

# 使用共振多程光声池的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SF}_6$ 的 无多普勒饱和吸收光谱

蔡帮维 吕百达 陈希明\*  
(四川大学物理系)

## 提 要

本文使用共振多程池的光声探测法对  $\text{CO}_2$  和  $\text{SF}_6$  分子的无多普勒饱和吸收光谱进行了实验研究。测得  $\text{CO}_2$  的吸收凹陷约为 2.5 MHz, 实验中观察到 5 个  $\text{SF}_6$  的吸收凹陷, 凹陷深度约为 1.9 MHz。两种情况的分辨率均大于  $10^7$ 。

关键词: 共振多程池, 光声检测, 光谱分辨率。

## 一、前 言

自从 1964 年拉姆 (Lamb) 首次提出在驻波腔内都普勒线型中心产生窄共振的理论之后, 相继在实验上采用腔内吸收和荧光技术都观察到了饱和吸收现象。近年来发展的激光光声光谱技术 (简称 OAS) 具有非常高的灵敏度, 因而能成功地用作检测气体的微弱吸收。七十年代末, 采用单程光声池分别作了  $\text{I}_2^{257}$  及  $\text{CO}_2$  的无多普勒饱和吸收光谱<sup>[2, 3]</sup>, 由于受到灵敏度的限制, 所得的吸收凹陷对比度低, 宽度也较宽。本文报道作者研制的一种新型共振多程光声池用于非线性光谱中, 使测量灵敏度大大提高, 其实验结果比文献 [3, 7, 8] 都有较明显提高。

## 二、测量原理及多程光声池的设计

### 1. 腔外饱和吸收光声光谱原理

将连续波调谐的  $\text{CO}_2$  激光束用斩波器调制成交流信号入射到密封的饱和吸收样品池中, 当激光波长调谐到与气体的吸收峰一致时, 气体分子吸收光能量, 产生的声波用传声器探测。测得的光声信号随波长的变化就是光声光谱。腔外饱和吸收光声光谱的特点是将饱和吸收光声池置于激光腔外, 用二逆向行波入射到样品池中, 正向入射的强行波把速度  $u_2 = [(\nu - \nu_0)/\nu_0]c$  的分子激发到高能级并使其吸收饱和, 而用另一频率相同、方向相反的弱行波作探测波, 它的吸收明显减少, 在光声光谱中心频率  $\nu_0$  处出现窄共振凹陷。由非线性激光光谱学理论<sup>[4]</sup> 得凹陷宽度  $\Delta\nu$  和对比度  $h$  分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\nu &= 2\Gamma(1+G)^{1/2}, \\ h &= 1 - (1+G)^{-1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 1987年3月19日; 收到修改稿日期: 1987年6月19日

\* 四川大学物理系光学专业 1983 级毕业生。

式中  $2\Gamma$  为均匀加宽;  $G = (P/P_s)$  为饱和参量,  $P$  为入射激光功率,  $P_s$  为饱和功率。由(1)

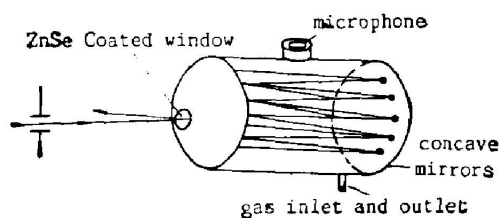


Fig. 1 Resonant optoacoustic multipass cell

式知使用低气压多程光声池可减小饱和吸收光谱凹陷宽度;与驻波场饱和吸收相反,随着强波的增大凹陷对比度单调增加,我们的实验结果也证实了上述的理论。

## 2. 共振多程光声池的设计

光声光谱的灵敏度取决于对光声池的精心设计。我们研制的共振多程光声池如图1所示,由 Herriott 腔<sup>[3]</sup>、微音器、入射窗口和密封不锈钢管等部分组成。Herriott 腔由二个焦距  $f$  相同、间距  $L = (f/2)$  的凹面反光镜构成,其参数由微机绘图设计确定。适当调节入射光束参数,可使镜面上反射光点构成一个圆形。光点的位置坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_n &= A \cos(n\theta + \beta), \quad y_n = A \sin(n\theta + \beta), \\ \theta &= \arccos[1 - (L/2f)], \quad \beta = \arctan[\sin\theta/(1 - \cos\theta)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $n$  为镜面上的光点数,  $A$  是圆形光点的半径。曾用 PC-8000 型微机设计绘出  $f=100$  cm,  $L=50.5$  cm,  $A=5$  cm,  $n=13$ , 26 程腔的光路,光程总长约为 13 m。镜材料用  $K_9$  玻璃,凹面镀金反射率大于 98%。应用 Herriott 腔不仅有效的增长了激光束与气体相互作用的长度、加强了光声信号,提高了信噪比,而且,巧妙地用它实现了腔外二逆向行波的饱和吸收\*。与单纯作为光学延迟系统的 Herriott 腔不同,共振多程光声池的设计除应满足光路闭合条件外,还应考虑有高的品质因数  $Q$ 、最小的背景噪声和相应的声模共振频率。为此,选用不锈钢筒密封反光镜和微音器,并将内壁抛光以减少热传导及粘滞损耗。为了减小窗口吸收引起的背景噪声,采用低吸收的 ZnSe 作窗片,两面镀介质增透膜后透过率达 98% 以上。所有的反射光线均被约束在二反射镜间的空间范围内,不会直接射在光声池壁和微音器上,从而使背景噪声和热传导损耗减至最小程度。由腔体的几何参数确定多程光声池的声模共振频率约为 1500 Hz<sup>[3]</sup>。

## 三、实验装置

实验装置如图 2 所示。采用自制的光栅选支  $CO_2$  激光器,其增益管长为 80 cm,内径 0.9 cm,内充  $CO_2:N_2:Ne:Xe:H_2=1:1:8:0.4:0.1$  五组份混合气体,总气压  $P=22$  Torr,管两端用 ZnSe 片作布儒斯特角窗。谐振腔一端是闪耀波长  $10.6 \mu m$ , 1001/mm 的平面光栅,另一端  $M_3$  是由曲率半径 5 m 的 ZnSe 凹面反射镜镀 80% 的介质增反膜,在  $9 \sim 11 \mu m$  波长范围内可选出 84 条激光谱线,最强单线功率可达 13 W。为了改变腔长精细调谐, $M$  贴在  $\phi 2.5 \times 3.0$  cm 的圆筒状压电陶瓷 PZT 上,由 0~500 V、扫描周期 10 sec 的锯齿波电源驱动,调谐范围为 120 MHz。为了稳定输出,将光栅、CW  $CO_2$  激光器和  $M_3$  固定在 1.4 m 长的整块花岗石上,并将激光器用一有机玻璃罩全部罩上。输出激光经  $S$  分束,一束反射光束射到光谱分析仪 2 监视波长,一束透射光经斩波成 1500 Hz 后由离轴射入光声池,并在其

\* 以入射激光束作为强饱和波,而将光路闭合后按原光路以相反方向返回的弱波作探测波,从而满足了腔外饱和和光声光谱的要求。

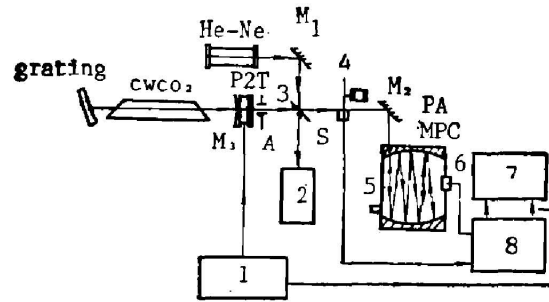


Fig. 2 Experimental arrangement for Doppler-free saturated absorption spectroscopy with a resonant MPC

1—wavelength scanning mechanism; 2—wavelength monitor; 3—aperture;  
4—chopper; 5—inlet and outlet of gas; 6—microphone; 7—JZ3-204 X-Y  
recorder; 8—9503D-SG precision lock-in amplifier

中来回反射, 经  $n=13$  次反射后光路闭合, 入射光束以相反方向按原路返回。正向入射的强波作饱和光场, 反向弱波作探测场。当激光频率调谐到样品气体的吸收中心频率时, 便产生饱和吸收凹陷, 饱和吸收信号经换能器 6 送到 9503D-SG 精密锁相放大器与 X-Y 记录仪, X 轴与波长扫描锯齿波电源同步记录波长, 整个测量工作在 27°C 室温下进行。

#### 四、实验结果及讨论

在作饱和吸收光声光谱之前, 测量了 CO<sub>2</sub> 单支 10P(30) 线激光调谐特性曲线。将光栅转角调到 10P(30) 线输出的固定位置, 再用锯齿波电源驱动压电陶瓷 PZT 调谐腔长, 激光输出频率在谱线中心频率两翼沿增益线型连续扫描。由钽酸锂热释电探测器经锁相放大器后, 由 X-Y 记录仪录下的实验曲线如图 3 所示。调谐范围为  $(c/2L) \approx 125$  MHz, 与谐振腔相邻纵模的自由光谱范围相同, 以此为基准测得 10P(30) 单线调谐宽度为 119 MHz, 与用理论公式

$$2\nu - \nu_0 = \Delta\nu_H \left[ \frac{G_H^0(\nu_0)l}{\alpha} - 1 - \frac{I_\nu}{I_s} \right]^{1/2} \quad (3)$$

的计算值 120 MHz 相一致。式中  $\Delta\nu_H$  为谱线碰撞加宽;  $G_H^0(\nu_0)$  为中心频率  $\nu_0$  的小信号增益系数;  $l$  为增益介质的长度;  $\alpha$  为单程总损耗,  $I_\nu$  为频率  $\nu$  的光强,  $I_s$  为饱和光强。调谐时应保持激光模式不变, 图 3 中的调谐线不对称的原因是压电陶瓷 PZT 伸缩的非线性。

将实际功率 5 W 的 10P(30) 线入射到充有 80 mTorr 的光声池中, 测得饱和吸收光声光谱如图 4(a) 所示。在光声光谱信号的峰值处观察到很深的饱和凹陷, 其对比度  $h$  约为 22%, 在室温  $T=300$  K, 由  $\Delta\nu_D = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{M/T}$  计算得 CO<sub>2</sub> 吸收线的都普勒线宽为 53 MHz, 由此测得凹陷宽度约为 2.5 MHz, 光谱分辨率大于  $10^7$ 。凹陷对比度和宽度比文献 [3] 的结果好得多。图 4(b) 表明, 增加气压, 凹陷变宽, 这与理论分析结果是一致的。

$T=300$  K 时, SF<sub>6</sub> 的都普勒线宽为 30 MHz 将 10P(16) 支线 (10.55  $\mu$ m) 入射到气压

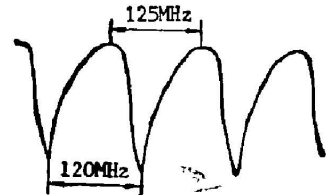


Fig. 3 CO<sub>2</sub> laser 10P(30) tuning characteristics ( $I=10$  mA)

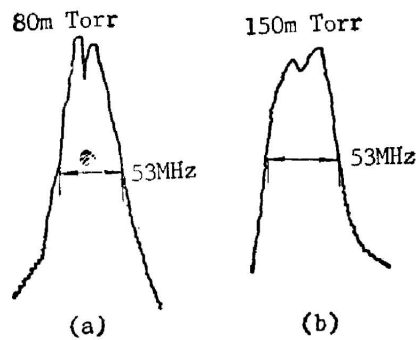


Fig. 4 OA saturation spectrum of  $\text{CO}_2$  ( $P_{in}=5\text{ W}$ )

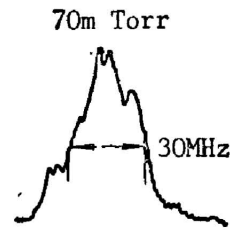


Fig. 5 Optoacoustic saturated spectrum of the  $\text{SF}_6$  molecule ( $P_{in}=5\text{ W}$ )

70mTorr 的光声池中, 当激光频率扫过  $\text{SF}_6$  分子的都普勒吸收线型时, 得到图 5 所示的光声光谱。明显地可观察到五个饱和吸收凹陷, 中心凹陷宽度约为 1.9 MHz 其中最大对比度约为 42%, 这与文献 [7、8] 比较多观察到四个饱和凹陷, 表明了  $\text{SF}_6$  对  $\text{CO}_2$  10P(16) 线吸收的复杂性质, 对比度也提高了。光谱分辨率大于  $10^7$ 。

综上所述, 采用的外腔共振多程光声饱和吸收光谱技术具有以下优点:

(1) 高灵敏度、高分辨率, 与直接测量吸收光谱相比, 灵敏度高, 分辨率高以及设备造价也低;

(2) 与腔内驻波场饱和吸收相比, 腔外法可消除饱和吸收体对激光振荡频率和强度的任何影响, 并可灵活控制改变激光强度和吸收池长度, 使共振多程光声池得到成功的应用, 实现高灵敏度和高分辨检测;

(3) 应用 Herriott 腔的闭合条件, 我们巧妙地探测波以相反方向按原路返回, 所以逆向强弱二行波光束夹角  $\phi$  几乎为零, 可消除几何加宽;

(4) 入射到光声池的光束与出射光束在窗口有一小的交角(如图 1 所示), 只要在光路上设置一小孔光阑就可避免出射光束反馈到激光器中引起波动, 而不必增加光学隔离器。

当然, 如果应用稳频激光器加上精确的频率定标, 实验结果将会更佳。

作者对匡一中教授的帮助, 西德马·普学会量子光学研究所 G. Leuchs 博士与我们所作的有益讨论, 在此一并表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

- [1] W. E. Lamb; *Phys. Rev.*, 1964, **134A**, No. 6 (Jun), 1429~1450.
- [2] E. E. Marinero *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **30**, No. 3 (Sep), 349~350.
- [3] A. Di. Lieto *et al.*; *Opt. Commun.* 1979, **31**, No. 1 (Oct), 25~27.
- [4] V. S. 莱托霍夫, V. P. 契勃塔耶夫;《非线性激光光谱学》, (科学出版社, 北京, 1964), 75, 119.
- [5] D. Herriott *et al.*; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, No. 4 (Apr), 523~526.
- [6] 蔡邦维等;《应用激光》, 1968, **6**, No. 1 (Feb), 18.
- [7] 黄永楷等;《激光》, 1981, **8**, No. 6 (Jun), 50~51.
- [8] 黄永楷等;《中国激光》, 1985, **12**, No. 1 (Jan), 25~31.

**Doppler-free saturated absorption spectroscopy of  $\text{CO}_2$   
and  $\text{SF}_6$  molecules by using a resonant  
optoacoustic multipass cell (MPC)**

CAI BANGWEI, LÜ BAIDA AND CHEN XIMING  
(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu*)

(Received 19 March 1987; revised 19 June 1987)

**Abstract**

The Doppler-free saturated spectroscopy of the  $\text{CO}_2$  and  $\text{SF}_6$  molecules is investigated experimentally by using optoacoustic detection with a resonant multipass cell. The width of the absorption dip for  $\text{CO}_2$  is measured to be about 2.5 MHz, five absorption dips for  $\text{SF}_6$  are observed in the experiments, and the dip width is about 1.9 MHz. In both cases the spectral resolving power is greater than  $10^7$ .

**Key words:** resonant multipass cell; optoacoustic detection; spectral resolving power.