第10卷 第1期 空间科学学报 Vol. 10, No. 1
1990 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1990

余辉等离子体的实验研究*

王文清 肖佐
(北京大学地球物理系)

摘 要

利用调制脉冲产生的余辉等离子体的参数测量表明：等离子体空间电位和电子温度的衰变是重要的，它在余辉等离子体的密度衰变过程研究中必须予以考虑．对容器中余辉等离子体密度径向分布的测量结果与理论预言是一致的．

关键词：等离子体测量，余辉等离子体

一、引 言

国外早在60年代，甚至更早就广泛地开展了余辉等离子体的理论和实验研究[1-3,5,8]．但在我国至今却很少有人问津．余辉等离子体的研究对于进一步研究等离子体中的双极扩散过程、复合过程、测量复合过程的时间常数及复合系数有着重要意义．而且余辉和扩散过程也是产生类似于电离层环境——低密度、低电子温度等离子体的重要方法之一．

我们用宽度为 120 μs，间隔为 400 μs 的脉冲调制了的 200 MHz 高频讯号激发产生了氩余辉等离子体．利用存贮示波器及采样保持技术测量了不同余辉时刻的朗缪尔探针特性曲线，从而得到等离子体密度 n_e，电子温度 T_e 以及等离子体空间电位 V_s 随着时间的衰变规律．发现在 $t = 60\ \mu$s 以前等离子体的各种参数都发生急剧变化．而在 $t = 60\mu$s 以后变化相对地比较平缓．许多人在实验中将探针偏置于等离子体空间电位以上，并用测得的探针电流的衰变代表等离子体浓度的衰变，这一点看来在较低气压下的等离子体条件下是不可取的．

实验测量 $t = 60\ \mu$s 时的等离子体径向空间分布，结果与理论基本吻合，由此证明我们的实验结果及测量方法是可靠的．

二、实验设备及原理

实验装置为一直径 400 mm，长约 1100 mm 的不锈钢真空室，如图 1 所示．利用机械泵和油扩散泵可将真空室抽至 1×10^{-6} Torr 以上，然后再充以纯氩气至 $0.8—5 \times 10^{-4}$

本文于 1989 年 4 月 12 日收到．
* 国家自然科学基金资助项目．

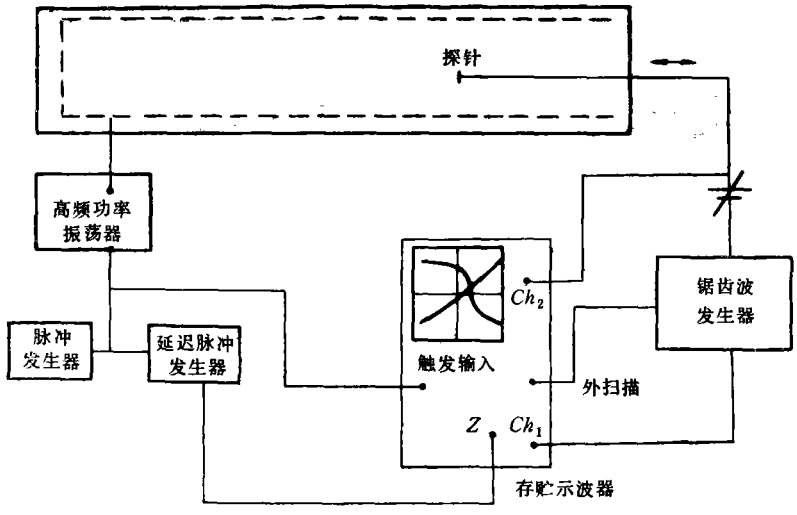


图 1 实验装置及余辉等离子体参数测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement and the detection system for afterglow plasma parameters

Torr. 用宽度为 120 μs,间隔为 400 μs 的脉冲调制了的 200 MHz 高频振荡讯号加在栅网和外壳地之间，激发放电室而产生等离子体. 等离子体扩散充满容器的全部. 在此情况下,平均自由程远大于等离子体容器的尺度,碰撞概率非常少. 因此，可以预料等离子体中"空间复合"不会占到主要因素.

在两个脉冲之间,即在两次放电的间歇,等离子体密度按一定规律衰减. 衰减的方式则与导致等离子体损失的机制有关[7].

在图 1 中，同时给出了利用记忆示波器测量余辉等离子体参数的原理方框图. 也可以利用采样保持技术及 x-y 记录器得到朗缪尔探针特性曲线. 改变用于取样的延迟脉冲相对于放电脉冲的延迟时间,可以得到任意余辉时刻的等离子体空间电位、电子温度、以及电子数密度随时间变化的关系.

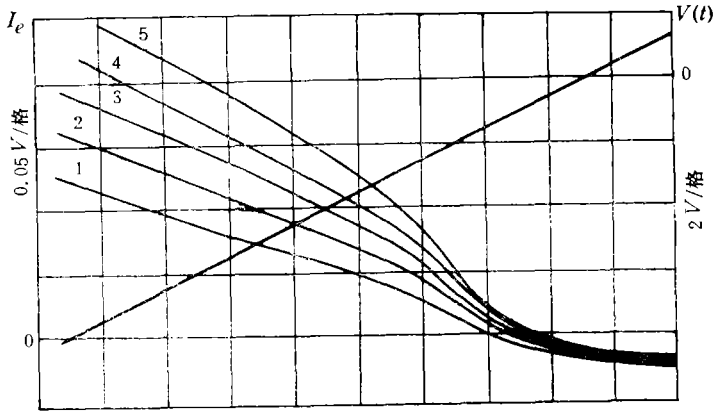
三、实验结果及分析

在压强为 0.8×10^{-4}—5×10^{-4} Torr 氩等离子体中，利用记忆示波器及采样保持技术得到的朗缪尔探针特性曲线如图 2 及图 3 所示.

在纯氩气体压强为 2.3×10^{-4} Torr 时，利用不同余辉时刻探针朗缪尔特性曲线得到的余辉等离子体参数 (n_e, T_e, 和 V_s) 随余辉时间的衰减结果表示在图 4 中. 由图 4 我们看到，至少在 $t = 60\mu$s 以前等离子体的空间电位 V_s, 电子温度 T_e 和等离子体浓度 n_e 都随时间衰减得非常快.

根据朗缪尔探针理论,探针饱和电子电流应满足以下关系，

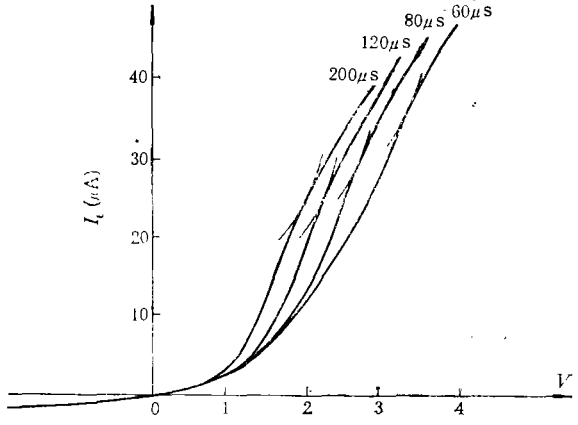
$$I_{es} \propto n_e e S V_{th}. \tag{1}$$



1: $r = 13.4$ cm　2: $r = 11.0$ cm　3: $r = 8.4$ cm　4: $r = 5.7$ cm　5: $r = 2.9$ cm
$R = 2\,k\Omega$　$S = 0.205\,cm^2$　$P = 2.3\times10^{-4}$ Torr (Ar)

图 2　余辉时刻 $t = 60\mu s$ 时等离子体容器中不同探针位置的朗缪尔探针特性曲线

Fig. 2　The Langmuir traces for different probe positions at afterglow time $t = 60\mu s$

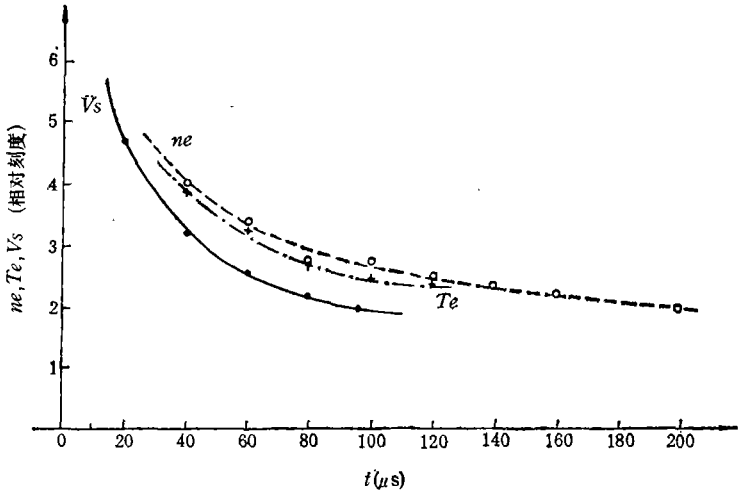


$R = 9.93\,k\Omega$　$r = 0$ cm　$P = 3.2\times10^{-4}$ Torr (Ar)

图 3　不同余辉时刻的朗缪尔探针特性曲线

Fig. 3　The Langmuir traces at different afterglow time ($t = 60\,\mu s$, $80\,\mu s$, $120\,\mu s$, $200\,\mu s$)

式中 S 为探针表面积，V_{th} 为电子平均热运动速度，它与电子温度 T_e 的平方根成正比. 尽管探针偏置于电子饱和电流以上的电位，由于电子温度 T_e 和空间电位 V_s 均随余辉时间而急剧变化，因此 I_{es} 并非单纯地正比于 n_e 而变化. 有些作者认为利用探针电流 I_{es} 的变化来代表等离子体浓度随时间的衰减[1,6]. 这在我们目前进行的低气压等离子体以及某些类似条件下看来是不适用的. 当然如果应用在较高气压下的等离子体中，在那里电子温度和离子温度相差相对较小，T_e 的变化不十分显著，而且尽量将探针偏置于远高于等

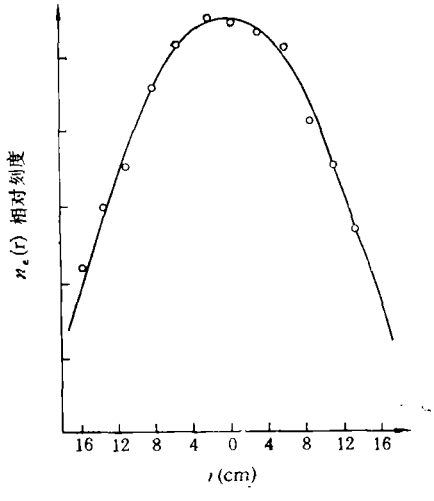


$r = 0$ cm $P = 2.3\times10^{-4}$ Torr (Ar)

图 4 由朗缪尔探针特性曲线得到的余辉等离子体参数

Fig. 4 Plasma parameters got from the Langmuir traces

离子体空间电位处，以减少由于空间电位变化的影响，或许可以得到近似满足 $I_{es} \propto n_e$ 的条件．如果研究局限于余辉的尾部(本文 $t \geqslant 60$ μs 以后的时间)T_e 和 V_s 的变化相当平缓，从而也可以用探针探流的变化来代替等离子体密度随时间的衰减．当然最可靠的方法还是本文所用的，分别测量不同余辉时刻的朗缪尔探针特性曲线，并计算出各个不同时刻的等离子体参数 n_e, T_e 和 V_s.



○○○朗缪尔探针测得的结果 (results from Langmuir probe) ——由(2)式计算的结果 (calculated result from formula (2))

图 5 等离子体密度在余辉 $t = 60\mu s$ 时的径向分布

Fig. 5 The plasma density profile at afterglow time $t = 60\ \mu s$

电子温度 T_e 的急剧衰减是因为高能电子的平均速度较大，因而最先跑到管壁复合而造成的．正是利用这一点，我们才可能利用余辉等离子体来模拟不仅密度低，而且电子温度也很低的类似电离层等离子体状态．

移动探针，置探针于容器中的不同位置，测量放电脉冲结束之后 $t=60\mu s$ 时等离子体密度的空间径向分布的结果示于图 5．根据 Oskam 理论[4]，柱状容器中等离子体密度的径向分布满足零阶 Bessel 函数，即

$$n_e(r) = n_0 J_0\left(2.14\frac{r}{R}\right), \qquad (2)$$

式中 R 为容器半径，n_0 和 $n_e(r)$ 分别为容器轴线上及距离轴线为 r 处的电子密度．由图 5 可见，理论值与实验结果相当吻合．(2)式的分布许多作者用各种不同的方法加以证

实[1,5,6]. 在这里我们也得到了同样的结果，说明我们的实验结果是可信的.

参　考　文　献

[1] Smith, D., C. V. Goodall and M. J. Copsey, *J. Phys. B.*, Ser. **2**, Vol. **1**, p. 660, 1968.
[2] Smith, D. and M. J. Copsey, *J. Phys. B.*, Ser. **2**, Vol. **1**, p. 650, 1968.
[3] Smith, D. and C. V. Goodall, *Planet. Space Sci.*, Vol. **16**, p. 1177, 1968.
[4] Oskam, H. J., *Philips Res. Rep.*, Vol. **13**, p. 355, 1958.
[5] Smith, D., A. G. Dean and N. G. Adams, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. **7**, p. 1944, 1974.
[6] 肖佐，地球物理学报，第**23**卷，第13页，1980.
[7] 胡志强，气体电子学，电子工业出版社，1985.
[8] Takao Tanikawa, The New Roles of Cavitons in Inhomogeneous Plasmas Under Strong Electromagnetic Irradiation, 1987.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE AFTERGLOW PLASMA

Wang Wen-qing　Xiao Zuo

(*Department of Geophysics, Peking University*)

Abstract

The measurements of the parameters of an afterglow plasma produced by modulated pulse discharge have shown that the decay of the space potential and electron temperature is important in studying electron density decay processes in afterglow plasmas. This must not be ignored. Measurements of the radial distribution of the electron density at the 60 μs of the afterglow time are quite in agreement with the theoretical predictions.

Key words : Plasma measurement, Afterglow plasma