

# 等离子体电子复合特性的实验研究

王玉芝 董景星 谢培良

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文用双探针研究等离子体电子复合的时间及空间特性。

## Experimental investigation on electron recombination characteristics of plasma

Wang Yuzhi, Dong Jingxing, Xie Peiliang

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

**Abstract:** Temporal and spatial characteristics of electron recombination in plasma have been studied by using a double cylindrical probe.

### 一、引言

当一个高电压、强电流脉冲激发放电管中的一系列金属条后,在相邻二个金属条的空隙间会产生明亮的火花,迅速形成高电子密度的金属蒸气等离子体。此等离子体在向放电管内的缓冲气体膨胀时被冷却。由于非平衡冷却,在电离复合过程中产生离子或原子能级的粒子数反转<sup>[1]</sup>。我们用置于放电管中的双圆柱探针,测量了复合等离子体的时间、空间特性。实验装置如图1。

我们把9片长10毫米、宽2毫米、厚1毫米的镉条,首尾相接,一个一个地摆在2毫米厚的绝缘板上,然后把它置于直径为20毫米的石英放电管中。管中充一定量的氦气、氮气或氙气作为缓冲气体。脉冲放电电压1.6千伏,放电电容0.02微法,放电电流脉

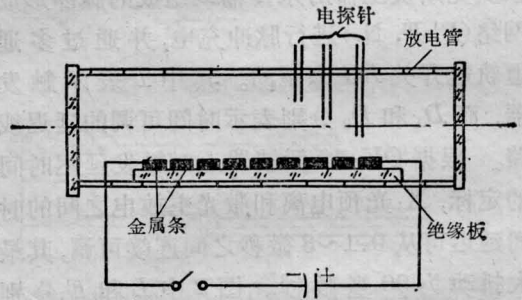


图1 产生镉蒸气等离子体的实验装置

宽约1微秒。在金属条上方三个不同位置上,分别安放三组双圆柱探针。探针直径0.5毫米,长2毫米,加在探针上的直流电压从正45伏到负45伏变化时,对应的探针电流用SR35示波器的电压信号给出。每改变一个工作条件,就可以得到一条不同的探针伏-安特性曲线,如图2。

图中 $X$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 分别为三条直线的斜

收稿日期: 1984年3月14日。

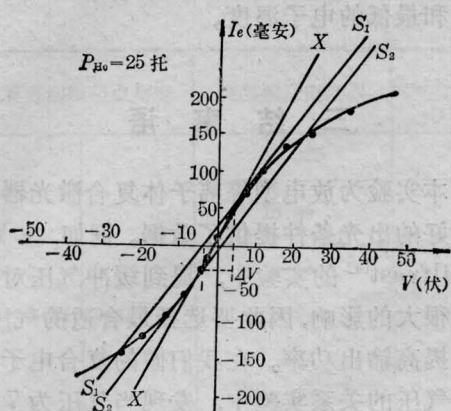


图2 探针的伏-安特性曲线  
( $P_{He}=25$  托, 放电电压 1.6 千伏)

率。  $S = \frac{1}{2}(S_1 + S_2)$ ;  $\Delta V$  为  $S_1$ 、 $S_2$  与 X 线交点间的电压。由公式<sup>[2]</sup>

$$T_e = \frac{\Delta V}{4} \times \frac{1 - 0.85 \frac{S}{X}}{1 + 0.5 \frac{S}{X}}$$

即可得到电子温度  $T_e$ , 代入下式<sup>[3]</sup> 可得电子密度  $n_e$ :

$$n_e = 4.03 \times 10^{13} \frac{I_e}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{T_e}}$$

式中,  $I_e$ ——从探针伏-安特性曲线中得到的最大饱和电子电流(毫安),  $A$  是探针面积,  $T_e$  是电子温度(K)。

## 二、实验结果

### 1. 缓冲气压与等离子体 $T_e$ 、 $n_e$ 的关系

实验结果见图3。从图3中可看出, 在气压为7托时电子密度达到最大值, 一直持续到气压为25托时, 电子密度仍然在此值附近变化。当气压大于25托后, 电子密度随气压的增加而下降。电子温度随气压的增加而减少, 但变化比较平缓。

因为在放电后的  $5 \times 10^{-8}$  秒内, 等离子体将以  $6 \times 10^8$  厘米/秒的速度向缓冲气体膨胀。由于与缓冲气体原子碰撞的结果, 电子温度降低。从上述电子密度  $n_e$  的公式中可以看出, 在电子温度变化的平滑区域, 电子

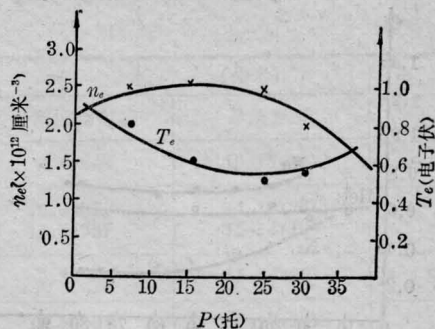


图3 等离子体电子温度和电子密度随氦缓冲气压的变化

密度的变化也较平滑。

### 2. 在三种不同缓冲气体中的时间特性

等离子体电子温度、电子密度的时间特性见图4、5。从图4可以看出在三种不同缓冲气体(氮、氦、氙)中, 达到最大电子密度的时间是不相同的。对于缓冲气体氦, 电子密度在放电后10微秒达到最大值  $2.5 \times 10^{12}$ /厘米<sup>3</sup>, 然后开始衰减, 当电子密度减至  $1 \times 10^{11}$ /厘米<sup>3</sup>, 复合时间为60微秒。

对于氮气, 在放电后20微秒电子密度达到最大值, 电子密度衰减到  $1 \times 10^{11}$ /厘米<sup>3</sup> 的时间延长至70微秒; 氙气中电子密度达到最大值的时间为40微秒, 而电子密度衰减至  $1 \times 10^{11}$ /厘米<sup>3</sup> 的时间也相应延长至90微秒。

由此可以看到, 当等离子体在缓冲气体氮、氦、氙中膨胀时, 等离子体波前的延迟依次增加。这种延迟是质量效应的结果。氦、

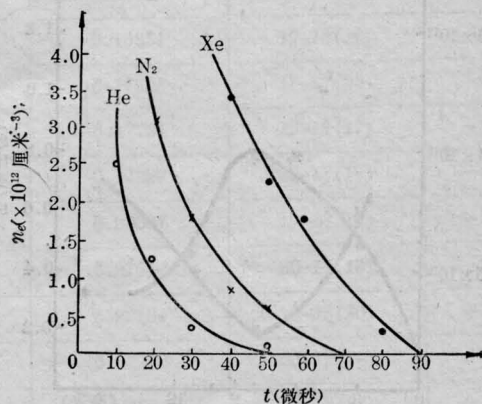


图4 在三种不同缓冲气体中, 等离子体电子密度的时间关系

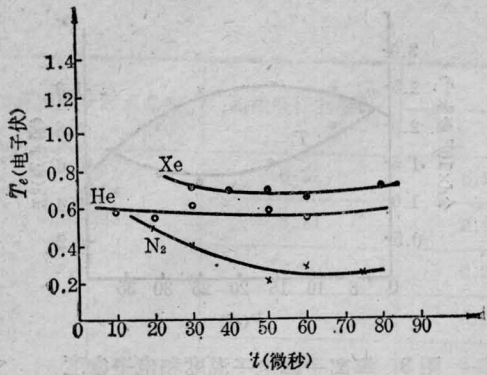


图5 在三种不同缓冲气体中, 等离子体电子温度的时间特性

氮、氙的分子直径分别为  $2.18$ 、 $3.75$ 、 $4.85$  ( $\times 10^{-8}$  厘米), 它们的分子量分别为  $4.002$ 、 $28.02$ 、 $130.2$ 。上述结果表明, 镉等离子体在质量越大的气体分子中, 膨胀速度越慢。

从图5中可以看出, 在三种不同缓冲气体中, 电子温度的时间变化比较平缓。

### 3. 空间变化特性

我们在钢蒸气放电管中的钢金属条上方 (3毫米、8毫米、11毫米) 三个不同位置上插入三组双圆柱探针, 以便进行测量。在缓冲气体氦中 (气压5托, 放电电压1.6千伏) 电子温度、电子密度的空间变化绘于图6。

从图6中可以看出, 等离子体的电子密度、电子温度并非随距离成线性变化, 而是在距钢条8毫米处, 等离子体具有最高的电子

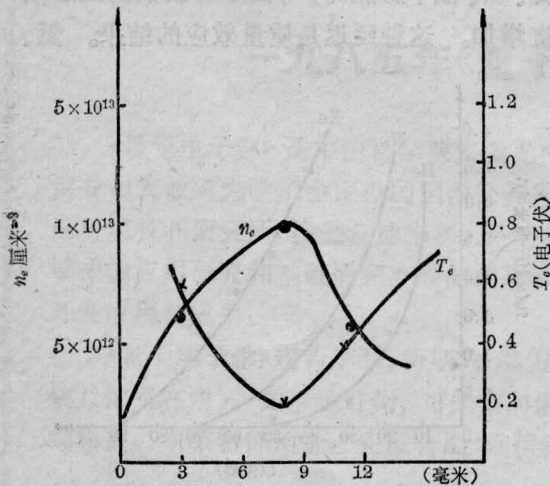


图6 钢等离子体电子密度、电子温度的空间特性

密度和最低的电子温度。

## 三、结束语

本实验为放电型等离子体复合激光器选择最好的出光条件提供了数据。例如, 在 W. T. Silfvast<sup>[4]</sup> 的实验中, 提到缓冲气压对出光有很大的影响, 因此要选择最合适的气压, 才能提高输出功率。在我们做的复合电子密度与气压的关系实验中, 发现当气压为7托时, 电子密度达到最大值, 而气压在从7到25托变化时, 电子密度基本保持不变。所以为了获得最理想的激光输出, 气压可以在7~25托中选择。

在 Silfvast 的实验中曾选用氦气、氮气为缓冲气体, 实验结果表明, 在氦气中激光输出增加。在我们进行的电子密度的时间特性实验结果表明, 以氦气为缓冲气体, 电子的复合速率最快。在图4中选取电子密度由  $2.5 \times 10^{12}$ /厘米<sup>3</sup> 到  $1.0 \times 10^{12}$ /厘米<sup>3</sup> 计算在氦、氮、氙中电子的复合系数, 结果分别为  $0.60 \times 10^{-7}$  厘米<sup>3</sup>/秒、 $0.36 \times 10^{-7}$  厘米<sup>3</sup>/秒、 $0.2 \times 10^{-7}$  厘米<sup>3</sup>/秒。即在缓冲气体氦中电子的复合速率增加, 这就预示着选取氦为缓冲气体更为合适。

此外, 在 Silfvast 的报告中还提到光轴在距金属条3~10毫米时, 均有激光输出, 但在7毫米时, 激光较强。我们的实验研究也表明, 在距金属条3毫米、8毫米、11毫米三个不同位置上, 等离子体具有不同的电子密度, 而在距离为8毫米处, 电子密度有最佳值, 这和 Silfvast 的结果是一致的。

## 参 考 文 献

- [1] E. M. Campbell; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 109.
- [2] P. R. Mossack, M. Rusbridge; *J. Phys. E Sci. Instrum.*, 1978, **11**, 653.
- [3] 卢鹤跋; “受控热核反应”, 上海科学技术出版社, 1962年。
- [4] W. T. Silfvast; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**, 615.