

CN9601166

CNIC-00973

SIP-0082

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE  
AND TECHNOLOGY REPORT

磁镜装置中等离子体加热的实验研究

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE  
PROPERTIES OF THE PLASMA HEATED BY WAVES  
IN THE MIRROR MACHINE

*(In Chinese)*



中国核情报中心  
原子能出版社

China Nuclear Information Centre  
Atomic Energy Press

VOL 27 No 12



段淑云:核工业西南物理研究院副研究员,1964年毕业于天津大学核电子学专业。

Duan Shuyun: Associate professor of Southwestern Institute of Physics, CNNC. Graduated from Tianjing University in 1964, majoring in nuclear electronics.

CNIC-00973

SIP-0082

# 磁镜装置中等离子体加热的实验研究

段淑云 程仕清 陈学盟 潘 清 杨志刚

(核工业西南物理研究院, 成都)

## 摘 要

给出了在简单磁镜装置 MM-2 及其改进装置 MM-2U 中电子回旋共振加热 (ECRH) 和离子回旋共振加热 (ICRH) 的实验结果。在电子回旋共振加热的实验中, 使用一个频率为 15 GHz, 功率约为 30 kW 的微波源, 建立了热电子温度为 140~170 keV 的热电子环, 这是半径为 7~10 cm, 空间分布为一个非封闭的环。在离子回旋共振加热实验中, 使用一个频率为 4.81 MHz, 功率为 40 kW 的射频源, 对 ECR 等离子体进行离子回旋共振加热, 观测到离子与电子受到了不同程度的加热, 离子温度由原来的平均 3 eV 升到 8 eV, 电子温度由原来的平均 20 eV 升到 30 eV, 且等离子体电位及等离子体的约束特性均有所改变。

**THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE  
PROPERTIES OF THE PLASMA HEATED BY WAVES  
IN THE MIRROR MACHINE**

*(In Chinese)*

Duan Shuyun Cheng Shiqing Chen Xuemeng Pan Qing Yang Zhigang

(SOUTHWESTERN INSTITUTE OF PHYSICS, CHENGDU)

**ABSTRACT**

The application of ICRH (Ion Cyclotron Resonance Heating) in the MM-2U simple mirror plasma which is created and heated by ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating) can result in the increases of plasma temperature and density. The confinement performance of plasma also can be improved. The ion and electron temperatures and the plasma density are measured in detail by using the ISP (Ion Sensitive Probe). The plasma floating potential profile are measured in both the radial and the axial direction. The experimental results show that ICRF (Ion Cyclotron Radio Field) can be used for stabilizing ECRH plasma and for improving the confinement performance of plasma.

## 绪 言

大量的理论与实验研究结果表明, ECRH、ICRH 及中性束注入都可有效地进行等离子体加热。在磁镜装置中, 电磁波加热具有更多的作用, 简单磁镜约束的等离子体中, 最危险的低频不稳定性是磁场的环曲率区激发的交换模不稳定性和等离子体密度梯度驱动漂移波不稳定性<sup>[1~3]</sup>。稳定交换模和漂移波的最有效方法是极小 B 磁场 (min-B) 位形。然而, Min-B 磁镜虽然具有很好的稳定性, 但它的非轴对称性却引起严重的反常输运损失。经研究, 人们发现带有热电子 MHD 锚的串级磁镜是一种很好的磁约束位形<sup>[4]</sup>。且热电子锚结构简单, 采用微波产生热电子等离子体在技术上容易实现, 并且可以稳定运行。在简单磁镜中, 微波加热产生的等离子体为具有相对论热电子环的热电子等离子体, 这个高  $\beta$  热电子环对等离子体具有稳定作用, 当热电子环  $\beta$  值足够高时, 可以产生局部磁阱。因此这种磁镜同时保持了轴对称结构和局部 min-B 位形。理论上讲, ECRH 建立的热电子环 (闭环或开环) 所产生的局部位阱, 密度的负梯度及好曲率等, 可以有效地抑制磁镜等离子体的交换模及漂移波不稳定性, 但通常实验中的热电子环还不足以产生局部位阱, 然而 Hillis 等人的实验表明: 只要有热电子存在, 即使不是环形结构, 对等离子体也有明显的稳定作用, 因此在过去的二十年中, 用电子回旋共振加热产生热电子等离子体, 普遍受到人们的重视, 在串级镜的“热垒”及折环 (如 EBT、NBT) 的位形中, 都对热电子环本身的性质及其致稳作用进行了仔细的研究。

射频波加热等离子体是目前受控核聚变研究中提高离子温度的主要手段之一。离子回旋频率范围 (ICRF) 的波加热 (ICRH) 早在 50 年代就用于磁镜装置及仿星器上, 借助于  $\omega_{ri} = \omega_{ci}$  附近的离子回旋波 (慢波) 或者  $\omega_{ri} = 2\omega_{ci}$  附近的磁声波 (快波), 可以对等离子体进行射频加热。射频 (RF) 场对抑制等离子体的 MHD 不稳定性也是非常有效的, 作用在等离子体上的有质动力可以抵消由磁力线环曲率引起的交换模不稳定性。ICRH 也可在磁镜中产生局部热垒, 从而对等离子体的约束及稳定化产生良好的影响。从这个意义上讲, ICRF 电场可以用来加热、稳定和控制等离子体, 可用来约束等离子体中的离子及实现 RF 堵漏。RF 场在串级镜 Phaedrus、Tara 及 Gamma-10 中, 均得到了加热或稳定化的实验结果, 且证明了离子温度  $T_{\perp}$ , 电子温度  $T_{\perp}$ , 离子密度  $n_i$  及  $\beta$  值均随射频源功率的增加而增加。同时也观察到在射频波频率接近离子回旋频率 ( $\omega_{ri} = 1.03\omega_{ci}$ ) 甚至在明显大于离子回旋频率 ( $\omega_{ri} = 1.3, 1.6$  甚至  $4.1\omega_{ci}$ ) 时, 均具有稳定作用。近年来, 在托卡马克装置上也进行了大量的离子回旋共振加热实验。PLT 装置上的实验已证明了少数离子加热和离子的纯二次谐波加热的有效性, 在 JET 的实验中, ICRF 功率已达 22 MW, 借助于 ICRF 加热, 电子温度已经达到 12 keV, ICRF 少数类离子加热产生的高能离子引起的  $^3\text{He-D}$  反应产生的功率已达 100 kW。表明 ICRH 对聚变等离子体研究有着重要的意义。

## 1 装置及实验

(1) ECRH 实验研究先是在简单磁镜装置 MM-2 上完成的。MM-2 的中心磁场强度  $B_0 = 0.295$  T, 镜比为 2.64 : 1, 真空室直径 20 cm, 在其中平面上、下、左、右各开一个观测孔, 一个频率为  $f_{\mu} = 15$  GHz、功率为 30 kW 的回旋管垂直地安装于中平面上方的观测孔处, 通过长为 50 cm 的波导, 将脉宽为  $\sim 10$  ms 的微波功率耦合到等离子体中, 在装置中平

面的右观测孔，安装一套 NaI 探测器，用来探测热电子发射的硬 X 射线能谱，从而计算出热电子的温度与密度，NaI 探测器配合一可移动的钨靶，可以“触摸”电子环的轮廓，从而获得环的位置与尺寸。在装置一端的轴线上，安装一带有 MCP 象增强器的 X 射线针孔相机，用来测定热电子等离子体的硬 X 射线的发射强度，从而测算出热电子环的空间分布及建立与崩溃过程<sup>[5]</sup>。装置中还安装了沿轴向与径向可移动的静电 Langmuir 探针，用来探测冷等离子体参数。装置中平面两侧 5 cm 处各安装一由探测线圈组成的亥姆霍兹线圈，用来测量热电子环的反磁信号。

(2) 在对 ECRH 热电子等离子体进行了充分的研究之后，对 MM-2 进行了改进，在改造后的磁镜装置 MM-2U 上完成了 ECR 热电子等离子体的 ICRH 实验，观察了 ICRF 场对 ECR 靶等离子体的作用。

改建后的 MM-2U 装置的示意图如图 1 所示。

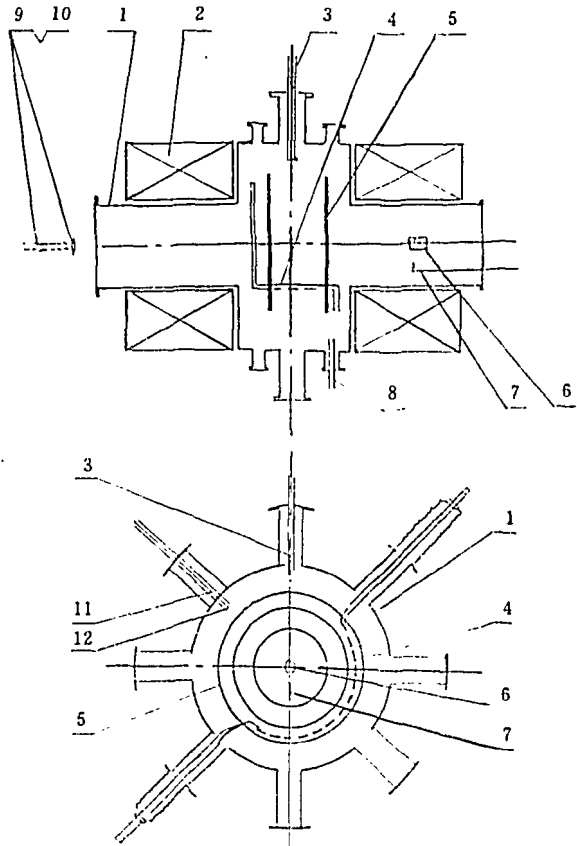


图 1 磁镜装置 MM-2U 示意图

1. 真空室；2. 磁场线圈；3. 微波源波导；4. RF 天线；5. 光栏；6. 多栅分析器和电探针；

7. 离子灵敏探针；8. Langmuir 探针；9. 透镜；10. 光纤；11. 可移动 Langmuir 探针；12. 磁探针。

其中心磁场强度  $B_0 = 0.3 \text{ T}$ ，镜比为 2.0 : 1，中心室处真空室直径为  $\phi 65 \text{ cm}$ ，线圈处为  $\phi 27 \text{ cm}$ ，磁峰距为  $L = 70 \text{ cm}$ 。用一套抽速为  $1500 \text{ L/min}$  的涡轮分子泵以获得一个约  $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  的真空度，充氢 ( $\text{H}_2$ ) 使工作压强维持在  $(1 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ Pa}$  范围，使用在 MM-2 装置上用的同一个微波源，在装置中心平面的顶部窗口，通过一个长为  $50 \text{ cm}$  的圆波导将微波功

率耦合至等离子体中，通过 ECR 产生并加热靶等离子体。为在 MM-2U 中实现对 ECR 靶等离子体的 ICRF 加热实验，使用一个频率为  $f_{rf}=4.8$  MHz、功率为  $P_{rf}\sim 20$  kW 的射频功率源，通过位于轴上  $Z=\pm 18$  cm 处的一对半匝天线（天线内径为  $\phi 36$  cm，用  $3\times 0.3$  cm 的铜带绕制），将射频功率耦合至 ECR 等离子体中。天线发射的电磁波垂直于磁场的波矢  $K_{\perp}$  基本上不变，而平行于磁场的波矢  $K_{\parallel}$  则满足下面的色散关系：

$$\frac{\omega_{rf}^2}{V_{\lambda}^2} \times \frac{\omega_{ci}}{\omega_{ci} - \omega_{rf}} > K_{\parallel}^2 > \frac{\omega_{rf}^2}{V_{\lambda}^2} \times \frac{\omega_{ci}^2}{\omega_{ci}^2 - \omega_{rf}^2}$$

$$V_{\lambda}^2 = B^2/4\pi\rho = (C^2\omega_{ci}^2)/\omega_{pi}^2$$

其中  $V_{\lambda}$  为阿尔芬速度， $\omega_{pi}$  为离子等离子体频率， $\rho$  为等离子体密度。当波沿磁场传播到达相应离子回旋频率的磁场处时， $K_{\parallel}\rightarrow\infty$ ，发生离子回旋共振，实现离子回旋共振加热。由于使用的为固定频率的射频源，因此采用改变磁场强度的方法来满足  $\omega_{rf}=\omega_{ci}$  的共振条件，满足此条件的磁场为 0.315 T，大约位于轴线上  $Z=\pm 6$  cm 处，慢波加热的 RF 波在强场区 ( $Z=18$  cm 处) 注入，此处  $\omega_{rf}<\omega_{ci}$ ，波在向装置中心方向传播亦即向低场区传播时，将在满足回旋共振条件 ( $Z=\pm 6$  cm) 处产生回旋共振吸收，波能将转变成离子的动能，实现离子回旋共振加热。天线内侧即  $Z=\pm 15$  cm 处，安装一对  $\phi 32$  cm 的光栏，以防止天线与等离子体的直接接触。

实验中主要的诊断工具为各种探针。为了研究离子回旋共振加热的效果，我们使用了一个沿轴向可移动的和在径向  $R=8$  cm 处固定的静电离子探针（离子灵敏探针 ISP），用来探测离子及电子温度；一个用来测量饱和离子流的静电 Langmuir 探针；一个测量轴向及径向悬浮电位分布用的可移动的悬浮电探针；一个测量离子温度及粒子端损失的轴向可移动的多栅能量分析器，施以不同的偏压时，可分别给出离子及电子的端损失；装置上还安装一组磁探针，分别用来测量轴向、径向和极向的 RF 场强度的分布及等离子体对 RF 场的吸收情况；二路  $H_z$  信号测量系统用来观测等离子体的辐射情况等，各种测量系统示于图 1。还研制了一套控制线路，以保证在微波注入后大约 4 ms 开始注入射频波，亦即在 ECR 等离子体建立之后加入离子回旋射频波，从而可以在一次放电中对 RF 场加入前后的等离子体参数同时进行测量。微波脉宽大约为 10 ms，而 ICRF 波为大约一秒左右的长脉冲，因此微波先于离子射频波关闭，可以观测到射频波单独存在时的等离子体的各个参数，结果表明当微波关闭后，射频波不能单独维持等离子体。

数据获取及处理系统：PC286 微机，四通道 8 bit 数据存储 A/D 变换器，四路扩展至十六路模拟量交换接口及相应的支持与处理软件。

## 2 实验结果与讨论

实验结果如下：

在简单磁镜中，微波加热产生的热电子等离子体为一个环的形状，微波在基波共振 ( $\omega_{\mu}=\omega_{ce}$ ，其中  $\omega_{\mu}$  为微波角频率， $\omega_{ce}$  为电子的回旋频率) 层附近产生“温热”的电子，在二次谐波共振层附近产生相对论热电子环，环的位置即为二次谐波共振面的位置，其厚度约为几个拉摩半径量级，沿磁轴轴向的长度则取决于磁力线的曲率和电子的平行与垂直于磁场方面的速度分量之比 ( $V_{e\parallel}/V_{e\perp}$ ) 等因素 (其中  $V_{e\parallel}$  和  $V_{e\perp}$  分别为平行于和垂直于磁场

方向的电子速度分量)。

(1) 由于微波加热等离子体的物理机制为电子在基波共振区产生并被加热至“温热”，而在二次谐波共振区，这些“温热”电子被进一步加热成热电子，进而形成了相对论热电子环。ECR 等离子体的产生与加热的基本条件是：一次谐波共振区与二次谐波共振区必需同时存在于真空室中，且保持在一定的气压范围（压力窗）内。在 MM-2 装置的运行条件下，满足  $\omega_{\mu} = \omega_{ce}$  和  $\omega_{\mu} = 2\omega_{ce}$  回旋共振条件的磁场分别位于过轴上  $Z = \pm 15$  cm 和中平面上  $R = 7$  cm 的等强面上，实验中观测到，在满足电子环建立的磁场与真空度（压力窗）的条件下，可以建立起稳定的相对论电子环，其典型参数为：热电子温度为 (140~170) keV，环的位置在  $\omega_{\mu} = 2\omega_{ce}$  的共振面上，即中平面上半径为 (7~10) cm 处，其径向厚度约为 4 cm，沿轴向的边缘长度约为  $\pm 20$  cm，实验中观测到压力窗与微波功率密切相关，在我们所进行的实验条件下，压力窗的压力范围为  $p_0 = (0.5 \sim 2)$  mPa<sup>[6]</sup>，环的平均  $\beta$  值可达 (5~8)%，而且观察到当  $\beta$  值小于 3.6% 时，热电子环为一个既不是轴向对称，也不是封闭的环<sup>[5]</sup>。这说明了波被热电子吸收的不均匀性，与波轨迹计算结果完全一致。电子环的建立（预电离）及衰减过程与气压和微波功率等密切相关。测量表明预电离时间随本底气压的增加而减小。同时也观测到当  $B_0$  与  $p_0$  变化时， $T_{th}$  基本上不变。对等离子体悬浮电位也进行了测量，其结果表明，等离子体悬浮电位沿径向分布在电子环所在位置（二次谐波区）有负位阱的分布出现。

(2) 在 MM-2U 装置的实验中，我们仍使用 MM-2 中使用过的微波源来产生 ECR 等离子体，其对应的基波与二次谐波共振的磁场强度分别为 0.536 T 和 0.268 T。据 MM-2U 的磁场分布，相应的基波与二次谐波共振区分别位于  $Z = \pm (22 \sim 28)$  cm 处及中平面上半径为  $R = (10 \sim 14)$  cm 处，此时  $B_0$  的变化范围为 (0.27~0.32) T。对应的压力窗的压力范围为 (0.5~2) mPa，所有的 ICRH 实验都是在满足 ECR 条件下进行的，尽管  $B_0$  在实验过程中稍有改变，其中大部分实验条件为  $B_0 = 0.3$  T，相应的 ECRH 结果为：二次谐波共振层在  $R = 10$  cm 处，基波共振层在  $Z = \pm 24$  cm 处。

图 2 所示为一次放电时所取得的典型结果。

波形图 (a) 反映了 RF 源的工作状态随等离子体的存在与否的变化，由图可见，随着微波源的关闭，等离子体消失，天线与介质耦合减弱，负载的变化引起了射频源电流的变化。波形 (b) ~ (d) 反映出 RF 场沿轴向、径向和极向强度的变化，可见当等离子体存在时，其强度（幅度）明显降低，这意味着波场能被等离子体吸收，波能转变成粒子的热能（后面将详细讨论）。

### 1. 离子温度与电子温度的测量

如果电子及离子垂直于磁场方向上的速度分布为 Maxwell 分布，那么利用粒子收集型探针，则探针收集到的粒子流与其所施加偏压的关系即探针的伏安 ( $V - I$ ) 特性曲线为指数关系，由其半对数曲线 ( $\ln I - V$ ) 的斜率便可获得其相应的温度。基于这样的假设，使用离子灵敏探针，施加一扫描周期小于微波脉宽的扫描电压，在一次放电中便可获得 RF 电场注入前后的  $I - V$  特性曲线，从而可同时获得射频波注入前后的离子及电子的温度。大量测量结果表明，平均离子温度由射频波加入前的 (2~4) eV 提高到 (6~10) eV，平均电子温度由 (10~30) eV 提高到 RF 波加入后的 (20~40) eV，说明离子和电子得到了不同程度的加热。



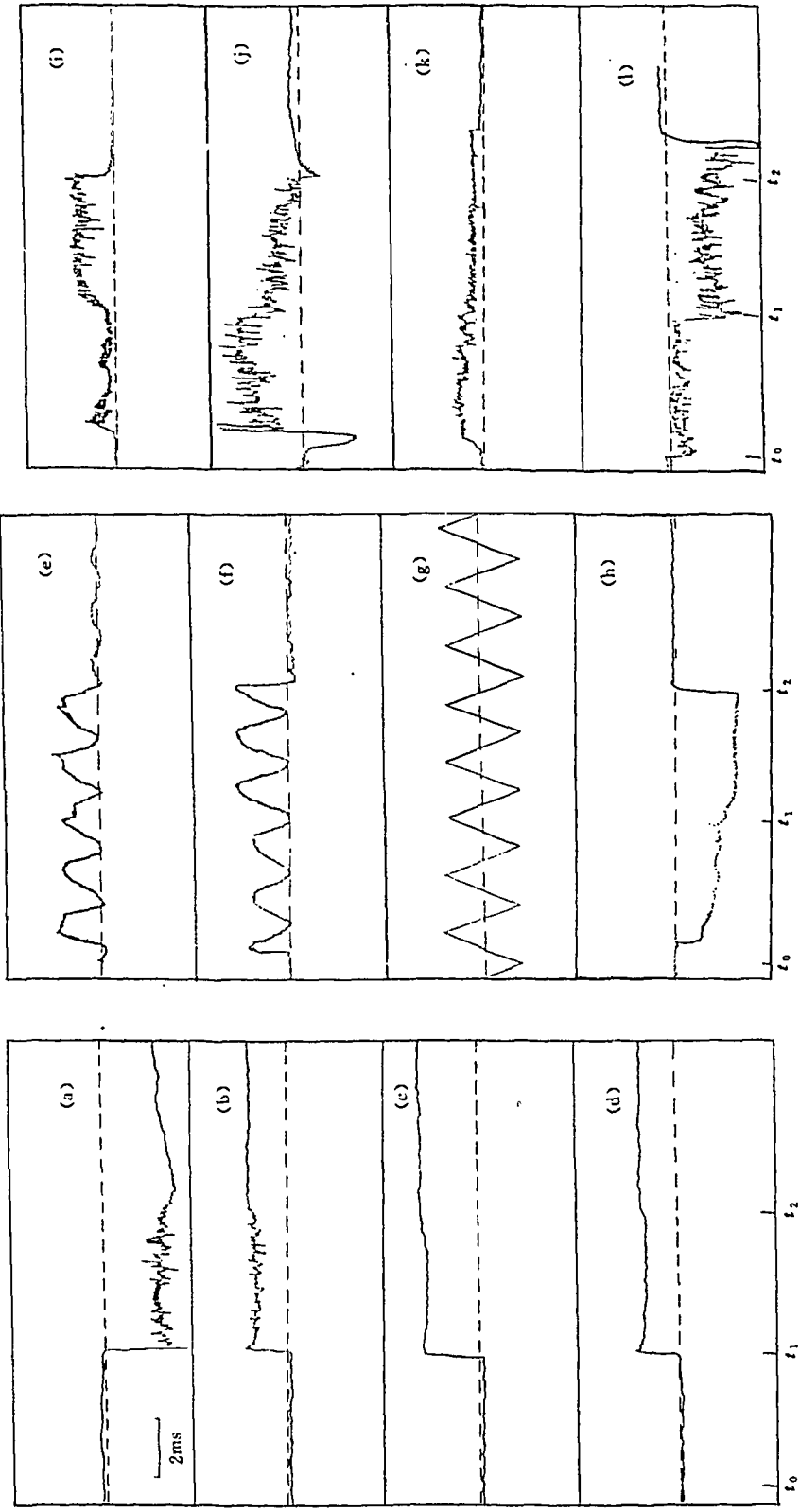


图2 一组典型的放电波形

$t_0$  相当于微波注入时刻;  $t_1$  为 RF 波注入时刻;  $t_2$  为微波信号截止时刻。

(a) RF 功率源电流信号; (b) ~ (d) 磁探针信号; (e) ISP 的离子电流的 I-V 曲线;

(f) ISP 的电子电流的 I-V 曲线; (g) ISP 及多瓣分析器的偏压电源信号; (h) H. 信号;

(i) Langmuir 探针饱和和离子流的变化; (j) 悬浮电位信号; (k) 离子端损失信号; (l) 电子端损失信号。

离子温度的提高是由于波被离子回旋阻尼的结果，波能通过离子回旋加速而变成了离子的动能。而电子也能直接从射频波吸收能量得到加热，理论分析与实验结果都证明，在ICRH情况下，电子能直接从射频波场吸收能量。其能量吸收物理机制是朗道阻尼和飞行时间磁泵阻尼，在朗道阻尼情况下，波场作用在电子上的力是电场力 ( $eE$ )，而在飞行时间磁泵阻尼情况下，波场对电子的作用力为磁场的梯度力，即磁矩为  $\mu$  的电子受到不均匀波磁场的力 ( $-\mu\nabla B$ ,  $\nabla B$  为波磁场梯度)。通常认为电子吸收射频波能的份额为 (4~30)%<sup>[17]</sup>。

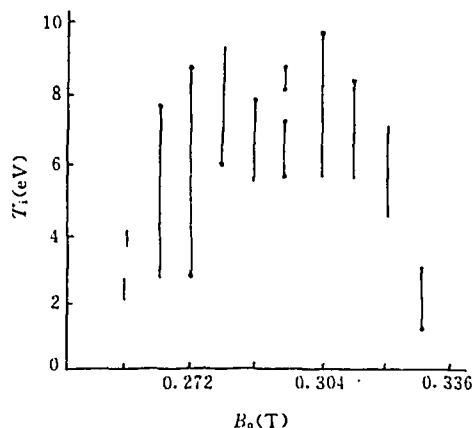


图3 离子温度随中心磁场强度  $B_0$  的变化

离子回旋共振加热也可以从另一方面得到证明：即离子温度随磁场的变化。由图3可见，当  $0.27 < B_0 < 0.32$  T 时，离子温度约为 8 eV，而当  $B_0 < 0.27$  T 或  $B_0 > 0.32$  T 时，离子温度差不多等于 4 eV，减少了 1/2。可见，只有满足回旋共振条件时，离子才得到了加热，说明在等离子体中确实存在波的共振吸收，波能变成了离子的动能，产生了离子回旋共振加热。如此高的粒子的温升决不是射频场的“渗透”引起的。这也可以从 (b) ~ (d) 的磁探针信号在等离子体持续期间 RF 场的降低看出来。

### I. 等离子体密度的变化

由离子灵敏探针 (ISP) 的伏-安特性曲线 (e) 的饱和离子流可估算出离子密度， $n_i = (1 \sim 5) \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。

由图2的 (i) 和 (j) 可见，在 RF 场注入后，使用静电 Langmuir 探针测得的等离子体饱和离子流增加 80% 左右。在  $H_e$  讯号测量中，于 RF 波注入后， $H_e$  强度明显增加 (~30%)。 $H_e$  的发射强度与电子密度  $n_e$  成正比，这与 ISP 的电子收集极的饱和电子流的增加是一致的。从饱和离子流的增加， $H_e$  强度的增加及 ISP 上电子饱和电流与离子饱和电流的增加，可以看出 RF 波的注入使得等离子体的密度增加了。等离子体密度增加的可能原因有二：其一是由于 RF 电场的引入，增加了本底气体的电离度，使得密度增加。另外一个原因是，由于 RF 功率的注入，在满足  $\omega = \omega_{ci}$  时，由于 ICRH 的作用提高了离子的垂直能量与平行能量之比，因此使得落入速度空间“损失锥”中的离子被加热至捕获区域，从而改善了约束性能，降低了端损失。但是由于 RF 功率的限制，加热的 RF 功率还不足以维持等离子体。从几个诊断离子体参数的波形可见，微波结束后，等离子体便熄灭了，尽管此时 RF 场

依然存在。

### III 等离子体悬浮电位的变化

由波形图 (j) 可见, RF 波注入后等离子体的悬浮电位相应降低约 40%。图 4 与图 5 分别示出等离子体悬浮电位  $V_i$  随半径  $R$  及轴向距离  $Z$  的变化。由 MM-2 的 ECRH 实验结果可见,  $V_i$  沿径向分布, 在电子环位置处表现出负位阱趋向。在 MM-2U 实验中, 由图 4 可见,  $V_i$  沿径向分布, 呈中空状, 而在  $R=12$  cm 处存在一个小的负位阱, 此处即为热电子环所在的位置。 $V_i$  沿轴向分布, 则表现出在  $Z=5$  cm 处有一个小的峰。由 MM-2U 的磁场分布可知, 当  $f_{rf}=4.81$  MHz 时, 满足离子回旋共振条件  $\omega_{rf}=\omega_{ci}$  的磁场强度  $B=0.316$  T 位于轴上  $Z=\pm 5$  cm 处, 初步加热研究结果证明了功率沉积充分定域在共振面附近, 因此, 在此处离子被回旋共振加热, 致使离子温度  $T_i$  升高, 则应该表现出相应的等离子体悬浮电位的升高。而在远离共振区处, 加入 RF 场后, 悬浮电位降低, 悬浮电位的降低可能是由于电子温度的升高引起的, RF 场的计算机模拟表明, 在等离子体表面有一个很大的 RF 场的轴向分量  $E_z$ , 因而电子在等离子体表面被平行加热, 使得等离子体的悬浮电位降低且沿径向呈中空状分布。这一结果表明电子在平行磁场方向上被 RF 波场加热在等离子体电位沿径向与轴向分布的控制中起决定性作用。

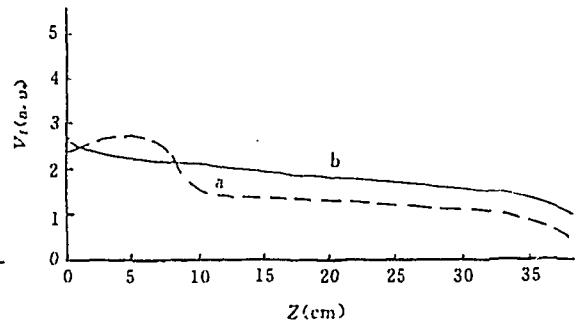
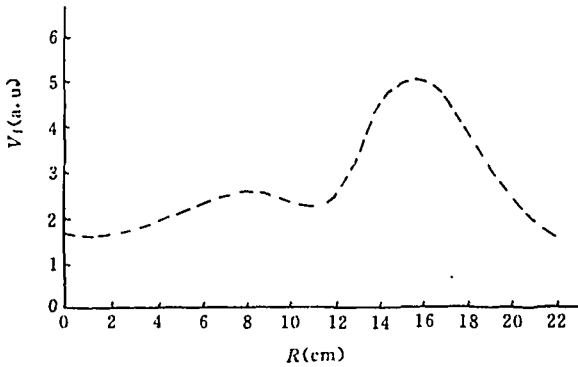


图 4 等离子体悬浮电位随装置径向距离的变化

(a) 有射频场; (b) 无射频场。

图 5 等离子体悬浮电位随装置轴向距离的变化

(a) 有射频场; (b) 无射频场。

### IV 等离子体约束性能的变化

由粒子端损失信号的测量结果 (k) 和 (l) 表明, RF 波的注入使得离子端损失减少了近 30%, 但却引起了电子端损失增加一倍以上。如上所述, 离子端损失的降低可认为是由于回旋共振加热使得  $T_{i\perp}$  增加, 因而落入速度损失锥中的逃逸离子减少。而电子端损失的增加则是由于电子的速度平行分量被波场平行分量  $E_z$  加热所致。 $V_{e\parallel}$  的增加使得落入损失锥中的电子增加, 引起电子端损失的增加。电子端损失增加的另一个原因还由于 ICRF 天线近场的电子平行加热, 这些都是温热电子的端损失, 等离子体中电子温度  $T_{e\perp}$  的增加确信是 RF 场直接加热电子及热交换的结果, 由于 RF 场引起的离子温度的提高, 饱和离子流的增加与离子端损失的减少, 说明了 RF 场改善了离子的轴向输运, 至于粒子的横向输运, 由于 ICRH 共振层的非闭合性及天线几何所引起的波场电位的局部不均匀性, 应该引起离子的

径向输运损失的增加,遗憾的是对径向离子损失我们没有进行监测,由此可见,RF场的注入引起了等离子体约束性能的变化,我们的实验中则表现出约束性能的改善。

### V RF场的致稳作用

离子回旋射频场不仅是离子加热的有效手段,而且ICRF场对抑制等离子体的MHD不稳定性也是非常有效的,它可以用来抑制由于磁力线的环曲率引起的交换模不稳定性,射频场的径向梯度产生的径向有质动力可以抵消由于磁力线环曲率引起的离心力而增强等离子体的稳定性。在我们的实验中,也对RF场的致稳作用进行了实验观测。图6为离子饱和电流在注入RF波前后相对涨落幅度随中心磁场强度 $B_0$ 的变化。不难看出,RF场的存在使得饱和离子流(可以认为是等离子体密度)的相对涨落由RF注入前的40%降低至RF加入后的25%,但在实验中没有观察到悬浮电位 $V_f$ 的相对涨落的明显变化。这说明等离子体密度涨落与温度涨落可能起因于不同的不稳定性因素,RF场对引起密度涨落的不稳定性起抑制作用,而对引起温度涨落的不稳定性则未观察到其致稳作用。

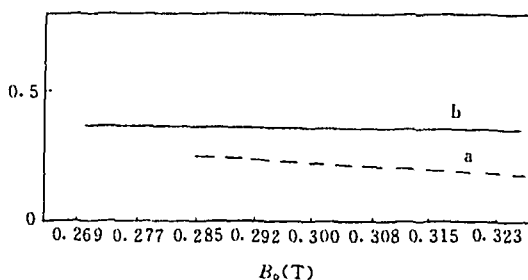


图6 RF源注入前后饱和离子流相对涨落幅度随中心磁场强度 $B_0$ 的变化

(a) 有射频场; (b) 无射频场。

## 3 几点结论

### 3.1 ECRH 的实验结果

(1) 在满足电子环建立的磁场与真空度(压力窗)的条件下,可以建立起稳定的相对论电子环,其典型参数为:热电子温度为(140~170) keV,环的位置在 $\omega_p = 2\omega_{ce}$ 的共振面上,即中平面上半径为(7~10) cm处,其径向厚度约为4 cm,沿轴向的边缘长度约为 $Z = \pm 20$  cm,环的平均 $\beta$ 值可达(5~8)%。“压力窗”的压力范围为 $P_0 = (0.5 \sim 2)$  mPa。

(2) 预电离时间随本底气压的增加而减小。

(3) 等离子体悬浮电位沿径向分布在电子环所在位置(二次谐振区)有负位阱的分布出现。

(4) 观察到当 $\beta$ 值小于3.6%时,热电子环为一个既不是轴对称的,也不是封闭的环。

### 3.2 ICR 下加热对 ECR 等离子体性质的改善及其实验结果

(1) 使得离子温度由平均(2~4) eV 提高到(6~10) eV,电子温度由(10~30) eV 提高到(20~40) eV,电子与离子都得到了加热,即实现了等离子体加热。

(2) 饱和离子流增加了80%,等离子体密度相对增加40%。提高了等离子体的密度。

(3) 等离子体悬浮电位降低了40%,其径向分布呈中空状。

(4) 等离子体密度相对涨落降低了 40%，观察到 RF 场的致稳作用。而悬浮电位的相对涨落不受 RF 场的影响，说明密度涨落和悬浮电位的涨落可能起因于不同的不稳定性因素，因而受 RF 场的影响也不同。

(5) 电子离子温度的升高，离子端损失的减少，密度的增加是与射频源功率直接相关的；悬浮电位的降低及电子端损失的增加则是由 RF 场的轴向分量  $E_z$  引起的。

总之，对 ECR 等离子体进行离子回旋共振加热，可以导致等离子体性质的明显变化。

由于受 RF 场功率的限制，加热与稳定效果是有一定局限性的，因此尚需提高 RF 注入功率，以获得理想的加热与稳定的实验结果。

先后参加此项工作的还有王思耀、顾彪、尚振魁研究员及关维恕、张军、徐前卫、郝树莉、刘平、曾旭初等 MM-2U 组全体成员。在实验过程中离子注入中心电气大组成员提供了帮助，在数据获取系统建立过程中计算机组成员提供了帮助，与刘玉魁副研究员进行了有益的讨论，在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Nelson. Phys. Fluids, 1980, 23 (9): 1850
- [2] Berk, et al. Phys. Fluids, 1983, 26 (1): 201
- [3] Batchlor, et al. Nucl. Fusion, 1979, 19 (2): 235
- [4] Kesner, et al. Nucl. Fusion, 1982, 22 (4): 577
- [5] 段淑云等. 核聚变与等离子体物理, 1993, 13 (2): 43
- [6] 关维恕等. 物理学报, 1989, 38 (2): 228
- [7] 刘玉魁. 核聚变与等离子体物理, 1992, 12 (4): 212

(京) 新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

磁镜装置中等离子体加热的实验研究 = THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE PROPERTIES OF THE PLASMA HEATED BY WAVES IN THE MIRROR MACHINE/段淑云等著. —北京: 原子能出版社, 1995. 6

I. 磁… I. 段… III. ①磁镜-装置-等离子体-实验研究 IV. TL631.1



原子能出版社出版发行

责任编辑: 李乾坤

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷



开本 787×1092 1/16 · 印张 1 · 字数 17 千字

1995 年 6 月北京第一版 · 1995 年 6 月北京第一次印刷

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.