

# 磁镜中晃荡电子形成热垒的实验研究

张 建 德

长沙国防科技大学应用物理系,长沙 410073

方瑜德 史义才

宁兆元 任兆杏 邱励俭

中国科学院合肥等离子体物理研究所,合肥 230031

1993年3月15日收到

本文在实验上研究了 ECRH 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒的可行性,并对等离子体电位进行了测量。研究表明, ECRH 产生晃荡电子形成热垒是成功的。

PACC: 5255;5250;2852

## 一、引 言

在磁约束受控热核聚变的研究中,热垒概念<sup>[1]</sup>对串级磁镜设计的修正,减少了对中性束能量和塞磁场的要求,提高了聚变增益,使磁镜向着商用反应器的目标又迈进了一步。

通常热垒是用高能强流中性束诱导晃荡离子<sup>[2]</sup>来形成。但这种方法具有效率低<sup>[3]</sup>、费用昂贵和对工程技术要求太高的缺点,对磁镜最终成为经济可行的商用反应器大大地不利。

1980年, Kesner<sup>[4]</sup>提出用电子回旋共振加热 (ECRH) 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒。晃荡电子是一团磁约束热电子,其特点为热电子密度在端塞两端反弹区附近高,在中平面低;产生机制为:在如文献[9]图1所示的特定磁场位形中,采用 ECRH,使得热电子反弹点大致分布在靠近镜喉区的 ECRH 基频共振层附近。ECRH 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒,具有对工程技术要求低,无非轴对称径向输运和能抑制漂移回旋损失锥 (DCLC) 不稳定性等优点。因此,该领域的研究具有重大的意义。

在晃荡电子形成热垒的研究中,首先遇到的,极其关键的问题是:采用 ECRH 产生晃荡电子是否可以形成串级磁镜热垒。本文将围绕这一问题在实验上进行探索。同时,对 ECRH 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒的物理过程进行研究。

## 二、实 验 过 程

实验是在 TAT 轴对称简单磁镜上进行的,其装置参数为

$R$  (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—790G(DC)

在实验中主要使用了如下诊断系统:

1. 朗缪探针系统, 由一个可动探针和三个固定探针组成。可动探针径向位置为  $r = 0$ cm, 轴向位置为  $z = 23-33$ cm 可动; 三个固定探针 L. Probe 1, L. Probe 2, L. Probe 3 的位置径向均为  $r = 3$ cm, 轴向分别为  $z = 0, 17, -17$ 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. Probe 1, E. Probe 2, E. Probe 3 组成, 其径向位置均为  $r = 3$ cm, 轴向位置分别为  $z = 0, 17, -17$ cm。它们用来测量等离子体电位及其空间分布。

3. 高能范围的硬 X 射线诊断, 用来测量来自于等离子体中的 20—600 keV 的 X 射线辐射。

实验安排如图 1 所示。

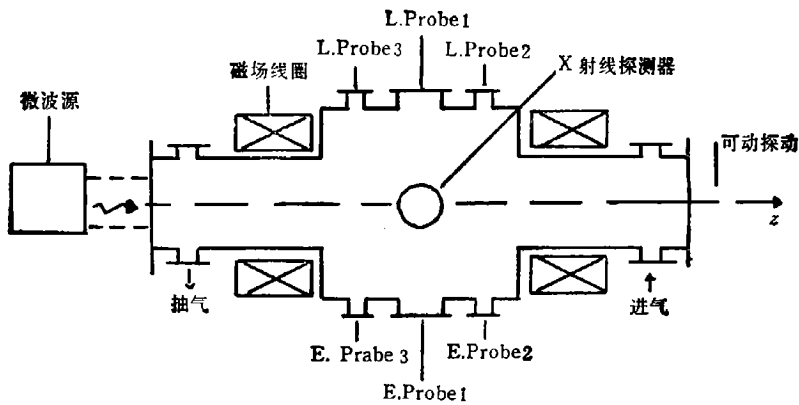


图1 装置和实验总安排示意图

### 三、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, 我们将朗缪探针饱和电子(或离子)流  $I_{e0}$  (或  $I_{i0}$ ) 对中平面探针 L. Probe 1 的测量值进行归一化, 记为  $I_{e0n}$  (或  $I_{i0n}$ ), 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 2 所示为微波功率  $P_\mu = 1.875$  kW, 充气气压  $P_0 = 2 \times 10^{-7}$  torr 时, L. Probe 3 测得的  $I_{e0n}$ ,  $I_{i0n}$  和  $V_{fr}$  随磁镜中心磁场  $B_0$  的变化趋势。由图 2 可见, 在  $B_0 = 580$  G 附近,  $I_{e0n}$  和  $I_{i0n}$  有显著的峰值,  $V_{fr}$  有显著的降。

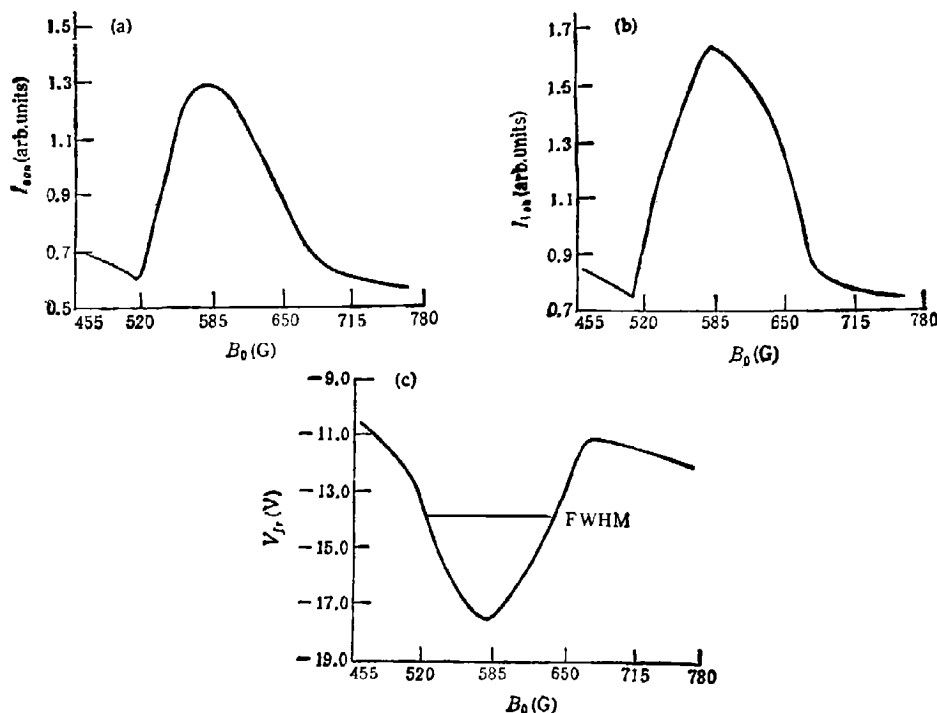


图2  $P_{\mu} = 1.875 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ torr}$  时, L. Probe 3 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $Z = -17 \text{ cm}$ ) 测得的 (a)  $I_{000}$ ; (b)  $I_{100}$ ; (c)  $V_{fr}$  随中心磁场  $B_0$  的变化趋势 (FWHM = Full Width of Half Maximum)

图3所示为电子回旋基频共振层离磁镜中平面的距离  $D_{100}$  随  $B_0$  的变化趋势。由图可见,  $B_0 = 580 \text{ G}$  时,  $D_{100} = 17 \text{ cm}$ , 基频共振层与探针 L. Probe 3 重合。

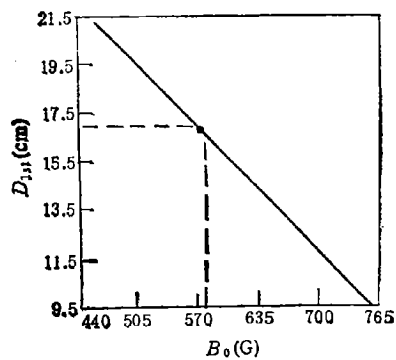


图3 基频共振面离磁镜中平面的距离  $D_{100}$  随中心磁场  $B_0$  的变化

比较图2和图3可以发现, 等离子体饱和流  $I_{000}$  和  $I_{100}$  的峰及悬浮电位  $V_{fr}$  的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4给出了由 E. Probe 3 和 E. Probe 2 测得的等离子体电势  $V_{pr}$  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  $D_{100} = 17 \text{ cm}$  时, E. Probe 3 和 E. Probe 2 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,  $V_{pr}$  降的宽度比  $V_{fr}$  降也略小。

图5给出了当  $P_{\mu} = 1.25 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ torr}$  时, E. Probe 3 和 E. Probe 2 测到的  $V_{pr}$  值随  $B_0$  的变化。和图3比较可见,  $V_{pr}$  降在同样的磁场值  $B_0 = 580 \text{ G}$  处出现, 只是降的深度略小。

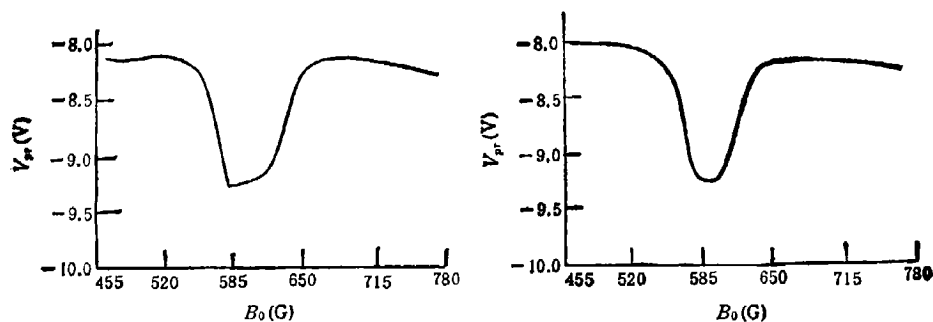


图4  $P_{\mu} = 1.875 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ torr}$  时,  $V_{pr}$  随  $B_0$  变化趋势  
(a) E. Probe 3 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $z = -17 \text{ cm}$ ); (b) E. Probe 2 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $z = 17 \text{ cm}$ )

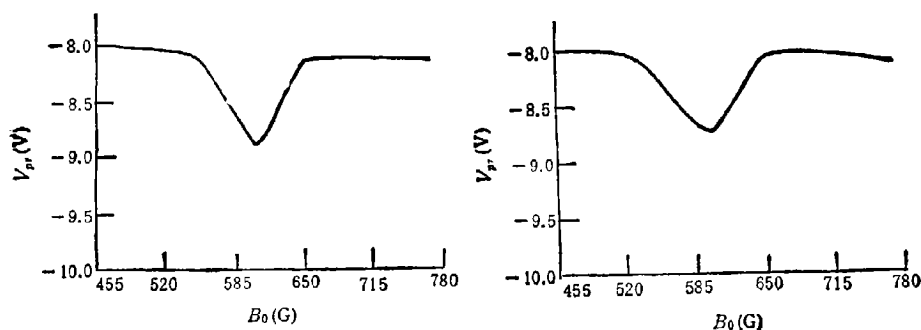


图5  $P_{\mu} = 1.25 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ torr}$  时,  $V_{pr}$  随  $B_0$  的变化趋势  
(a) E. Probe 3 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $z = -17 \text{ cm}$ ); (b) E. Probe 2 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $z = 17 \text{ cm}$ )

图6给出了  $P_{\mu} = 1.25 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ torr}$  时, 由 E. Probe 3 测到的  $V_{pr}$  值随  $B_0$  的变化。由图可见, 当气压较高时,  $V_{pr}$  降不出现。

同时, 在  $P_{\mu} = 1.875 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ torr}$  时, 实验测得磁镜中平面 ( $r = 3 \text{ cm}$ ,  $z = 0 \text{ cm}$ )

处的等离子体密度为  $4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ , 电子温度为  $10 \text{ eV}$ 。

实验中, 还观察到了强烈的 X 射线信号, 这说明等离子体中存在有热电子成份。

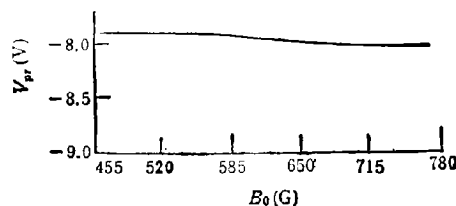


图6  $P_{\mu} = 1.25 \text{ kW}$ ,  $P_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ torr}$  时, E. Probe 3 测到的  $V_{pr}$  随  $B_0$  变化曲线

#### 四、分析和讨论

朗谬探针数据表明, 在基频共振层附近等离子体饱和流  $I_{\text{sat}}$  和  $I_{\text{is}}$  出现强烈的峰,

悬浮电位  $V_{fr}$  出现显著的降。分析表明<sup>[4]</sup>,上述实验现象实际上是,由于大量的电子在基频共振层处共振吸收微波,并在此处反弹,造成了基频共振层附近等离子体密度峰和温度峰。

发射探针数据表明:(1)在基频共振层附近,等离子体电位  $V_{pr}$  降出现;(2)在相同的实验条件下,  $V_{pr}$  降 FWHM (Full Width of Half Maximum) 比  $V_{fr}$  降窄;(3)随着微波功率  $P_\mu$  的减小,  $V_{pr}$  降也减小,随着充气气压  $P_i$  的增加,  $V_{pr}$  降将消失。

在磁镜位形中,低能电子基本上是麦克斯韦分布<sup>[5]</sup>。设在实验中,除基频共振层外,磁镜中的冷电子温度均为  $T_e$ ,则玻耳兹曼关系式成立:

$$\begin{aligned} n_e(z) &= n_{e0} \exp[e(V_p - V_{p0})/kT_e] \\ &= n_{e0} \exp[eV_{pr}/kT_e]. \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $n_{e0}$  和  $V_{p0}$  分别为磁镜中平面处的冷等离子体密度和等离子体电位。 $k$  为玻耳兹曼常数。

在基频共振层  $z = z_R$  处对(1)式微分

$$\begin{aligned} \Delta n_e(z_R) = n_e(z_R) \left[ \frac{eV_{pr}}{kT_e} \left( -\frac{\Delta T_e}{T_e} \right) + \frac{e}{kT_e} \Delta V_{pr} \right] \\ (V_{pr}, \Delta V_{pr} < 0, \Delta T_e > 0). \end{aligned} \quad (2)$$

式中,等号右边第一项为正,它导致冷等离子体密度的增加。显然与基频共振层附近等离子体密度峰的出现有关;等号右边第二项为负,它导致等离子体密度的减小。

文献[3,6]报道,磁捕获热电子的出现,将抑制通过电子流(即冷电子流),产生等离子体势阱:

$$n_e = n_{total} - n_{eh}. \quad (3)$$

式中  $n_{total}$  和  $n_{eh}$  分别为总电子密度和热电子密度。

所以,可以认为(2)式中与  $V_{pr}$  降  $\Delta V_{pr}$  相关的等离子体密度的减少,实际上是由于热电子密度的增加。

$$\Delta n_{eh} = n_e \frac{e|\Delta V_{pr}|}{kT_e}. \quad (4)$$

代入实验数据  $|\Delta V_{pr}| = 1.5V, kT_e = 10eV$ , 有

$$\Delta n_{eh} = 15\% n_e = 13\% n_{total}. \quad (5)$$

综上所述可知:(1)  $V_{pr}$  降  $\Delta V_{pr}$  的出现,标志着晃荡电子位形产生静电势阱或热垒的成功;(2)  $P_\mu = 1.875kW, P_i = 2 \times 10^{-3}torr, B_e = 580G$ , 基频共振区附近热电子密度的增加量  $\Delta n_{eh}$  大约为总电子密度的 13%。

$V_{pr}$  降出现的原因是热电子密度峰,  $V_{fr}$  降出现的原因则是冷电子温度峰<sup>[4]</sup>。

在磁镜等离子体中,碰撞是不可避免的。碰撞主要来源于高密度冷等离子体和中性粒子,碰撞的结果将使一切不均匀性趋于均匀,以达到平衡分布。

由于粒子碰撞频率与粒子间的相对速度成反比,所以,热电子与其它粒子碰撞的频率比冷电子与其它粒子碰撞的频率低得多。这样,冷电子温度峰将由于碰撞而展宽得比热电子密度峰宽,从而导致了  $\Delta V_{pr}$  的 FWHM 比  $\Delta V_{fr}$  窄。

文献[7]报道,微波功率减少则加热率降低。因此热电子密度下降,  $V_{pr}$  降变小。

当充气气压增加时,由于碰撞的缘故,加热率也降低<sup>[4]</sup>。因此  $V_{pr}$  降也减小,甚至消失。

这样,与  $V_{pr}$  降有关的实验现象都得到了解释。

## 五、结 论

通过对实验结果的分析 and 讨论,得出如下结论:

1. 实验中,晃荡电子位形产生了  $\Delta V_{pr} = 1.5V$  的等离子体电位降,这标志着 ECRH 产生晃荡电子形成热垒的成功;
2. 等离子体电位势阱与基频共振层一起移动;
3. 在基频共振层附近,有强烈的冷等离子体密度峰和温度峰出现;
4. 随着入射微波功率  $P_{\mu}$  的增加或中性充气气压  $P_0$  的降低,热电子密度增加;
5. 当  $P_{\mu} = 1.875kW$ ,  $P_0 = 2 \times 10^{-3}torr$  时,基频共振层处的热电子密度与总电子密度之比大于 13%。

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。

- [1] D.E. Baldwin and B. G. Logan, *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979), 1318.
- [2] J. Kesner, *Nucl. Fus.*, **20**(1980), 557.
- [3] J. Kesner, *Nucl. Fus.*, **21**(1981),97.
- [4] 张建德博士论文, ECRH 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒研究 (合肥, 中国科学院等离子体物理研究所, 1992).
- [5] J. Killeen and K.D. Marx, *Methods Comput. Phys.*, **9** (1970), 422.
- [6] 金尚宪, 等离子体物理学, (原子能出版社, 北京, 1981).
- [7] J.H. Booske *et. al.*, *Phys. Fluids*, **28**(1985), 3126.
- [8] G.R. Haste and N. H. Lazar, *Phys. Fluids*, **16**(1979),683.
- [9] Zhang Jian-de *et. al.*, *ACTA PHYSICA SINICA (Overseas Edition)*, **2**(1993),907.

# EXPERIMENT STUDY OF THE THERMAL BARRIER FORMED BY SLOSHING ELECTRONS IN A MAGNETIC MIRROR

ZHANG JIAN-DE

*National University of Defense Technology Changsha 410073*

FANG YU-DE SHI YI-CAI NING ZHAO-YUAN REN ZHAO-XING QIU LI-JIAN

*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031*

(Received 15 March 1993)

## ABSTRACT

The feasibility of using ECRH to produce sloshing electrons and to form tandem mirror thermal barrier is experimentally studied, and the measurement of plasma potential is presented. Results show that production of sloshing electrons to form thermal barrier by ECRH, is successful.

**PACC:** 5255; 5250; 2852