

微波谐振腔测量气体激光器电子密度

Abstract: Electron densities in CO₂ laser, CO laser and discharge of various kinds of gases such as CO₂, N₂, and He, have been measured with microwave cavity.

The dependence of electron density, gas pressure, gas composition, discharge current and E/P have been studied

一、基本原理

微波谐振腔方法广泛地用来测量气体激光器的电子密度^[1-4]。当等离子体置入微波腔后,由于放电等离子体对微波腔频率的微扰,引起谐振腔共振频率漂移及Q值变化,而频率漂移及Q值变化,又与等离子体的电子密度及空间分布、电子瞬间跃迁碰撞频率和它的空间分布等参数密切相关。

由一级微扰理论,共振腔频率漂移 $\Delta\omega$ 与具有电导 σ 的等离子体的关系如下^[5]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{j}{2\omega\epsilon_0} \left(\int \sigma E_0^2 dv / \int E_0^2 dv \right) \quad (1)$$

式中 E_0 为不存在微扰时的微波电场; ϵ_0 为介电常数; ω 为不存在微扰时的共振频率; $\Delta\omega$ 为频率漂移。积分是沿着腔体进行的。

对于不同的模式,计算公式也不尽相同。我们的微波腔场型为TM₀₁₃,腔半径2.8厘米,放电管直径1厘米。在这种模式下,实验腔的频率漂移公式为^[5]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{x_{0m}(R/a)^2}{2(k_0 a)^2 J_1^2(x_{0m})} (1 - k_{zz}) + \dots \quad (2)$$

加号后面的项,实际上是一个衰减项,在一级近似下,可忽略不计。式中

$$k_{zz} = 1 - \alpha^2 / (1 - jr)$$

$$\text{其中} \quad \alpha^2 = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}; \quad r = \frac{\nu_c}{\omega}$$

其中 ν_c 为瞬间跃迁电子的碰撞频率; ω 为共振腔角频率。当

$$\frac{\nu_c}{\omega} \ll 1$$

时, k_{zz} 可以写成 $k_{zz} = 1 - \alpha^2$ 。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{x_{0m}(R/a)^2}{2(k_0 a)^2 J_1^2(x_{0m})} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (3)$$

式中 R 为激光器放电管半径; a 为谐振腔半径, x_{0m} 为零阶贝塞尔函数 $J_0(x_{0m})=0$ 的第 m 个根; $J_1(x_{0m})$

是 x_{0m} 的一阶贝塞尔函数; $k_0 = \frac{\omega}{c}$; ω_p 为等离子体振荡频率; c 为光速。

从(3)式可得:

$$\omega_p^2 = \frac{J_1^2(x_{0m})}{x_{0m}(R/a)^2} \frac{32\pi^4 a^2}{c^2} 4ff^3 \quad (4)$$

代入具体数据后,得到等离子体的振荡频率为:

$$\omega_p^2 = 1.005 \times 10^{-16} 4f \cdot f^3 \quad (5)$$

式(5)中, $4f$ 就是我们由波长计中得到的等离子体对微波谐振腔微扰时所产生的频率漂移。 f 是从波长计中得到的不存在微扰时的谐振腔频率。

等离子体振荡频率与电子密度有如下关系^[6]

$$\omega_p^2 = n_e e^2 / m \epsilon_0 \quad (6)$$

式中 e 为电子电荷; m 为电子质量; n_e 为电子密度。

在CGSE单位制中:

$$\frac{\omega_p}{2\pi} = 8.98 \times 10^3 n_e^{1/2} \quad (7)$$

由(7)式得:

$$n_e = \frac{\omega_p^2}{(8.98 \times 10^3)^2 \times (2\pi)^2} \omega_p^2 = 3.14 \times 10^{-10} \omega_p^2$$

由(5)式得:

$$n_e = 3.16 \times 10^{-26} 4f \cdot f^3 \quad (8)$$

二、实验装置

图1为 x 波段等离子体测试系统。

速调管为723A/B型,反射极用锯齿波调制,所调制的微波信号经过隔离器、可变衰减器、波长计、方向耦合器,到测试圆柱空腔。方向耦合器把反射回来的信号输送给晶体检波器,检波的微波信号经低频放大器放大,由示波器观察。

三、测量结果

我们利用微波谐振腔测量了CO₂激光器、CO激光器及各种纯气体放电中的电子密度和电子密度随气压、气体组分、放电电流及E/P值变化的关系曲线。

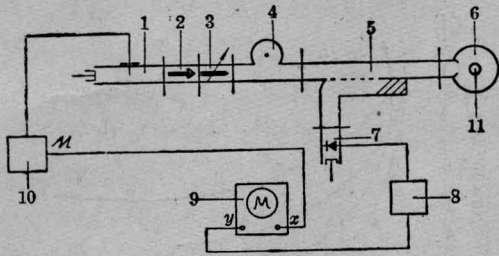


图1 微波腔测量气体激光器电子密度实验装置
1—速调管；2—隔离器；3—可变衰减器；4—波长计；5—方向耦合器；6—圆柱空腔；7—晶体检波器；8—放大器；9—示波器；10—速调管调制电源；11—激光器

1. N₂气和He气对CO₂激光器电子密度的影响(见图2)。

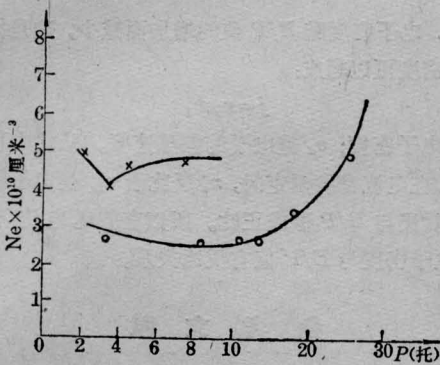


图2 N₂气和He气对CO₂激光器电子密度的影响
×—2托CO₂+毫托N₂；○—3托(CO₂+N₂)
+毫托He

从图2中可以看出，在2托纯CO₂中加入1托N₂气后，电子密度略有下降，而后，随着N₂气量的增加，电子密度稍有上升。

在CO₂:N₂为1:1，总压3托的混合气体中逐渐加入He气后，在He气量较少时电子密度几乎不变。随着He气量增加到总压为10托以后，即He的含量是CO₂的4.5倍以后，电子密度随He气压的增加变大，由 3.3×10^{10} /厘米³增加到 4.8×10^{10} /厘米³。

2. Xe气对CO₂激光器电子密度的影响(见图3)

从图3可以看出，在(1托CO₂+1托N₂+8托He)的混合气体中加入Xe气后，使电子密度大幅度增加，由 3.7×10^{10} /厘米³增加到 5.9×10^{10} /厘米³，增加了60%。

3. He气和Xe气对CO激光器电子密度的影

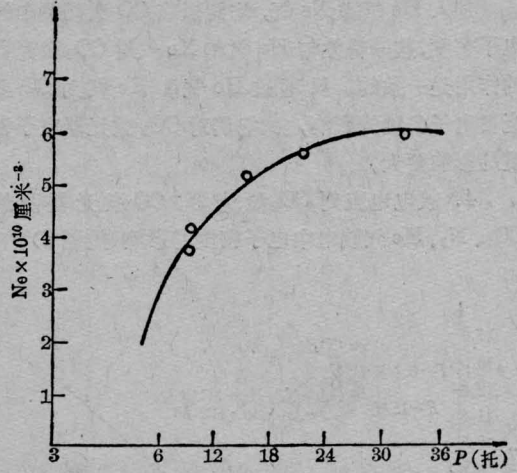


图3 Xe气对CO₂激光器电子密度的影响

○—10托(CO₂+N₂+He)+毫托Xe

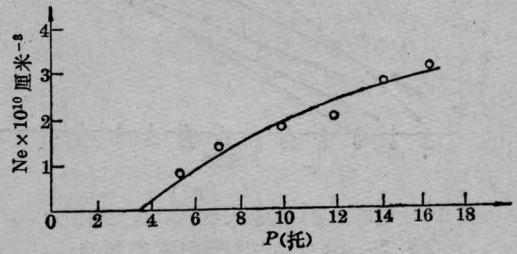


图4 He气对CO激光器电子密度的影响

○—0.6托CO+1.2托Xe+毫托He；
I—为8毫安

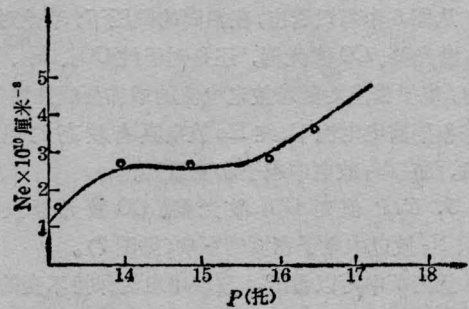


图5 Xe气对CO激光器电子密度的影响

○—13托(CO+He)+毫托Xe

响(分别见图4、图5)

从图4中可以看出，在(0.6托CO+1.2托Xe)的混合气体中加入He气后，使电子密度增加较快，由 0.7×10^{10} /厘米³增加到 3.4×10^{10} /厘米³。

从图5中可以看出，在13托(CO₂+He)的混合气体中加入Xe气后，也使电子密度增加，由 1.3×10^{10} /厘米³增加到 3.8×10^{10} /厘米³。

加入 He 气和 Xe 气, 均能提高 CO 激光器中的电子密度, 这一特性与 He 气和 Xe 气对 CO₂ 激光器的作用是一致的。只不过 He 气和 Xe 气对 CO 激光器电子密度的影响, 比它们对 CO₂ 激光器电子密度的影响要大。

4. 放电电流对 CO₂ 激光器, CO 激光器及纯 CO₂、N₂、He 气放电中电子密度的影响(见图 6)

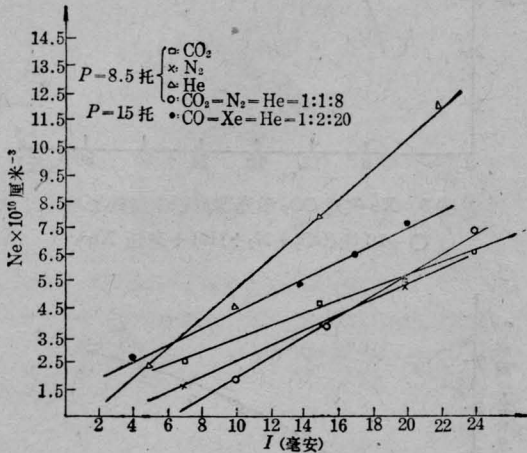


图 6 放电电流对 CO₂ 激光器、CO 激光器和对 CO₂、N₂、He 放电中电子密度的影响
 $P=8.5$ 托 (□—CO₂; ×—N₂; △—He; ○—CO₂:N₂:He=1:1:8); $P=15$ 托 (●—CO:Xe:He=1:2:20)

从图 6 中可以看出, 在相同的气压下, 不论对于 CO₂ 激光器、CO 激光器, 还是对于纯 CO₂、N₂、He 放电, 电子密度均随着放电电流的增加而线性增加。但在相同放电电流下, 纯 He 放电具有较高的电子密度, 而在 N₂ 放电中电子密度最低。

5. E/P 值对 CO₂ 激光器、CO 激光器及纯 CO₂、N₂ 放电中电子密度的影响(见图 7)。

从图 7 中可以看出, 在放电电流保持不变的条

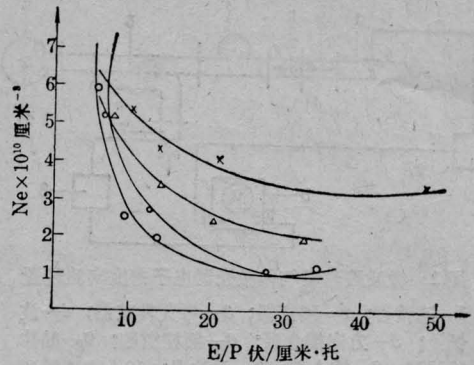


图 7 E/P 值对 CO₂ 激光器、CO 激光器、CO₂、N₂ 放电中电子密度的影响

△—N₂; ×—CO₂; ○—CO; ×e:He=1:2:20; □—CO₂:N₂:He=1:1:8; $I=15$ 毫安

件下, 电子密度随 E/P 值的增加而减少, 这是因为电流密度可以写成:

$$j = n_e e v_d$$

n_e 是电子密度; v_d 是电子的漂移速度。从式中可以看出, 在电流密度恒定时, n_e 反比于 v_d , 而电子的漂移速度又与 E/P 值成正比。所以在放电电流不变时, 电子密度与 E/P 值有反比关系。

参 考 文 献

- [1] P. F. Sland; *Phys. Rev.*, 1951, **84**, p. 559.
- [2] L. Gould, S. C. Brown; *Phys. Rev.*, 1954, **95**, 897.
- [3] J. M. Anderson; *Phys. Rev.*, 1956, **102**, 933.
- [4] A. L. Gilardini; *Phys. Rev.*, 1957, **105**, 25.
- [5] S. J. Buchsbaum; *Phys. Fluids*, 1960, **3**, 806.
- [6] 卢鹤跋等; 《受控热核反应》, 上海科学技术出版社出版, 1962 年。

(中国科学院上海光机所 王玉芝 谢培良
董景星 1980 年 9 月 17 日收稿)