

脉冲放电及紫外光电离电子 密度实验研究

谢培良 王玉芝 董景星 王凤云 张锡刚

(中国科学院上海光机所)

提要: 用 X 波段外差式微波干涉仪, 测得了脉冲放电余辉电子密度以及 TEA CO₂ 激光器、HF 激光器紫外光预电离的电子密度。文中给出等离子体分布不均匀引起的微波相移计算公式。

Experimental study on electron density of pulsed discharge and U. V. photoionization

Xie Peiliang, Wang Yuzhi, Dong Jingxing, Wang Fengyun, Zhang Xigang

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

Abstract: The electron density of afterglow of pulsed discharge and the electron density of U. V. photoionization in the TEA CO₂ laser, HF laser mixtures have been studied by using an X-band superheterodyne microwave interferometer. The formulas of microwave phase shift introduced by the non-uniform plasma are derived.

一、引言

在气体激光器中, 等离子体电子密度是一个重要参量, 它对激光器运转有重要影响^[1]。在连续运转的激光器中, 电子密度的测量已有较多报道^[2,3], 但关于纵向放电脉冲运转的气体激光器电子密度的实验报导还不多。我们采用研制成的快响应高灵敏度 X 波段外差式微波干涉仪, 测量了脉冲 CO₂ 激光器余辉电子密度以及 TEA CO₂ 激光器、HF 化学激光器的紫外光预电离电子密度等。文中还给出了由于等离子体电子密度分

布不均匀引起的微波相移计算表达式, 采用这些公式进行修正, 可使实验结果更精确。

二、实验方法

图 1 为测量脉冲放电电子密度 X 波段外差微波干涉仪装置。干涉仪采用有 AFC 系统的两个 Gun 氏振荡器, 外差到 30 兆赫。干涉仪工作时, 信号交叉混频器输出中频分量, $V_s = k_1 E_1 E_2 (\Delta\omega t + \phi - \alpha)$, 参考混频器输出中频分量为 $V_R = k_2 E'_1 E'_2 (\Delta\omega t + \theta - \psi)$, 式中 k_1 、 k_2 为常数, E_1 、 E_2 分别为信号混频器

收稿日期: 1983 年 4 月 5 日。

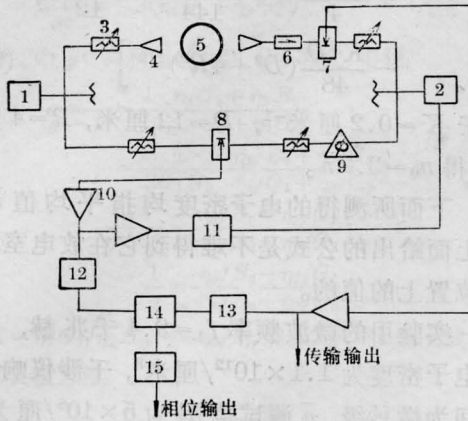


图1 电子密度测试装置图

1—Gun 氏主振荡器(f_1); 2—带变容管的 Gun 氏本机振荡(f_2); 3—可变衰减器; 4—喇叭天线; 5—放电等离子体室; 6—隔离器; 7—信号交叉混频器; 8—参考混频器; 9—微波相移器; 10—30兆赫中放; 11—AFC 系统; 12—延迟电路; 13—限幅器; 14—相位检波器; 15—差分放大器

接收来自主振荡器和本机振荡器的信号幅值, E'_1 、 E'_2 为参考混频器接收到的相应值。 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 30$ 兆赫, ω_1 、 ω_2 分别为主振荡器和本机振荡频率, ϕ 为等离子体引起的相移。 α 、 θ 、 ψ 为微波电路引入的固定相位, 可以用微波相移器补偿。通过微波外差程序, 等离子体引起的微波相移变换成中频 30 兆赫的相移, 这种相移由相位检波器输出, 显示于示波器上。干涉仪也能直接测量等离子体对通过它的微波的衰减量。

对于圆柱形放电室, 微波在通过柱形等离子体时, 如果满足 $\frac{D}{\lambda} \gg 1$, $\frac{P}{D} \ll 1$, 那么柱形等离子体可以看作厚度为 D 的等离子体^[4]。这里 D 为圆柱直径, λ 为微波波长, P 为喇叭天线接收到通过等离子体柱体的微波束宽。

我们所研究的等离子体对通过的微波来说具有洛伦兹电导率, 复数介电常数为:

$$K = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (1)$$

式中等离子体频率 $\omega_p = \left(\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}\right)^{1/2}$, ω 是微

波频率, 电子碰撞频率 $\nu = \left(\frac{8KT}{\pi m_e}\right)^{1/2} (N_i Q_{ei} + N_n Q_{en})$, Q_{ei} 、 Q_{en} 分别为电子与离子及中性粒子的碰撞截面, 在所用实验条件下, $\omega > \nu$ 。在等离子体中传播的均匀平面波为 $Ae^{j(\omega t - \nu z)}$, 其传播常数:

$$\gamma = \alpha + j\beta = jK^{1/2} \frac{\omega}{C} \quad (2)$$

式中 α 为衰减系数, β 为相位系数。

在气体放电室中, 电子密度分布一般是不均匀的, 当 $\frac{D}{\lambda} \gg 1$, $\frac{P}{D} \ll 1$ 时, 对微波传输而言, 可简化为沿传输方向的一维分布。于是在 $\omega > \omega_p$ 的一级近似下, 由(1)、(2)式可得微波相移为:

$$\Delta\phi = \int_0^D (\beta_0 - \beta) dz = \frac{2\pi D}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^D \left[1 - \frac{n(z)e^2}{2\epsilon_0 m (\omega^2 + \nu^2)}\right]^{1/2} dz \quad (3)$$

衰减为

$$\Delta A = \int_0^D (\alpha_0 - \alpha) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{e^2}{2\epsilon_0 m}\right] \times \left[\frac{\nu}{m}\right] \left[\frac{1}{\omega^2 + \nu^2}\right] \int_0^D n(z) dz \quad (4)$$

取平均电子密度

$$\bar{n} = \frac{1}{D} \int_0^D n(z) dz, \quad n(z) = n_0 f(z)。$$

n_0 为放电室中心处的电子密度, $f(z)$ 为沿传输方向 z 的分布函数。由(3)、(4)式得到平均电子密度 \bar{n} 与 $\Delta\phi$ 、 ΔA 的关系为:

$$\bar{n} = 0.6567 \left(\frac{\omega^2 + \nu^2}{\omega}\right) \frac{\Delta\phi(\text{度})}{D(\text{厘米})} \quad (5)$$

$$\bar{n} = 2.16 \left(\frac{\omega^2 + \nu^2}{\nu}\right) \frac{\Delta A(\text{分贝})}{D(\text{厘米})} \quad (6)$$

在低压圆柱辉光放电管中, 电子密度径向分布为贝塞耳分布^[3]。在 TEA CO₂ 激光器中, 紫外预电离产生的光电子密度分布成指数分布^[5], 下面给出不同分布函数 $f(z)$ 、电子密度 n_0 与相移 $\Delta\phi$ 的关系。

1. 贝塞耳分布

分布函数 $f(z) = J_0 \left[K \left(1 - \frac{2z}{D} \right) \right]$, 用贝塞耳函数的展开式, 得到相位移 $\Delta\phi$ 为:

$$\Delta\phi = n_0 D \left[\frac{e^2}{2mc\epsilon_0} \right] \left[\frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right] \sum_{N=0}^{\infty} \times \frac{(-1)^N}{(N!)^2} \frac{1}{2N+1} \left(\frac{K}{2} \right)^{2N} \quad (7)$$

平均电子密度 \bar{n} 与放电管中心处电子密度 n_0 关系为:

$$\bar{n} = n_0 \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(-1)^N}{(N!)^2} \frac{1}{2N+1} \left(\frac{K}{2} \right)^{2N} \quad (7a)$$

圆柱辉光放电中 $K = 2.405$, 得 $\bar{n} = 0.62 n_0$, 故放电管中心电子密度 n_0 为测量得到的平均值的 1.61 倍。

2. 高斯分布

分布函数 $f(z) = e^{-K^2 \left(\frac{2z}{D} - 1 \right)^2}$, K 为常数, 可得

$$\Delta\phi = n_0 D \left[\frac{e^2}{4mc\epsilon_0} \right] \times \left[\frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right] \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(-1)^N K^{2N}}{N! (2N+1)} \quad (8)$$

当 $K^2 = 3$ 时, 得到 $n_0 = 1.95 \bar{n}$ 。

3. 指数分布

对于一步光电离产生的紫外光电子密度分布函数 $f(z)$:

$$f(z) = \frac{e^{-K \left[\left(z - \frac{D}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{1/2}}}{\left(z - \frac{D}{2} \right)^2 + R^2},$$

而 $n(z) = n_m f(z)$, $n_0 = n_m \frac{e^{-KR}}{R^2}$,

式中 n_0 、 n_m 分别为放电室中心处和紫外源处的电子密度, R 为紫外源到放电室中心的距离, K 为衰减系数。一般情况下

$$K \left(\frac{D^2}{4} + R^2 \right)^{1/2} < 3,$$

由此得到相位移 $\Delta\phi$ 为:

$$\Delta\phi = n_0 R^2 e^{KR} \left[\frac{e^2}{4mc\epsilon_0} \right] \left[\frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right] \times \left[\frac{1}{R} \operatorname{tg}^{-1} \frac{D}{2R} - K \left(1 + \frac{K^2 R}{12} \right) \ln \frac{2R}{(D^2 + 4R^2)} \right]$$

$$+ \frac{DK^2}{4} \left(1 + \frac{D^2 K^2}{144} + \frac{R^2 K^2}{12} \right) - \frac{K^3 D}{48} (D^2 + 4R^2)^{1/2} \quad (9)$$

对于 $K = 0.2$ 厘米⁻¹, $D = 12$ 厘米, $R = 4$ 厘米, 得 $n_0 = 3.2 \bar{n}$ 。

下面所测得的电子密度均指平均值 \bar{n} , 由上面给出的公式是不难得到它在放电室不同位置上的值的。

实验用的微波频率 $f_1 = 9.4$ 千兆赫, 临界电子密度为 1.1×10^{12} /厘米³, 干涉仪响应时间为微秒级, \bar{n} 测试范围为 5×10^8 /厘米³ $\sim 1.1 \times 10^{12}$ /厘米³。

在实际测量时, 如果放电器件中等离子体柱的直径 D 很大, 满足 $\frac{D}{\lambda} \gg 1$, 可用喇叭天线发射和接受微波。对于等离子体柱直径 D 较小的器件, 例如 $\frac{D}{\lambda} < 1$, 再用喇叭天线发射和接收微波, 就会由于微波的衍射而导致测试误差增加。所以必须用 Lecher 线替代喇叭天线进行电子密度的测量。

三、实验结果

1. 脉冲放电余辉电子密度

放电室内径 $D = 6$ 厘米, 放电电容 0.28 微法, 气压 $P = 3.3$ 托, $E/N = 8 \times 10^{-16}$ 伏/厘米², 图 2 为 He、CO₂、CO₂:N₂:He(1:1:8) 等气体的脉冲放电余辉电子密度与时间 t 的关系, 在放电条件相同的情况下, He 比 CO₂ 放电的 \bar{n} 高。余辉电子密度与复合系数有关, $\bar{n}_2 = \frac{\bar{n}_1}{1 + \gamma n t}$, \bar{n}_1 、 \bar{n}_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻的电子密度, γ 为复合系数。研究 He 放电, 得到复合系数与气压 P 、 \bar{n} 、电子温度 T_e 有关^[6]。对 CO₂ 激光器中的混合气体, 比例为 1:1:8 时, 取用的 $\gamma \approx 1 \times 10^{-7}$ 厘米/秒^[7] 是近似值。

圆柱辉光放电电子密度分布为零阶贝塞耳函数, 利用(7)式可以求得不同位置上的电

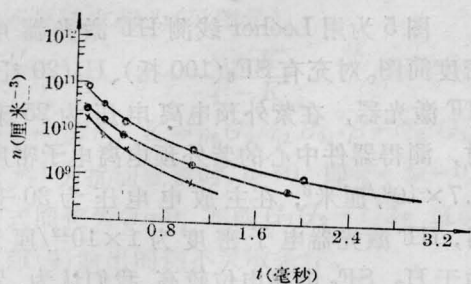


图2 脉冲放电余辉电子密度 \bar{n} 与时间 t 的关系

○—He; ●—CO₂:N₂:He(1:1:8); ×—CO₂

子密度。

2. TEA CO₂ 激光器紫外光电离电子密度 n_e

紫外光电离源为5根钨针成线性排列的火花阵,处于柱形放电室的一侧,放电室直径12厘米,放电电压8.5千伏,放电电容0.28微法,微波通道中心离紫外源的距离为4厘米。CO₂:N₂:He(1:1:8),在1大气压时,用无感电阻测量并由OK-19高压示波器记录,得到的紫外光电离源的电流振荡周期为4微秒。

图3为TEA CO₂ 激光器混合物紫外光电离峰值初始电子密度 \bar{n}_e 与气压 P 的关系。图中表明,同样放电条件下,He光电离电子密度比CO₂的高二个量级。对于含CO₂的气体混合物, \bar{n}_e 随CO₂含量的增加而减少。实验用的气体为工业纯级,含有杂质。许多实验指出^[5,8],CH类杂质的一步光电离是TEA CO₂ 激光器紫外光电离电子密度的主要机构。

图4为紫外光电离电子密度衰减的时间与气压 P 的关系。 t_p 是电子密度从初始放电的最大值衰减到 5×10^8 /厘米³ 时所需的时间。图4表明,对于同样的气体, P 越高, t_p 越小;对CO₂:N₂:He气体混合物, t_p 随CO₂含量的增加而减小。因此高于1大气压运转的TEACO₂ 激光器,为了充分利用光电离电子密度,主放电与紫外放电之间的延迟时间应随气压的增加而缩短。

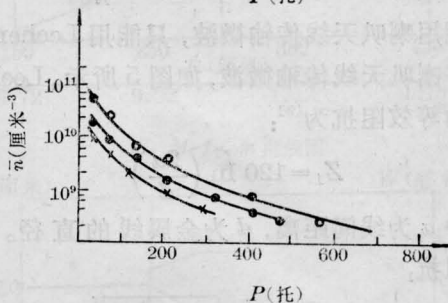
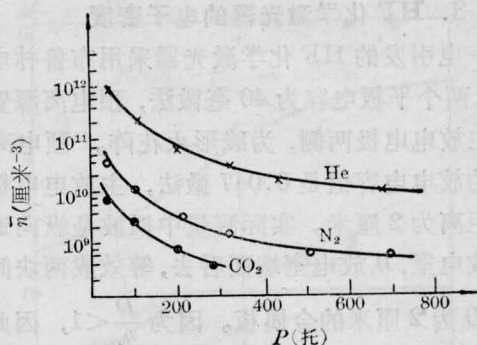


图3 CO₂ 激光器混合物紫外光电离 \bar{n}_e 与气压 P 的关系

○—CO₂:N₂:He(1:1:8); ●—CO₂:N₂:He(1:1:3); ×—CO₂:N₂(1:1) (下图)

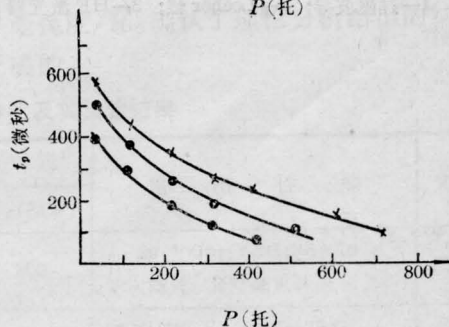
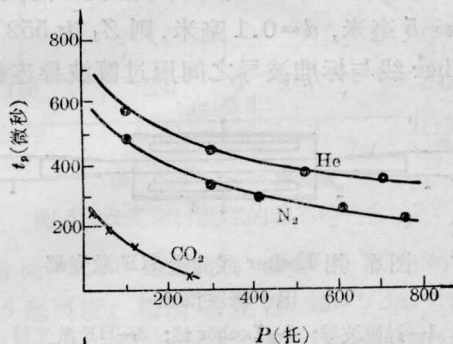


图4 紫外光电离电子密度衰减时间 t_p 与气压 P 的关系

×—CO₂:N₂:He(1:1:8); ○—1:1:3; ●—1:1:0 (下图)

3. HF 化学激光器的电子密度

电引发的 HF 化学激光器采用布鲁林电路, 两个平板电容为 40 毫微法, 预电离源置于主放电电极两侧, 为线形火花阵。预电离源的放电电容值是 0.047 微法, 主放电电极间距离为 2 厘米。实际测量中微波是纵向通过放电室, 从放电室端面看去, 等效成两块间距 D 为 2 厘米的金属板。因为 $\frac{D}{\lambda} < 1$, 因此不能用喇叭天线传输微波, 只能用 Lecher 线代替喇叭天线传输微波, 如图 5 所示。Lecher 线的等效阻抗为^[9]:

$$Z_1 = 120 \ln \left(\frac{2a}{d} \right)$$

式中 a 为线间距离, d 为金属线的直径。波导阻抗:

$$Z_2 = 377 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2}$$

λ 和 λ_c 分别为微波工作波长和波导截止波长。对所用的 H_{10} 模, $\lambda = 3$ 厘米时 Z_2 为 523 欧。为了使 Lecher 线与波导阻抗匹配, 我们取 $a = 5$ 毫米, $d = 0.1$ 毫米, 则 Z_1 为 552 欧。Lecher 线与标准波导之间用过渡波导连接。



图 5 用 Lecher 线测量 HF 激光器电子密度简图

1—过渡波导; 2—Lecher 线; 3—HF 激光器

图 5 为用 Lecher 线测 HF 激光器电子密度简图。对充有 SF_6 (100 托)、 H_2 (20 托) 的 HF 激光器, 在紫外预电离电压为 25 千伏时, 测得器件中心的紫外预电离电子密度为 $6.7 \times 10^9 / \text{厘米}^3$, 在主放电电压为 30 千伏时, HF 激光器电子密度为 $1 \times 10^{12} / \text{厘米}^3$ 。由于 H_2 、 SF_6 电离电位较高, 我们认为, 紫外预电离电子主要是气体及器件中所含的微量低电离电位杂质的光电离产生的。

对上海无线电四厂张术田、袁德明等同志在微波干涉仪电路方面的协助及上海光机所徐捷同志在测量 HF 激光器电子密度方面的大力帮助致谢意。

参 考 文 献

- [1] C. H. Homann *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, 417.
- [2] 王玉芝等;《激光》, 1981, **8**, No. 6, 58.
- [3] A. I. Carswell; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, 3028.
- [4] M. A. Heald; *Plasma Diagnostics with Microwave*, John Wiley & Sons Inc., New York, p. 6~7, p. 137~141.
- [5] R. V. Eabeck *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, 29.
- [6] D. Slachorska; *Pro. Twelfth Inter. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*, 1975.
- [7] J. J. Lowke; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 4664.
- [8] I. Liberman; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, 750.
- [9] G. H. J. Wantenaar *et al.*; *J. Phys. E*, 1975, **8**, 714.