H<sub>2</sub>O。因此, 加氢与加水应是等价的。这就是为什么在放电管中加入适量 H<sub>2</sub> 后能同时大幅度提高 001 带和 002 带增益系数的原因。

再看公式(1), 作为一种很好的近似, 我们可设

$$\left. \begin{aligned} B_{l001} &\doteq B_{l002} \doteq B_{u001} \doteq B_{u002}, \\ T_{r001} &= T_{r002}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在将(7)式代入(1)式后,可得小信号增益比

$$\frac{g_{002}}{g_{001}} = \frac{C_{002}}{C_{001}} \exp\left(-\frac{h\nu_3}{kT_3}\right). \quad (9)$$

在上式推导过程中已令  $J_{001} \doteq J_{002}$ 。利用量子力学不难证明,公式(9)中两个常数之比 ( $C_{002}/C_{001}$ ) 等于两带的振动跃迁矩阵元之比,其值在简谐近似下等于一常数 2, 于是有

$$(g_{002}/g_{001}) \doteq 2 \exp(-h\nu_3/kT_3). \quad (10)$$

显然,尽管 H<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)对常规带激光和序列带激光的下级光能级弛豫速率不一样\*,两个带的激光小信号增益系数之比仍满足一般导出的关系。(10)式表明,该比值与 CO<sub>2</sub>  $\nu_1$  和  $\nu_3$  模的振动温度  $T_1$  和  $T_2$  无关。在维持  $T_3$  基本不变的情况下,两增益之比为一常数。一般在混合工作气体中加进少量 H<sub>2</sub> 不会影响  $T_3$  温度,在这范围内 001 带和 002 带的小信号增益系数随 H<sub>2</sub> 的分压  $P_{H_2}$  的变化呈相似的行为。而在另一方面,当 H<sub>2</sub> 对  $T_3$  的影响不可忽略时(通常表现为过多的 H<sub>2</sub> 加入后使  $T_3$  下降),两带的增益随  $P_{H_2}$  的增加而迅速下降。并且 002 带增益系数比 001 带的增益下降得还要快(见公式(10))。

最后,我们再讨论 H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 激光饱和光强的影响。

由(5)式知两带的饱和强度与各自上、下激光能级寿命之和的倒数成正比。根据文献[3]的研究结果,加 H<sub>2</sub> 后能使激光下能级的寿命缩短\*\* (对 001 带和 002 带都一样), 所以导致激光饱和强度增强,激光功率提高。

## 四、结 束 语

在 CO<sub>2</sub> 激光器中,特别是低气压封离型器件中,适量地在混合工作气体中加进一些 H<sub>2</sub> 能大幅度提高 CO<sub>2</sub> 激光(001 带和 002 带)的增益系数,同时也提高了激光的饱和强度。因此, H<sub>2</sub> 对 CO<sub>2</sub> 常规带或序列带激光功率的提高应是其对相应的激光增益以及饱和强度综合作用的结果,导致激光功率的增加幅度将高于增益系数的增加幅度。我们的实验结果完全证实了这一点。

在本文准备过程中得到了上海市激光技术研究所可调 CO<sub>2</sub> 激光器课题组全体同志的大力支持和帮助,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] J. Reid *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, No. 7 (Jul), 2712.
- [2] J. Mellis *et al.*; *Opt. Commun.*, 1982, **41**, No. 2 (15 Mar), 121.
- [3] J. W. Wittman; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1966, **QE-2**, No. 9 (Sep), 375.

\* 水的 010 能级 (1595 cm<sup>-1</sup>) 与 CO<sub>2</sub> 100 能级 (1388 cm<sup>-1</sup>) 相接近; 水的 001 能级 (3755 cm<sup>-1</sup>) 与 CO<sub>2</sub> 101 能级 (3716 cm<sup>-1</sup>) 也十分接近, 并且后者的接近程度甚至比前者还高。关于 H<sub>2</sub>O 对下激光能级弛豫的详细讨论可参见文献[3]。

\*\* 虽然过量地加氢后也能使激光上能级的寿命变短,但这将使得  $T_3$  下降,引起增益下降。

## Effect of H<sub>2</sub> on sequence band CO<sub>2</sub> laser

LI LE WANG KEQIN AND LI HAICANG

*(Shanghai Institute of Laser Technology)*

(Received 6 August 1984)

### Abstract

The influence of H<sub>2</sub> on the small-signal gain and output power of CO<sub>2</sub> sequence band laser was investigated. The results show that both the gain and output power of sequence band are greatly enhanced by adding a small amount of H<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>O in the gas mixture and the influence of H<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>O on CO<sub>2</sub> sequence band laser is the same as on the regular band.