

微波干涉仪测量气体放电管电子密度

王玉芝 谢培良 董景星

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文用 3 厘米微波干涉仪, 以锁相放大器作检测器; 测量了微波通过气体放电管时所引起的相移。研究了在放电管中添加 N_2 、He、Xe 等气体对电子密度的影响。

Measurement of electron density of a gas discharge tube with microwave interferometer

Wang Yuzhi Xie Peiliang Dong Jingxing

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

Abstract: A 3 cm X-band microwave interferometer with a phase-locked amplifier as detector has been used to measure small phase changes as a microwave beam passing through the gas discharge tube.

The influences of adding N_2 , He, Xe in the discharge tube on electron density are studied.

一、微波干涉仪

微波沿等离子体传播时, 会被等离子体吸收、反射、散射而衰减, 同时产生相移。这些变化是与等离子体参量有关的, 因此它提供了一个诊断等离子体的好方法。我们所研制的干涉仪如图 1 所示。

由于在我们的实验中, 等离子体的密度较低, 振幅的衰减约为相移的 10^{-2} , 因此其衰减可以忽略。因而检波器输出端信号与等离子体所产生的相移成比例。根据等离子体密度与相移的关系, 即可得到待测等离子体密度。

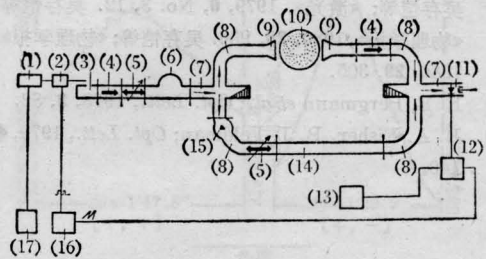


图 1 3 厘米微波干涉仪

1—耿氏 (Gun) 振荡器, 产生 7.5~12.4 千兆周, 5 毫瓦微波; 2—PIN 调制器, 产生 1 千周方波调制; 3—同轴波导转换; 4—隔离器; 5—可变衰减器; 6—频率计; 7—魔 T; 8—弯波导; 9—喇叭天线; 10—激光器; 11—晶体检波器; 12—锁相放大器; 13—示波器; 14— $0\sim 180^\circ$ 相移器; 15—转换开关; 16—调制电源; 17—电源

收稿日期: 1981 年 1 月 6 日。

二、计 算

在碰撞频率 ν 满足条件 $\nu \ll \omega$, $\omega_p < \omega$, 其中 ω 是微波频率; ω_p 是等离子体频率, 则等离子体存在时所引起的相移为:

$$\Delta\phi = \int_{x=0}^{x=L} (\beta_0 - \beta_p) dx \quad (1)$$

式中 L 为微波穿过的路程; β_0 、 β_p 分别为真空中及等离子体的相位常数。

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2)$$

$$\beta_p = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{2(\omega^2 + \nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

又因 $\omega_p^2 = \frac{n e^2}{\epsilon_0 m}$, 在一级近似下有:

$$\beta_p = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{n e^2}{2 \epsilon_0 m (\omega^2 + \nu^2)} \right) \quad (4)$$

式中 λ_0 是微波波长; ϵ_0 是气体真空介电常数; m 、 e 分别为电子质量和电子电荷; n 是等离子体电子密度。将(2)、(4)代入(1)则得到:

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right) \left(\frac{e^2}{4m\epsilon_0} \right) \frac{1}{(\omega^2 + \nu^2)} \int_0^L n(x) dx \quad (5)$$

等离子体的平均电子密度可以写成:

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L n(x) dx \quad (6)$$

将(5)代入(6)中可以得到:

$$\bar{n} = 37.63 \left(\frac{\omega^2 + \nu^2}{\omega} \right) \frac{\Delta\phi}{L} / \text{厘米}^3 \quad (7)$$

式中的 $\Delta\phi$ 以弧度为单位, 在稀薄等离子体中, 满足 $\nu \ll \omega$, 则(7)可以写成:

$$\bar{n} \approx 0.657 \omega \frac{\Delta\phi}{L} / \text{厘米}^3 \quad (8)$$

在实验中取 $f = 9.9 \times 10^9$ 赫, $L = 6$ 厘米, 则:

$$\bar{n} = 6.8 \times 10^9 \Delta\phi / \text{厘米}^3 \quad (9)$$

式(9)中 $\Delta\phi$ 是由于等离子体存在所引起的相移(以度为单位)。

利用锁相放大器检测, 可以提高测试灵敏度。我们以直径为 6 厘米, 充入 1 大气压

N_2 的放电管, 观测锁相放大器指示来定标, 这时候得到的相移按[2]给出的公式计算, 结果为:

$$\Delta\phi_0 = 0.209 (\text{度})$$

相应可测最低的电子密度为 $n = 1.36 \times 10^8 / \text{厘米}^3$ 。

微波在等离子体中传播的频率 ω 小于等离子体的特征频率 ω_p 时, 其振幅将由于等离子体的吸收、反射、散射而衰减。最终使微波完全不能透过等离子体。所以存在“截止”频率 $\omega = \omega_p$, 相应的临界电子密度为 $n_{co} = 1.2 \times 10^{-8} f^2 [3]$ 。

三、实验结果

我们利用微波干涉仪, 在 CO_2 与 CO 放电管中, 测量了 N_2 、 He 、 Xe 等气体对电子密度的影响, 同时也测量了电子密度与放电电流及总气压的关系。

1. 电子密度与放电电流的关系(见图 2、图 3)

由图 2、3 可知, 无论对于 CO_2 、 N_2 、 He 混合气体放电, 还是对于不同比例下的 $CO_2:N_2:He$ 混合气体放电, 电子密度均随着放电电流的增加而增加。从图 2 中还可看到,

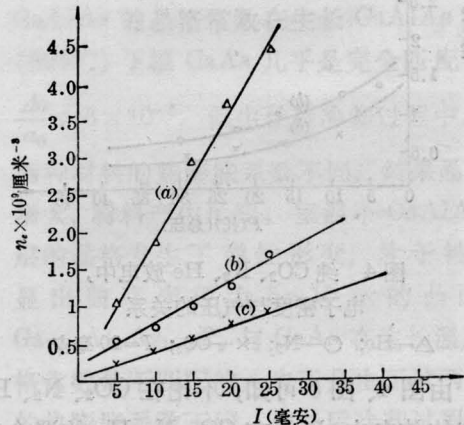


图 2 纯 CO_2 、 N_2 、 He 放电中, 电子密度与放电电流的关系

$\times - CO_2$; $\circ - N_2$; $\triangle - He$; $P = 9$ 托

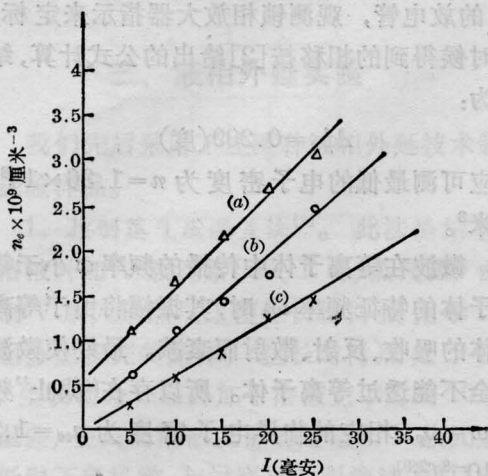


图3 在不同比例的 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ 混合气体放电中, 电子密度与放电电流的关系

×— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:1$; ○— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:3$;
△— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$; $P=9$ 托

在同一放电电流下, He 气放电的电子密度较高。从图3中也还可看到, 在同一放电电流下, 在 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ 的混合气体中, 含 He 的比例高, 相应的电子密度较大。

2. 电子密度与气压的关系 (见图4、图5)

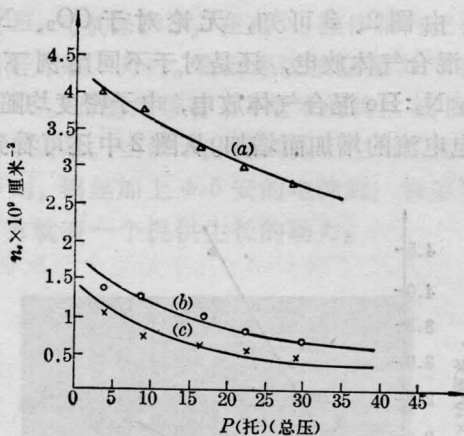


图4 纯 CO_2 、 N_2 、 He 放电中, 电子密度与气压的关系

△—He; ○— N_2 ; ×— CO_2 ; $I=20$ 毫安

由图4、图5可知, 不论在 CO_2 、 N_2 、 He 纯气体放电中, 还是在 CO_2 、 N_2 、 He 的混合气体放电中, 电子密度均随着总气压的升高而降低。

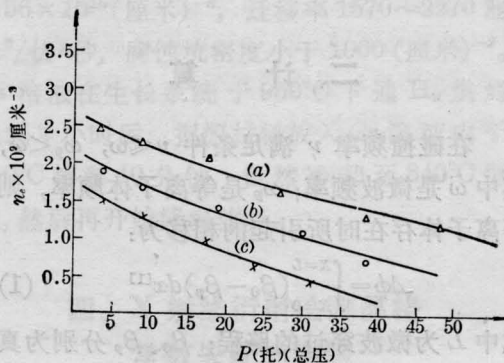


图5 在 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ 混合气体放电中, 电子密度与气压的关系

×— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:1$; ○— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:3$;
△— $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$; $I=20$ 毫安

因为随着气压的增加, 电子与分子碰撞机会也增加, 因而电子能量损失较多, 使得平均电子能量下降^[4]。又因为电子密度可以写成电子能量的函数:

$$n_e = \int_0^{\infty} f(v) dv^{[5]}$$

在平均电子能量较低时, 电子密度 n_e 与电子能量有正比关系^[6]。由于气压的增加, 引起了平均电子能量的下降, 进而使电子密度减少。

3. N_2 、 He 、 Xe 气对 CO_2 放电管电子密度的影响 (见图6)

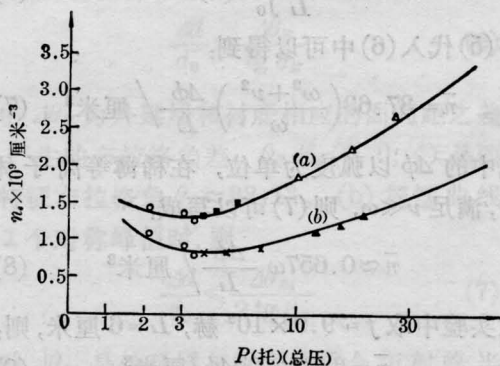


图6 N_2 、 He 、 Xe 气对 CO_2 放电管电子密度的影响

○— CO_2 ; ■— CO_2+Xe (CO_2 为 3 托); △— $\text{CO}_2+\text{Xe}+\text{He}$ (CO_2+Xe 为 7 托); ×— CO_2+N_2 (CO_2 为 4 托); ▲— $\text{CO}_2+\text{N}_2+\text{He}$ (CO_2+N_2 为 8 托)

由图 6 可知, 在 CO_2 放电管中加入 N_2 、 He 或 Xe 气后, 均使电子密度增加。

Xe 的电离电位比 CO_2 和 N_2 的电离电位都低, 当混合气体中存在着低电离电位的气体时, 促进了新电子的形成, 增加了电导率, 因而提高了电子密度。

加入 He 气后, 使得电子密度有较大的增加, 是因为 He 的加入, 改变了 CO_2 放电管中电子能量的分布, 它使只有较高能量的电

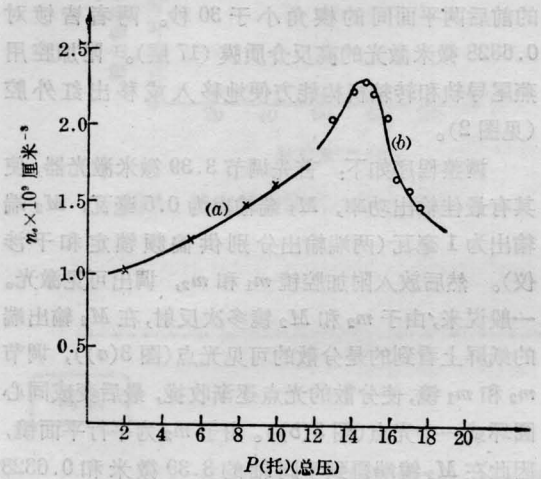


图 7 He、Xe 气对 CO 放电管电子密度的影响
 \times — $\text{CO}+\text{Xe}+\text{He}$ ($\text{CO}+\text{Xe}$ 为 2 托); \circ — $\text{CO}+\text{He}+\text{Xe}$ ($\text{CO}+\text{He}$ 为 13 托); $I=8$ 毫安

子数大大增加^[7]。

4. He 与 Xe 对 CO 放电管电子密度的影响 (见图 7)

加入 He 使 CO 放电管电子密度增加, 这与 He 对 CO_2 放电管电子密度的影响是一致的。

从图 7 中可以看到, 在 CO_2 与 He 的混合气体中, 加入适量 Xe 气后, 电子密度有最佳值。这是因为, 当加入少量的 Xe 气后, 由于新电子的形成, 使得电子密度增加。然而随着 Xe 气压的增加, 使得 CO 放电管的平均电子温度下降^[4], 电子密度也随着减少。

参 考 文 献

- [1] H. J. J. Sequin; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, No. 6, 344.
- [2] E. Hotston, M. Seidl; *J. Sci. Instrum.*, 1965, **42**, 225.
- [3] 卢鹤跋; 《受控热核反应》, 上海科技出版社, 1962 年。
- [4] 王玉芝等; 《激光》, 1980, **7**, No. 10, 17.
- [5] P. Avivi, F. Dothan Deutsch; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42** No. 13, 5551.
- [6] B. W. Smithers; *J. Sci. Instrum.*, 1962, **39**, 21.
- [7] M. Z. Norgozodov; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1971, **QE-7**, 510.

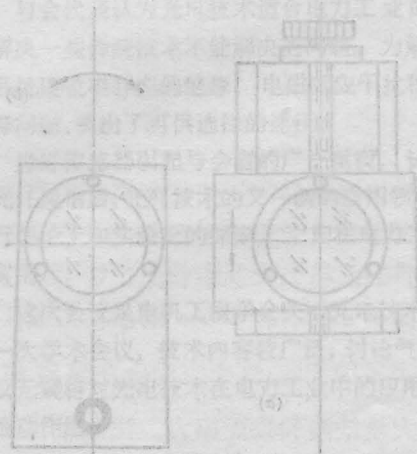


图 8 放电管结构示意图 (a) 为 $\text{CO}+\text{He}+\text{Xe}$ 混合式 (b) 为 $\text{CO}+\text{Xe}+\text{He}$ 混合式