

# CO<sub>2</sub> 激光器混合物中的电子能量分布

谢培良 王玉芝 董景星

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 从探针电流的二次谐波分量获得了电子能量的分布函数, 研究了 CO<sub>2</sub> 激光器中 N<sub>2</sub>、He、Xe 等添加剂对电子能量分布函数的影响, 并给出了测量情况下的平均电子能量。

## Electron energy distribution in CO<sub>2</sub> laser mixtures

Xie Peiliang, Wang Yuzhi, Dong Jingxing

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

**Abstract:** The distribution function of electron energy is obtained from the second harmonic component of the probe current. The influence of the additives N<sub>2</sub>, He, Xe on the electron energy distribution in CO<sub>2</sub> laser mixtures are studied, and the average electron energy is obtained.

### 一、引 言

在分子气体的弱电离放电中, 平均电子能量通常在 1~3 电子伏, 一般并不遵守麦克斯韦分布<sup>[1]</sup>。电子能量分布对原子、分子能量交换过程起重要作用, 在气体激光器中, 由电子能量分布函数可以得到飘移速度、电离系数、能级激发速率等一系列系数, 从而预期激光器性能。在分子激光器混合物中, 国内外已有若干文章从理论上<sup>[2,3]</sup> 和实验上<sup>[4,5]</sup> 进行了电子能量分布的研究。本文在用双探针获得 CO<sub>2</sub> 激光器等平均电子能量的基础上<sup>[7]</sup>, 进一步根据探针电流的二次谐波分量, 获得了电子能量的分布函数。

### 二、实验方法

放在放电等离子体正柱区的探针, 等离子体中的电子能量分布函数与探针电流有下列关系<sup>[8]</sup>:

$$F(V) = \frac{2}{eA} \left( \frac{2mV}{e} \right)^{1/2} \frac{d^2 i}{dV^2} \quad (1)$$

式中  $A$  为探针表面积;  $e$ 、 $m$  分别为电子的电荷与质量;  $V$  为相对于等离子体电位的探针电位;  $\frac{d^2 i}{dV^2}$  为探针电流的二次导数。在探针电位  $V$  上叠加小振幅的正弦电位  $V_p(t) = V_0 \sin \omega t$  时, 探针电流为  $i_e = f[V + V_p(t)]$ ,

收稿日期: 1982年5月12日。

用台劳级数展开得:

$$i_0 = f(V) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f^{(n)}(V)}{n!} (V_0 \sin \omega t)^n \quad (2)$$

式中  $f^{(n)}(V)$  为  $f(V)$  的  $n$  阶导数。当正弦调制电压振幅  $V_0$  较小时, 由(2)式得探针电流的二次谐波分量:

$$i(2\omega) = -\frac{V_0^2}{4} f''(V) \cos 2\omega t \quad (3)$$

因此,  $f''(V)$  与探针电流的二次谐波成比例, 故可以用二次谐波法来获得电子能量分布函数。实验装置示于图1。放电管长43厘米, 内径5毫米。工作气压2~5托, 工作电压1000~3000伏, 探针半径  $r=0.15$  毫米, 探针长2毫米, 测量时, 探针上所加正弦调制电压的频率为700赫, 调制电压幅值为0.2~0.3伏。

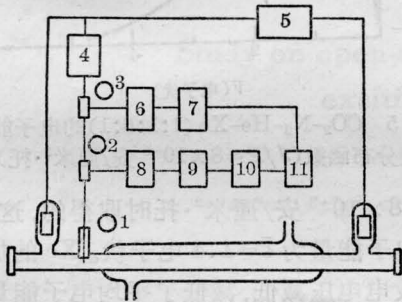


图1 电子能量分布函数实验示意图

1—探针; 2,3—电阻; 4—探针电源; 5—放电电源; 6—滤波器; 7—1.4千赫谐振放大器; 8—变压器; 9—700赫振荡器; 10—倍频器; 11—FS-1锁相放大器

对于数托量级的气压, 圆柱探针尺寸及气压修正公式为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{d^2 i}{dV^2} = \frac{eA}{2} \sqrt{\frac{e}{2m}} \left( \frac{F(V)}{\sqrt{V}} - \psi \theta \right) \quad (4)$$

式中  $\psi = \frac{3}{2} \frac{r}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{\lambda}{r} \right)$ ,  $\lambda$  为电子平均自由程,

$$\theta = \int_u^\theta \frac{F(u)}{\sqrt{u^3} \left( 1 + \frac{\psi}{2} \right)^3 \left( \psi - \frac{\psi}{\psi+2} \right)^3} du \quad (5)$$

$r=0.5$  毫米圆柱探针, 气压为0.63托的纯

Ne 放电中, 用麦克斯韦分布近似计算得知, 在电子能量较小时, 修正与未修正所获得的电子能量分布相差约15%, 而在电子能量较大时, 则分布是一致的。对于  $\text{CO}_2$  激光器中的混合气体, 电子能量分布与麦克斯韦分布不符, 这时(5)式可用数值求解, 估计未经修正的结果的误差不超过20%<sup>[4]</sup>。

电子能量分布函数  $F(V)$  用归一化值:

$$\int_0^\infty F(V) dV = 1$$

定义有效平均电子能量  $\bar{\epsilon}^{[10]}$

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{3} \int_0^\infty V F(V) dV \quad (6)$$

### 三、实验结果

图2为  $\text{CO}_2$  气体放电的电子能量分布函数, 在  $E/N=7.6 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup>, 电流密度、气压比  $J/P=8 \times 10^{-3}$  安/厘米<sup>2</sup>·托,  $P=2.5$  托时, 有效平均电子能量  $\bar{\epsilon}=2.5$  电子伏;  $E/N=5 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup>,  $J/P=4 \times 10^{-3}$  安/厘米<sup>2</sup>·托,  $P=5$  托时,  $\bar{\epsilon}=2.1$  电子伏。在  $\text{CO}_2$  放电中,  $000 \rightarrow 00^0 1$  过程非弹性碰撞截面的阈值为0.291电子伏,  $000 \rightarrow 0n^0 0 + n^0 0$  过程则为2.5电子伏。具有7电子伏能量以上的电子对  $\text{CO}_2$  分解起重要作用<sup>[2]</sup>, 图2表明, 在我们的实验条件下, 有一

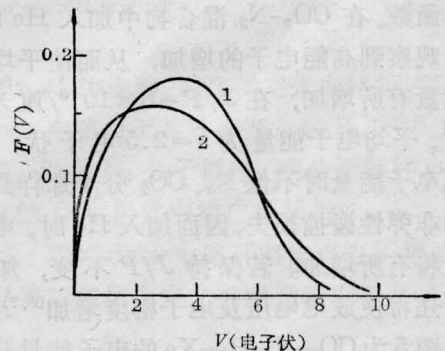


图2  $\text{CO}_2$  放电中的电子能量分布函数

1— $E/N=7.6 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup>,  $J/P=8 \times 10^{-3}$  安/厘米<sup>2</sup>·托; 2— $E/N=5 \times 10^{-16}$  伏·厘米<sup>2</sup>,  $J/P=4 \times 10^{-3}$  安/厘米<sup>2</sup>·托

定数量能量大于7电子伏的电子,因而,放电管中会有相当数量的CO分子,在非流动状况下,曾观察到CO浓度达40%<sup>[5]</sup>。

图3为纯N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>混合气体放电中的电子能量分布函数,当有N<sub>2</sub>存在时,在2.3电子伏附近N<sub>2</sub>的头8个振动能级的非弹性碰撞截面较大;而在4.5电子伏时,这种非弹性碰撞截面减低几个量级<sup>[5,10]</sup>,这种共振截面特性使低能电子增多。故在纯N<sub>2</sub>放电时, $J/P=7.7 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托, $\bar{\epsilon}=1.7$ 电子伏;而在CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>(1:1)放电时, $J/P=8 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托, $\bar{\epsilon}=1.9$ 电子伏,可见在CO<sub>2</sub>中加入N<sub>2</sub>气体会使平均电子能量减小。

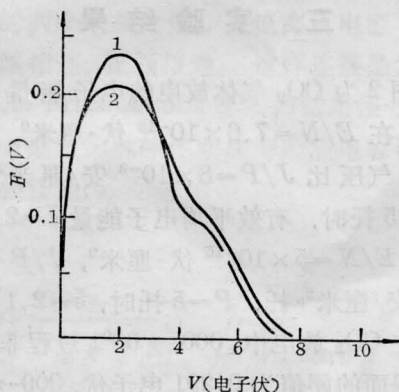


图3 N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>的电子能量分布函数  
1—N<sub>2</sub> $J/P=7.8 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托;  
2—CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>(1:1) $J/P=8 \times 10^{-3}$ 安/厘米·托

图4为CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He放电中的电子能量分布函数。在CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>混合物中加入He时,可以观察到高能电子的增加,从而使平均电子能量有所增加,在 $J/P=8 \times 10^{-3}$ /厘米<sup>2</sup>·托时,平均电子能量为 $\bar{\epsilon}=2.5$ 电子伏。He在低电子能量时不像N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>分子那样具有大的非弹性碰撞损失,因而加入He时,电子能量将有所增加。若保持 $J/P$ 不变,加入氦时还将使放电电压及电子密度增加<sup>[5,7]</sup>。

图5为CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He-Xe的电子能量分布函数,由图可见,Xe的加入使电子能量分布改变了,它使1电子伏左右的电子增加较多,而4电子伏以上的电子显著减少。图中曲线是在

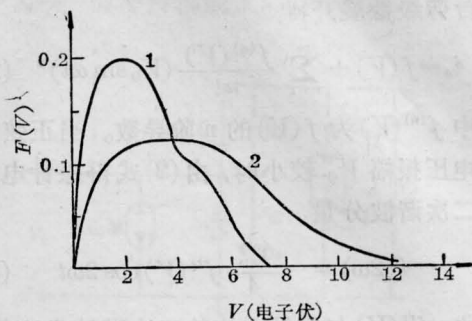


图4 CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He的电子能量分布函数  
1—CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>(1:1); 2—CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He(1:1:6)  
 $J/P=8 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托

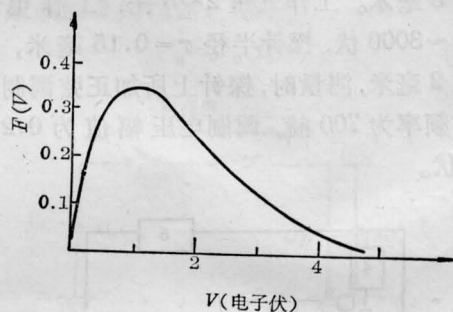


图5 CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He-Xe(1:1:6:1)的电子能量分布函数( $J/P=8 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托)

$J/P=8 \times 10^{-3}$ 安/厘米<sup>2</sup>·托时取得的,这时的平均电子能量为 $\bar{\epsilon}=1.4$ 电子伏。Xe的加入,还使放电电压减低,减低了平均电子能量,从而使N<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>的振动激发截面增加,所以Xe对激光器性能的提高有明显的作。

### 参 考 文 献

- [1] W. L. Nighan; *Phys. Rev. A.*, 1970, **2**, 1989.
- [2] J. J. Lowke; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 4664.
- [3] 霍芸生等;《激光》,1979, **6**, No. 7, 5.
- [4] P. Avivi *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**, 5551.
- [5] M. Z. Novgorodov; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1971, **QE-7**, 508.
- [6] M. З. Новгородов; *ЖТФ*, 1972, **42**, 2190.
- [7] 王玉芝等;《激光》,1980, **7**, No. 10, 17.
- [8] J. D. Swift, M. J. R. Schwar; "Electrical Probes for Plasma Diagnostics", London Iliffe Books LTD, 1970.
- [9] D. Stachorska; *Pro. Iwelfth. Inter. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*, 1975.
- [10] E. R. Pike; *High-Power Gas Lasers*, 1975, The Institute of Physics, London.