

# 环型 CO<sub>2</sub> 选支激光器与腔内 SF<sub>6</sub> 引起的窄共振

黄永楷 戎建民\*

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文描述了一种新型选支环型 CO<sub>2</sub> 激光器。在 10.6 微米和 9.5 微米光谱区获得了十几条振转谱线的激光输出。观察了腔内 SF<sub>6</sub> 分子的窄共振。

## Ring cavity CO<sub>2</sub> laser for branch-selection and narrow resonance produced by SF<sub>6</sub> in cavity

Huang Yongkai, Rong Jianmin

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

**Abstract.** A new type of branch-selected ring CO<sub>2</sub> laser is described. Laser output at the vibration-rotation lines has been obtained at 9.5 μm and 10.6 μm. The narrow resonance behaviour of SF<sub>6</sub> in the cavity has been observed.

### 一、引言

我们曾在文章 [1] 中提出了一种在环型腔内利用光栅进行选支的新方法。这种方法不仅可以保证环型腔中两个相向运行行波有相同的出光几率,而且可以使该腔维持很高的  $Q$  值。这对于利用环型腔中各种竞争效应<sup>[2]</sup> 获得窄共振来说是一个非常基本的重要条件。由于这种腔内的窄共振不仅线宽窄(在理论上可达到远小于谱线的均匀加宽),而且对比度很高(可达 100%)<sup>[3]</sup>。这对于高分辨光谱和激光稳频的应用来说具有重要的意义。本文首次报导这种新型 CO<sub>2</sub> 选支激光器

以及 SF<sub>6</sub> 在该腔内引起窄共振的一些实验结果。

### 二、实验装置设计

在进行这一实验设计时,我们考虑了以下几点:

(1) 为了作到环型腔内两个相向行波有相同的出光几率和在所用光谱区有较高的  $Q$  值,对光栅采用与普通选支驻波腔不相同的放置方式,将光栅的转轴置于光栅刻痕的平面,同时使之彼此平行,并且还使环型腔内光

收稿日期:1983年8月18日。

\* 长春光机学院 1982 年毕业生。

线的运行环路亦处于该平面之中, 其示意图如图 1 所示。光栅  $G$  的转轴  $OO'$  与光栅刻痕和光线运行环路同处于一平面, 当转动光栅调节振荡波长时, 光线在光栅上的反射角  $\theta$  保持不变, 避免了在调谐光栅时引起激光出现附加频移。 $\psi$  和  $\varphi$  分别为光线相对于光栅法面的入射角和衍射角,  $M_1$ 、 $M_2$  为腔镜,  $A$  为激光运行平面,  $B$  为光栅法线平面,  $C$  为季级输出平面。

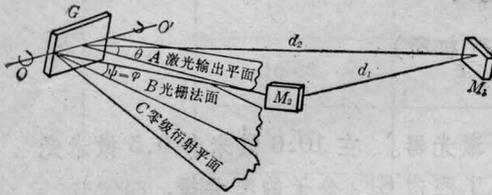


图 1 光栅选支原理图

(2) 由光学像差理论可知, 如果光线对球面反射镜作斜入射时, 反射光线将会引起像散和彗差。这样就会对振荡光束的质量带来影响。为了减小这种影响, 我们采用了只有一个球面镜的三角形环型腔, 并且尽量减小光线在该镜面上的反射角。由计算可知, 当反射角小于  $20^\circ$  时, 像差的影响可以略去不计。在我们的实验中, 两光线之间的夹角为  $8^\circ$ 。

(3) 为了要使三角形环型腔是一个稳腔, 必须使凹面镜的曲率半径满足稳定条件。按光学传输  $ABCD$  矩阵知<sup>[3]</sup>, 此稳定条件为:

$$-1 < \frac{1}{2}(A+D) < 1. \quad (1)$$

对于我们的三角环型腔, 其  $ABCD$  矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - (d_1 + d_2) \frac{2}{R} & d_3 + (d_1 + d_2) \left( -\frac{2d_3}{R} + 1 \right) \\ -\frac{2}{R} & -\frac{2d_3}{R} + 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{所以 } \frac{1}{2}(A+D) = 1 - \frac{d_1 + d_2 + d_3}{R} \quad (3)$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  分别为  $M_2G$ 、 $GM_1$  和  $M_1M_2$  之间的距离(见图 1)。

按(1)式要求, 如果要  $\frac{1}{2}(A+D) < 1$ , 即:

$$-(d_1 + d_2 + d_3) < 0 \quad (3)$$

自然成立, 但无实际意义。如果要  $\frac{1}{2}(A+D) > -1$ , 即

$$R > \frac{1}{2}(d_1 + d_2 + d_3). \quad (4)$$

(4)式就是我们选择凹面镜曲率半径的依据。

(4)为使激光器单频输出, 还必须适当地选择腔长, 即要求腔宽  $\Delta\nu_L$  大于增益线宽  $\Delta\nu_G$ 。对于环型腔, 此条件可表示为

$$\Delta\nu_L = \frac{c}{L} > \Delta\nu_G, \quad (5)$$

式中  $c$  为光速,  $L (= d_1 + d_2 + d_3)$  为环型腔周长。在  $\text{CO}_2$  作增益介质的情况下 ( $\Delta\nu_G \approx 100$  兆赫), 故  $L$  必须小于 3.8 米。同时, 也要注意选择光腔的费涅尔数, 以便保证激光为单横模输出。

根据以上考虑, 我们的实验装置如图 2 所示。 $\text{CO}_2$  增益管长 700 毫米, 内径 7 毫米;  $\text{SF}_6$  吸收管长 600 毫米, 内径 25 毫米。此两根管子的两端均贴有  $\text{NaCl}$  布儒斯特角窗;  $G$  为 10 微米波长的红外定向光栅 (100 条/毫米), 光栅转轴  $OO'$ , 光栅痕和光线回转平面同处于一个平面之内;  $M_1$  为 3 米曲率半径的凹面反射镜, 腔长 2782 毫米, 因而满足(4)



图 2 实验装置

式和(5)式的要求;  $M_2$  为平面反射镜; 为了使腔长能进行微调扫描,  $M_1$  贴在一个  $\phi 30 \times 60$  毫米长的筒状压电陶瓷 PZT 上;  $G$ 、 $M_1$  和  $M_2$  用钢架将它们固定起来。光线在  $M_1$  和  $G$  上的反射角分别为  $8^\circ$  和  $12^\circ$ 。激光从光栅的零级衍射方向输出。CO<sub>2</sub> 放电管内的总气压为 20 托的混合气体, 它们的比是 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe=15%:15%:63%:7%。

### 三、实验结果

1. 我们在未将 SF<sub>6</sub> 吸收管移进谐振腔之前, 测量了环型 CO<sub>2</sub> 激光器的输出和振荡波型。当放电电流为 8 毫安时, 在 CO<sub>2</sub> 的 00<sup>0</sup>1-10<sup>0</sup> 和 00<sup>0</sup>1-02<sup>0</sup> 振转跃迁的  $P$  支和  $R$  支的四个波段内观察到十几条谱线的激光输出。两个方向的总输出功率为 3~4 瓦。有的谱线功率强, 而有的则较弱。虽然我们在设计谐振腔时, 考虑了在两个相向行波方向有相同的出光几率, 但实际的出光情况并不如此, 有时这一个方向强, 有时那一个方向强, 而且变化不定。甚至有时一方向完全没有输出。尽管如此, 但两个方向总的输出功率基本上保持常数。我们用钽酸锂热释电接收器测量了两者随频率扫描的激光振荡波形, 其示波图形如图 3 所示。激光频率扫描是通过加在压电陶瓷 PZT 上的锯齿波电压来实现的。产生以上现象的原因, 主要是由于环型腔内存在着两种振荡波形的竞争而造成的<sup>[4]</sup>。因为当激光频率远离 CO<sub>2</sub> 增益线中心频率  $\omega_0^{(+)}$ , 即  $|\omega - \omega_0^{(+)}| > \Gamma_{(+)}$  时,  $\Gamma_{(+)}$

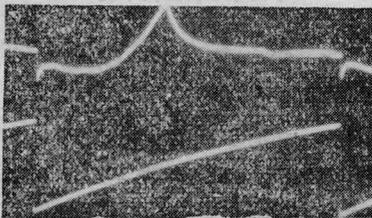


图 3 环型 CO<sub>2</sub> 激光器扫描输出特性 (只有增益介质)。上轨迹为激光信号; 下轨迹为锯齿波电压波形 (总扫描频宽 46 兆赫)

为均匀线宽, 两个向相行波各自与两群不同速度的分子发生相互作用, 这时的激光场为驻波场, 故在两个方向均有输出; 而当振荡频率  $\omega$  靠近增益线中心  $\omega_0^{(+)}$ , 即  $|\omega - \omega_0^{(+)}| < \Gamma_{(+)}$  时, 两相向行波便与同一群分子发生相互作用。对驻波场而言, 这时在功率-频率曲线上将产生一个兰姆凹; 但对行波场而言, 则不存在此凹陷。因而这两种波型就在 CO<sub>2</sub> 增益线中心附近产生剧烈竞争。但由于驻波场是以半波长的周期在增益介质中进行空间调制的, 其场强在波节处为零, 而在波峰处则为极大; 可是行波则不然, 它在整个介质空间中的传播却是均匀的。因而, 它同驻波场之间的竞争就较为有利。故在增益线中心频率附近则只存在单向行波振荡。如果激光没有进行稳频, 则这种激光器输出将随腔频的扰动时而在一个方向输出, 时而又在两个方向输出。这样就解释了我们在实验中观察到的那种现象。

竞争频率范围按[5]的结果是:

$$|\omega - \omega_0^{(+)}| < \delta\omega_{(+)} = \frac{\Gamma_{(+)}}{ku} \sqrt{\Gamma_{(+)} r_{(+)}}, \quad (6)$$

式中  $\Gamma_{(+)}$ ——增益线均匀加宽,  $r_{(+)}$ ——增益线自然线宽,  $ku$ ——增益线多普勒加宽。由于 CO<sub>2</sub> 激光的混合增益介质的压力加宽约为 5 兆赫/托, 我们的气压为 20 托, 故  $\Gamma_{(+)} \approx 100$  兆赫,  $ku \approx 30$  兆赫,  $r_{(+)} \approx 1000$  赫, 代入(6)式得  $\delta\omega_{(+)} \approx 1.1$  兆赫, 实验值差不多比该值约大 2 倍。产生这一差异的主要原因是公式(6)的推得是在假定  $(\Gamma_{(+)}/ku)^2 \ll 1$  的情况下获得的<sup>[5]</sup>。而在我们的情况下,  $\Gamma_{(+)}$  已大于  $ku$ , 因而两者不符。为了正确描述这种关系, 需要寻求新的表达式。

2. 当腔内放进 SF<sub>6</sub> 吸收介质时, 腔内两种振荡波形的竞争将发生相反的变化, 即当激光频率  $\omega$  处于吸收线中心频率  $\omega_0^{(-)}$  附近, 也就是当  $|\omega - \omega_0^{(-)}| < \Gamma_{(-)}$  时,  $\Gamma_{(-)}$  为吸收介质的均匀加宽, 由于驻波场在此区域内造

成反兰姆凹, 故而增益大增, 于是驻波场的振荡竞争就比行波场来得有利。我们用 13 毫托的  $\text{SF}_6$  在长 600 毫米的吸收池中进行了激光扫频出的观察。 $\text{CO}_2$  激光频率调在  $P16$  支 (10.55 微米), 发现在吸收线中心频率附近, 激光的振荡表现出不连续的突变特性, 即该

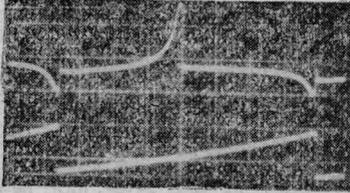


图 4 环型  $\text{CO}_2$  激光腔中  $\text{SF}_6$  引起的窄共振  
(上为共振峰波形, 下为锯齿波波形)

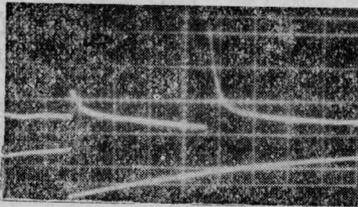


图 5 直管  $\text{CO}_2$  激光腔中  $\text{SF}_6$  引起的窄共振  
(上为共振峰波形, 下为锯齿波波形)

(上接第 31 页)

的三条谱线  $10R(28)$ 、 $10R(30)$  和  $10R(34)$  与 3.39 微米激光间的谐波混频拍信号。其频率关系为

$$\nu_b = \nu_{3.39} - 3 \times \nu_{\text{CO}_2 R(34)} + 3 \times \nu_{52.3\text{GHz}}$$

$$\nu_b = \nu_{3.39} - 3 \times \nu_{\text{CO}_2 R(30)} - \nu_{48.7\text{GHz}}$$

$$\nu_b = \nu_{3.39} - 3 \times \nu_{\text{CO}_2 R(28)} - 3 \times \nu_{51.7\text{GHz}}$$

式中,  $\nu_b$ ——拍频频率;

$\nu_{3.39}$ ,  $\nu_{\text{CO}_2}$ ——对应的激光频率;

$\nu_{52.3}$ ,  $\nu_{48.7}$ ,  $\nu_{51.7}$ ——对应的速调管频率。

所得信号的信噪比在 50 kHz 带宽时分别为 16、22 和 16 dB。改变二极管的偏压对拍信号信噪比影响不大。

图 5 给出由 TF2370 频谱分析仪得到的拍信号照片。

曾试图利用速调管的五次谐波, 观察  $\text{CO}_2$   $10R(36)$  和  $10R(26)$  与 3.39 微米激光间的拍信号, 但未获成功。

处激光的光强骤增, 其示波图如图 4 所示。频率的总扫描宽度约为 53 兆赫。为了探索这种共振峰的来源, 我们用组成环型腔的相同元件构成 1800 毫米长的直管驻波腔进行  $\text{SF}_6$  窄共振的观察, 其结果如图 5 所示。比较图 4 和图 5 可以看出, 两者产生的共振, 其特点基本相同。这一点也是可以理解的, 因为当环型腔中放有吸收介质后, 在吸收线中心频率附近有利于驻波振荡, 这自然就与直管腔的情形相同。但其共振波形的突变不对称性及其相应的宽度, 尚需在理论上和实验中作进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 黄永楷;《激光》, 1982, 9, No. 9. 600.
- [2] М. В. Данилейко и др.; Кван. электр., Киев, 1978, №14, 3~23
- [3] Н. Когельмик, Т. Ли; *Appl. Opt.*, 1966, 5, 1550.
- [4] Н. Г. Басов и др.; *Письма в ЖЭТФ*, 1970, 12, №8, 145.
- [5] В. А. Алексеев и др.; *ЖЭФТ*, 1976, 66, №3, 887.



图 5 从 TF2370 上得到的拍信号照片  
纵坐标: 10 dB/格; 横坐标: 10 MHz/格  
照片中左方为零频率标记, 中央是得到的谐波混频拍信号, 在 10~20 MHz 间的两个信号来自空间干扰

### 参 考 文 献

- [1] K. M. Evenson et al.; *Laser Spectroscopy III* (Springer-Verlag, 1977), p. 56.
- [2] 廖世强等;《中国激光》, 1983, 10, No. 4, 238.
- [3] L. M. Matarrese, K. M. Evenson; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 17, 8.
- [4] G. B. Hocker, W. K. Burns; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, QE-12, 748.