

## 磁镜中哨声波加热等离子体研究\*

张建德

(国防科技大学应用物理系)

方瑜德 史义才 宁兆元 任兆杏 邱励俭

(中国科学院等离子体物理所)

**摘要** 本文研究了在产生晃荡电子的特定磁镜磁场位形中,使用哨声波加热等离子体的机制,并对等离子体的参数和等离子体共振区结构进行了测量研究,研究结果表明:(1)在磁镜基频共振层附近存在等离子体密度峰和电子温度峰;(2)该峰随着磁镜中心磁场的变化与基频共振层一起移动;(3)等离子体加热的物理机制为:大量的电子在基频共振层吸收微波,并在此处反弹。

**关键词** 磁镜, 等离子体, 哨声波, 基频共振层

**分类号** O532.26

## 1 引言

在磁镜受控热核聚变中,用电子回旋共振加热产生晃荡电子<sup>[1,2]</sup>形成串级磁镜热垒有着重要的意义。因此,在产生晃荡电子的磁位形中研究电子的共振加热和共振区等离子体性质是非常有意义的。

本文将对在产生晃荡电子的磁位形中(如图1所示),使用2.45GHz哨声波加热等离子体的机制进行研究,并对等离子体参数和等离子体共振区结构进行测量研究。

## 2 实验安排

实验是在中国科学院等离子体物理所的轴对称简单磁镜TAT上进行的,其装置参数为:

$R_0$ (真空室半径):	20cm
$L_m$ (镜到镜距离):	(可变) 74cm
$R_m$ (镜比):	(可变) 3.13
$B_0$ (磁镜中心磁场):	280—790 (DC)

\* 1993年1月5日收稿  
国家自然科学基金资助项目

在实验中主要使用了如下诊断系统：

(1) Langmuir 探针系统。由一个可动探针和三个固定探针组成。可动探针的径向位置为  $r=0\text{cm}$ ，轴向位置为  $Z=23\sim 33\text{cm}$  可动；三个固定探针 L. Probe1, L. Probe2, L. Probe3 的位置径向均为  $r=3\text{cm}$ ，轴向分别为  $Z=0, 17, -17\text{cm}$ 。它们用来测量等离子体饱和流、悬浮电位及其轴向分布。

(2) 发射探针系统。由三个发射探针 E. Probe1, E. Probe2, E. Probe3 组成，其径向位置均为  $r=3\text{cm}$ ，轴向位置分别为  $Z=0, 17, -17\text{cm}$ 。它们用来测量等离子体电位及其空间变化。

实验总安排如图 2 所示。

### 3 实验结果

为了排除实验中放电条件的不重复性，在实验数据的处理中，我们将 Langmuir 探针饱和离子流  $I_{i0}$  对中平面探针 L. Probe1 的测量值进行归一化，记为  $I_{ion}$ ，等离子体电位  $V_p$  和悬浮电位  $V_f$  均取与中平面探针之间的相对值，分别记为  $V_{pr}$  和  $V_{fr}$ 。

图 3 所示为微波功率  $P_\mu = 1.875\text{kW}$ ，充气气压  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  torr 时，L. Probe3 测得的  $I_{ion}$  和  $V_f$  随中心磁场  $B_0$  的变化趋势，由图可见，在  $B_0 = 580\text{G}$  附近， $I_{ion}$  有显著的峰值， $V_f$  有显著的降。

图 4 所示为电子回旋基频共振层离磁镜中平面的距离  $D_{ist}$  随  $B_0$  的变化趋势。由图可见， $B_0 = 580\text{G}$  时， $D_{ist} = 17\text{cm}$ ，基频共振层与探针 L. Probe3 重合。

比较图 3 和图 4 可以发现，等离子体饱和离子流  $I_{ion}$  的峰值及悬浮电位  $V_f$  降均出现在基频共振层位置，且当  $B_0$  变化时，随着基频共振层一起沿磁镜轴移动。

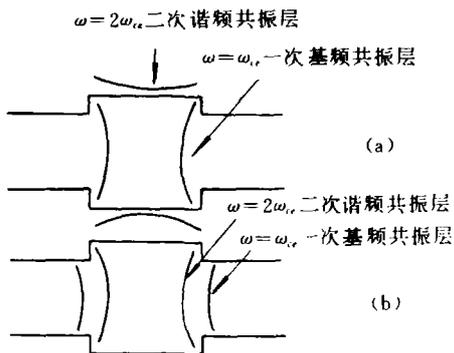


图 1 产生振荡电子的磁场波形

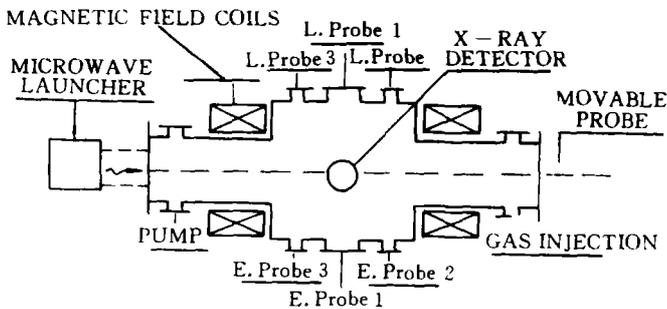


图 2 实验总安排图

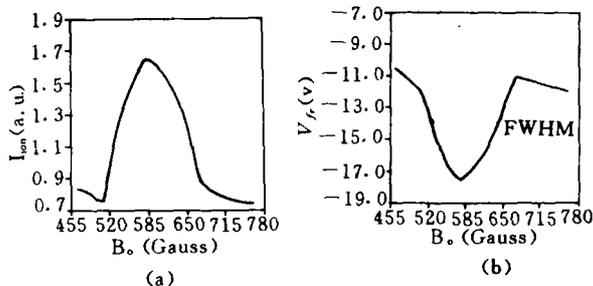


图 3  $P_\mu = 1.875\text{kW}$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  torr 时，L. Probe3 ( $r=3\text{cm}$ ,  $Z=-17\text{cm}$ ) 测得的 (a)  $I_{ion}$  (b)  $V_f$  随中心磁场  $B_0$  的变化趋势 (FWHM=Full Width of Half Maximum)。

图 5 为 L. Probe 2 测得的  $I_{ion}$ 、 $V_{fr}$  随  $B_0$  的变化趋势。

由图可见，在相同的实验条件下，L. Probe2 所测得的实验结果与 L. Probe3 所测相似，只是  $I_{ion}$  峰和  $V_{fr}$  降的幅度略小。

图 6 给出了可动探针 ( $Z=25\text{cm}$ ) 测得的  $I_{ion}$  和  $V_{fr}$  随  $B_0$  的变化趋势。

由图可见，在相同的实验条件下，可动探针测得的饱和离子流和悬浮电势随  $B_0$  无明显的变化。由图 4 可知，当  $B_0=440\sim 765\text{G}$  时，基频共振层不经过可动探针所在处  $Z=25\text{cm}$ 。

图 7 给出了由 E. Probe3 和 E. Probe 2 测得的等离子体电位  $V_{pr}$  随  $B_0$  的变化。由图可见，在相同的实验条件下，当  $B_0=580\text{G}$ ，基频共振层位置  $D_{1st}=17\text{cm}$  时，E. Probe3 和 E. Probe2 均测得了  $V_{pr}$  降，但  $V_{pr}$  的幅值及其降的相对深度均比  $V_{fr}$  小得多。

同时，实验测得了磁镜中平面 ( $r=3\text{cm}$ ， $Z=0\text{cm}$ ) 处的等离子体密度为  $4\times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，电子温度为  $10\text{eV}$ 。

## 4 分析和讨论

### 4.1 悬浮电位

Langmuir 探针数据表明，在基频共振层附近，有显著的  $V_{fr}$  降出现。

由探针理论<sup>[3]</sup>：

$$V_f = V_p - akT_e/e \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \ln(m_i/m_e) \approx 3.76 \quad (2)$$

有

$$V_{fr} = V_{pr} - akT_{er}/e \quad (3)$$

式中， $k$  为 Boltzmann 常数， $T_{er} = T_e - T_e|_{r=0\text{cm}}$  为相对温度， $e$  为电子电荷。

那么， $V_{fr}$  降的产生原因为  $V_{pr}$  降和  $T_{er}$  峰。

发射探针数据表明，当  $P_\mu=1.875\text{kW}$ ， $P_0=2\times 10^{-5}\text{torr}$ ， $B_0=580\text{G}$  时，基频共振层附近的  $V_{pr}$  降为  $\Delta V_{pr} = -1.5\text{V}$ ，如图 7 所示。此时  $V_{fr}$  降为  $\Delta V_{fr} = -7\text{V}$ 。显然，如此小的  $\Delta V_{pr}$  不足以引起如此大的  $\Delta V_{fr}$ ，所以，可以断定热效应（即基频共振层附近的  $T_{er}$  峰）

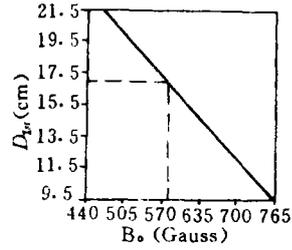


图 4 基频共振面离磁镜中平面的距离  $D_{1st}$  随中心磁场  $B_0$  的变化图

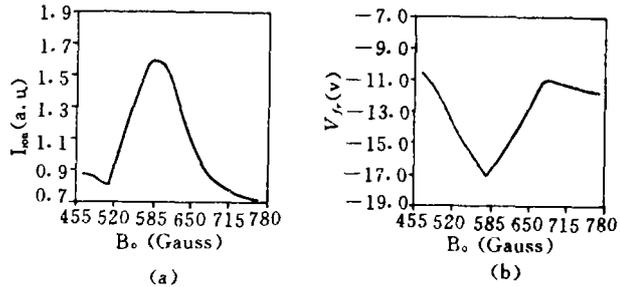


图 5  $P_\mu=1.875\text{KW}$ ， $P_0=2\times 10^{-5}\text{torr}$  时，L. Probe 2 ( $r=3\text{cm}$ ， $Z=17\text{cm}$ ) 测得的 (a)  $I_{ion}$ ；(b)  $V_{fr}$  随  $B_0$  的变化趋势

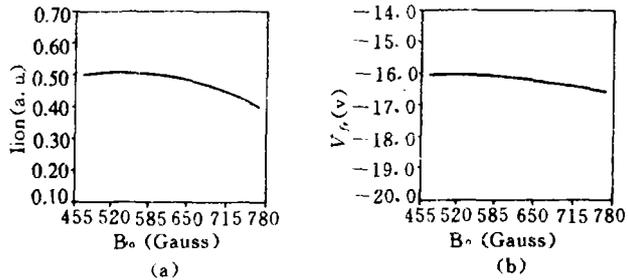


图 6  $P_\mu=1.875\text{KW}$ ， $P_0=2\times 10^{-5}\text{torr}$  时，可动探针 ( $r=0\text{cm}$ ， $Z=25\text{cm}$ ) 测得的 (a)  $I_{ion}$ ；(b)  $V_{fr}$  随  $B_0$  的变化趋势

是引起  $V_{fr}$  降的主要原因。

对 (3) 式微分, 且将  $\Delta V_{pr}$  和  $\Delta V_{fr}$  的数值代入, 可知:

$$k\Delta T_{er} = (\Delta V_{pr} - \Delta V_{fr})e/\alpha = 1.46eV \quad (4)$$

#### 4.2 等离子体饱和离子流

Langmuir 探针数据表明: (1) 在基频共振层附近, 等离子体饱和离子流  $I_{ion}$  出现强烈的峰; (2) L. Probe2 侧的  $I_{ion}$  峰值幅度比 L. Probe3 侧略小。

基频共振层附近等离子体饱和离子流出现峰值, 其幅度为背景等离子体饱和离子流的两倍左右, 亦即

$$I_{ionmax} = 2I_{ion背景} \quad (5)$$

由文献 [4] 有

$$I_{ion} \propto n \sqrt{T_e} = n \sqrt{T_e|_{z=0} + T_{er}} \quad (6)$$

式中,  $n$  为等离子体数密度。

$$I_{ion背景} \propto n_{背景} \sqrt{T_e|_{z=0} + T_{er背景}} \quad (7)$$

$$I_{ionmax} \propto (n_{背景} + \Delta n) \sqrt{T_e|_{z=0} + T_{er背景} + \Delta T_{er}} \quad (8)$$

由上面的讨论可知,  $\Delta T_{er}$  仅为 1.46eV, 不可能引起如此大幅度的等离子体饱和离子流峰。因此, 等离子体饱和离子流峰实际上是由大幅度的密度峰  $\Delta n$  引起。这一现象在其它等离子体实验中也观察到<sup>[5]</sup>。

对于基频共振层附近出现等离子体密度峰和温度峰, 可能的解释为: 大量的电子在基频共振层处吸收微波, 并在此处反弹。

等离子体饱和离子流峰值幅度在 L. Probe2 (无微波入射) 侧比 L. Probe3 (微波入射) 侧略小, 这一实验现象是对上述解释的又一证实。

微波从 L. Probe3 侧入射, 在该侧基频共振层被电子共振吸收, 大量的电子在该侧基频共振层处反弹, 形成了等离子体密度峰和温度峰。在 L. Probe2 侧, 由于已无微波可共振吸收 (或微波功率减小), 电子在从 L. Probe3 侧基频共振层到 L. Probe2 侧基频共振层的反弹过程中经历了频繁的碰撞, 因此, L. Probe2 侧的密度峰、温度峰和等离子体饱和离子流峰都比 L. Probe3 侧小。

## 5 结 论

在产生晃荡电子的磁镜磁场位形中, 使用 2.45GHz 哨声波对等离子体进行加热研究, 获得如下结论:

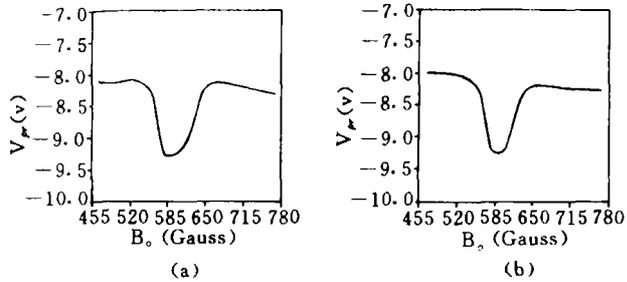


图 7  $P_{\mu}=1.875KW, P_0=2 \times 10^{-5} \text{ torr}$  时,  $V_{pr}$  随  $B_0$  变化趋势  
(a) E. Probe3 ( $r=3\text{cm}, Z=-17\text{cm}$ ); (b) E. Probe2 ( $r=3\text{cm}, Z=17\text{cm}$ )

- (1)在基频共振层附近,有强烈的等离子体密度峰和电子温度峰出现;
- (2)密度峰和温度峰随着中心磁场  $B_0$  的改变,与基频共振层一起移动;
- (3)哨声波在产生晃荡电子的磁位形下加热电子的物理机制为:大量的电子在基频共振层处共振吸收微波,并在此处反弹。

王先玉博士,丁振峰博士和刘伟同志曾在实验上给予帮助,在此谨表谢意。

### 参 考 文 献

- 1 J Kesner. Nucl. Fusion, 1981, 21(1): 97
- 2 J H Booske. IEEE Transactions on Plasma Science, 1986, 14(5): 592
- 3 J D Swift, M J R Schwar. Electrical Probes for Plasma Diagnostics. London: Iliffe Books, 1969
- 4 项志遵,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(上册). 上海: 科学技术出版社, 1981
- 5 H Ikegami. Phys. Fluids, 1972, 15: 2054
- 6 P K Smith. DOE/ET/53051-49, 1983

## The Investigation of Plasma Heated by Whistler Wave in a Magnetic Mirror

Zhang Jiande

(National University of Defense Technology)

Fang Yude Shi Yicai

Ning Zhaoyuan Ren Zhaoxing Qiu Lijian

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica)

### Abstract

The plasma heated by a whistler wave in the magnetic field configuration which is necessary for the formation of sloshing electrons is investigated. Detailed measurements of the parameters of the plasma about the resonance zone are presented. The experiment results show that: (1) there exists a density peak and a temperature peak near the resonance zone; (2) the peaks together with the resonance zone move as  $B$  (the magnetic field of the mirror center) changes; (3) the physics mechanism of the plasma heating is that a lot of electrons absorb the microwave and turn back near the resonance zone.

**Key words** magnetic mirror, plasma, whistler wave, fundamental resonance zone