

用 3cm 微波透射仪测量 强激波后的电子密度

竺迺宜 李学芬

(中国科学院力学研究所)

提要 本文介绍了 3cm 微波透射仪用来测量激波管中电子密度的工作原理。给出了 $\phi 800\text{mm}$ 激波管中电子密度随 M 数的变化规律。测量数据与其他测量方法所得结果是一致的。与理论计算的预计也是一致的。

一、实验装置

在 $\phi 800\text{mm}$ 激波管^[1] 实验段的两侧安装两个对开的玻璃窗, 玻璃内表面与激波管内壁取平, 使得气流不致于发生严重的扰动。连续等幅微波信号由 300KC 方波调制以后经喇叭天线定向发射, 由对开窗口水平穿过激波管, 再由接收天线接收。为了消除激波运动过程中引起的强电磁场干扰, 我们将整个接收系统浮置起来, 并通过对称输出电路将检波器所得信号输给示波器。

二、工作原理

微波透射仪是根据穿过激波管后微波功率的相对变化来测定激波中等离子体的电子数密度。激波到达前后的差别主要表现在两个方面: 第一, 激波到达窗口之前, 微波在玻璃窗内表面与真空之间的界面上有一个弱的反射(在两个窗口处是相似的)。当激波到达时, 则微波在玻璃窗内表面与等离子体之间的界面处有一个较强一些的反射(视等离子体的电子密度不同而反射强弱也不同)。第二, 激波到达前, 微波穿过激波管内部 800mm 长自由空间时有一个“本底”的功率衰减, 激波到达时, 微波穿过 800mm 长等离子体将会产生一个附加的功率衰减, 我们主要是根据这个附加的功率衰减来决定激波中的电子密度的数值。

1. 窗口内表面处的反射

微波在从介质 1 到介质 2 的反射面上的反射率为^[2]:

$$\tilde{\rho}_{1,2} = \frac{\tilde{z}_{w_2} - \tilde{z}_{w_1}}{\tilde{z}_{w_2} + \tilde{z}_{w_1}} \quad (1)$$

即与反射面两边介质的波阻抗

$$\tilde{z}_w = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} \quad (2)$$

本文于 1980 年 1 月收到。

相关。在我们的情况下,一般有介质的导磁率 $\mu \approx \mu_0$ 。为此

$$\tilde{\rho}_{1,2} = \frac{\tilde{\varepsilon}_1^{1/2} - \tilde{\varepsilon}_2^{1/2}}{\tilde{\varepsilon}_1^{1/2} + \tilde{\varepsilon}_2^{1/2}} \quad (3)$$

介质的相对介电常数 $\tilde{\varepsilon}/\varepsilon_0$ 可写为

$$(\tilde{\varepsilon}/\varepsilon_0)^{1/2} = n - j\chi \quad (4)$$

其中 n 是通常的折射率, $\chi = \frac{c}{\omega} \alpha$ 称为衰减指数。 c 是光速, ω 是微波角频率, α 为衰减系数。

按照功率计算的两介质界面处微波的反射率为

$$r_{1,2} = |\tilde{\rho}_{1,2}|^2 = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (\chi_1 - \chi_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (\chi_1 + \chi_2)^2} \quad (5)$$

由于激波管的内径远远大于微波波长,且正激波中电子密度是近乎均匀的。按照电磁波在无限大、均匀的罗伦茨等离子体中传输的情况,可求得折射率 n 和衰减指数 χ 如下

$$n = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \cdot \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\chi = \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \cdot \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

其中 ω_p 为等离子体的特征频率, ν 为等离子体中电子的碰撞频率

$$\nu = \left(\frac{8KT}{\pi m_e} \right)^{1/2} \cdot (N_i \cdot Q_{ei} + N_n \cdot Q_{en}) \quad (8)$$

Q_{ei} , Q_{en} 分别为电子与离子和中性粒子碰撞截面。在本文的工作条件下, $\nu = 10^8$, $\omega = 10^{10}$, 即 $\omega \gg \nu$, 一般说来可以忽略 ν 的影响。

2. 微波穿过等离子体的衰减

如前所述,在本文的工作条件下,可视为一个角频率为 ω 的平面电磁波在无限大的介质中传播:

$$A = A_0 \exp(j\omega t - \tilde{\gamma} \cdot L) \quad (9)$$

其中传输常数

$$\tilde{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (10)$$

α 为衰减系数, β 为相位常数, $L = 800\text{mm}$ 为微波经过的路程。当 $\nu \ll \omega$ 时有

$$\alpha = \frac{\omega}{2c} \left[\left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \cdot \nu / \omega \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)} \right] = \frac{\nu}{2c} \left[\left(\frac{n_e}{n_{ec}} \right) / \sqrt{1 - \frac{n_e}{n_{ec}}} \right] \quad (11)$$

其中 $n_{ec} = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$ 为微波的截止密度, n_e 为等离子体中的电子密度。

我们根据微波穿过等离子体后功率的总衰减,扣除界面反射的影响,就可求得衰减系数 α , 进而求得电子密度 n_e 。

三、结 果

本文所使用微波透射仪的工作频率 $f = 8.87\text{Gc}$, 对应的截止密度 $n_{ec} \approx 1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 。图 1 给出了 $\phi 800$ 激波管中, $P_1 = 1 \times 10^{-2}\text{mmHg}$ 时,在几种 M 数状态下 3cm 微波

透射仪的典型记录。 $M_s = 12.5$ 左右时，看不出有吸收； $M_s = 13.5$ 左右时开始有弱吸收； $M_s = 16$ 左右时吸收约一半； $M_s = 17.6$ 左右开始出现截止； $M_s = 20$ 左右有较长时间截止。

表 1 中给出了实验测量的衰减系数 α 随 M 数的变化，进而可以得到正激波后电子密

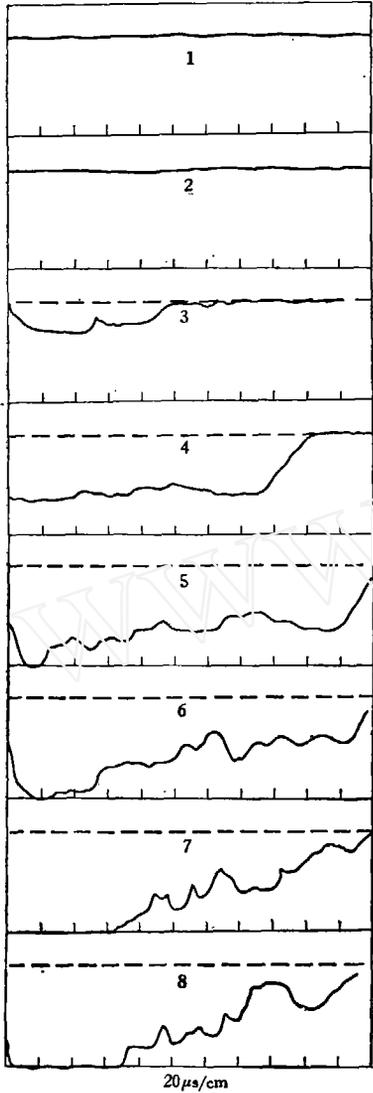


图 1 $P_1 = 1 \times 10^{-2}$ mmHg, 3cm 透射仪记录

$f = 8.87$ Gc

- 1 $M_s = 12.5$ 看不出吸收,
- 2 $M_s = 13.5$ 有弱吸收
- 3 $M_s = 14.2$ 有部分吸收,
- 4 $M_s = 16$ 吸收约一半
- 5 $M_s = 17.6$ 开始有截止,
- 6 $M_s = 18.7$ 部分截止
- 7 $M_s = 19.9$ 较长时间截止,
- 8 $M_s = 20.5$ 较长时间截止

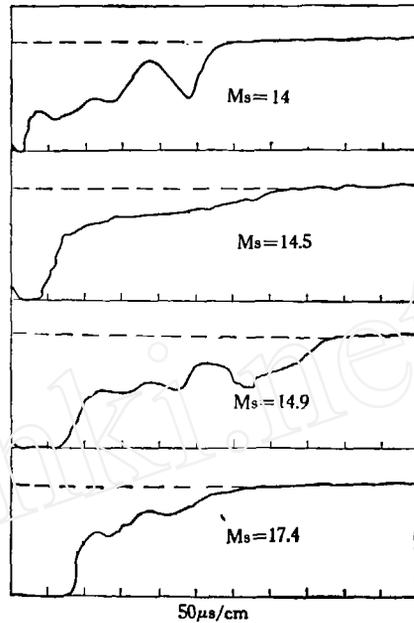


图 2 $P_1 = 1 \times 10^{-4}$ mmHg 3cm 透射仪记录
 $f = 8.87$ Gc

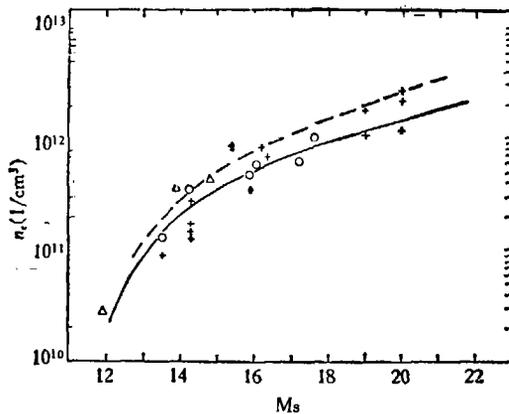


图 3 空气正激波后的电子密度 $P_1 = 1 \times 10^{-2}$ mmHg
--- Gilmore^[4], — 苏联科学院^[5], + 竺乃宜^[3]
○ 3cm 透射仪, △ 3cm 干涉仪, ● 8mm 透射仪

表 1 衰减系数 α 随 M 数的变化 ($P_1 = 1 \times 10^{-2} \text{mmHg}$)

M_s	13.5	14.2	15.9	16	17.2	17.6
α (奈倍/米)	0.03	0.17	0.36	0.50	0.50	≥ 3

度 n_e 随 M 数的变化关系, 见图 3. 图中给出了 $P_1 = 1 \times 10^{-2} \text{mmHg}$, $M_s = 12 \sim 22$ 状态下, 空气正激波后峰值电子数密度. 本文用 3cm 微波透射仪测量的结果, 不仅与早先用近自由分子流 Langmuir 探针^[3]的测量结果一致, 而且与正在进行的 3cm 微波干涉仪和 8mm 微波透射仪提供的参考数值能够较好地衔接起来. 实验测量值与理论预计的平衡值比较接近.

罗军、李淑琴、李连祥等同志参加了本文的部分实验工作. 在本文有关的工作中, 得到了叶幼璋、高灵智等同志的热情帮助, 仅向他们表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 竺乃宜, 李红德, 邹惠良, 李连祥, 力学学报, 3 (1978), 234.
 [2] Heald, M.A., Wharton, C.B., Plasma diagnostics with microwaves, John Wiley and Sons, New York (1965).
 [3] 竺乃宜, 李连祥, 近自由分子流 Langmuir 探针和电离激波结构的研究.
 [4] Gilmore, F. R., RM-1543 (1955).
 [5] Предводителев, А. С., Ступоченко, Е. В., Таблицы Термодинамических Функций Воздуха (1962).

MEASUREMENT OF ELECTRON DENSITY BEHIND A STRONG SHOCK WAVE USING 3 cm MICROWAVE TRANSMISSION

Zhu Naiyi Li Xuefen

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

This article presents the working principle of a 3 cm microwave transmission method. It was used to measure the electron density behind strong shock waves in an 800 mm dia. shock-tube. The variation of electron density with M_s is obtained, and it is in good agreement with the data from Langmuir probe measurements, and is also in good agreement with theoretical predictions.