

电子束注入简单磁镜中被电子迴旋共振加热捕获的实验研究

张 军 王恩耀 关维恕 程仕清

段淑云 顾 彪 尚振奎

西南物理研究院, 乐山, 614007

1989年4月5日收到

在简单磁镜 MM-2 中, 在采用 15GHz 大功率迴旋管进行电子迴旋共振加热 (ECRH) 的同时, 以不同的方式向磁镜中注入电子束, 进行了 ECRH 捕获电子束的实验研究. 结果表明: 由于电子束的提前注入, 等离子体的预电离时间被大大地缩短. 由于 ECRH 对电子束的捕获, 使得热电子环参数得到很大的改善, 热电子环的反磁 β 值约增加 62%, 对应反磁增加的捕获效率约为 (30—40)%, 在迴旋管输出约 30kW 的条件下, 适应建立热电子环的气体压力窗为 $(4.67—21.3) \times 10^{-4} \text{Pa}$.

PACC: 7155; 5255; 2852; 7220J

一、引 言

近几年来, 用 ECRH 产生热电子等离子体引起了人们的更大兴趣. ECRH 热电子对等离子体有稳定作用. 目前, ECRH 除化磁镜中广泛应用外, 在 Tokamak, 预电离, 电流驱动, 电流分布控制和加热方面都取得了可喜的结果.

用 ECRH 捕获电子无论对磁镜和 Tokamak 都具有一定的意义. 在磁镜中被捕获的电子束可以产生负电位, 此负电位可以作为串级镜中的热垒^[1]. Rosenbluth 等^[2]建议: 在 Tokamak 中用被捕获的高能粒子环稳定等离子体, 被捕获的高能粒子引入 Tokamak 中有可能直接进入第二稳定区. 这种粒子与磁镜中稳定等离子体的 sloshing ions 与 Elmo Bumpy Torus 中的高能电子起类似的作用^[3]. 在 Tokamak 中的一个热电子环可以起到有效地稳定 external kink 模的限制器的作用^[4]. 热电子等离子体 β 值的增大使磁镜等离子体发生漂移迴旋损失锥 (DCLC) 不稳定性的参数范围变窄, 能降低等离子体漂移迴旋不稳定性的增长率^[5].

本文介绍了一年来在 MM-2 装置上进行 ECRH 捕获电子束实验的近期结果. 实验中采用了 Langmuir 探针, 反磁测量技术, X射线探测及多栅分析器等诊断手段.

二、实 验 装 置

图 1 所示为实验装置示意图. 磁镜的镜比为 $R = 2.64:1$ ($R = B_{\text{磁镜}}/B_{\text{中心}}$), 真空室

内径为 20cm, 磁峰间距为 $L = 60\text{cm}$. 文献[6] 给出计算所得的磁力线与等强线分布. 在中心场 $B_0 = 2.95\text{kG}$ 时, $\omega = 2\omega_{ce}$, (即二次谐波共振面) 处于半径 $r \approx 7\text{cm}$ 的圆环上, 基波共振面 $\omega = \omega_{ce}$ 位于距中心 $z = \pm 15.3\text{cm}$ 处. 根据此要求, 所选定的电子枪位置如图 1 所示. 电子枪引出口所在的平面距中心平面 $z = 55\text{cm}$, 距同侧磁峰 25cm, 电子枪的引出孔位于中心平面上距轴线 7cm 的通量面上, 与二次谐波面相符合. 电子束的注入方向与磁力线的夹角 $\phi \approx 25^\circ$, 经过计算, 电子束注入磁镜后, 大部分电子在速度空间中沿损失锥边缘运动, 并在磁场的作用下形成沿磁力线做迴旋运动的电子束. 电子枪结构如图 1 所示, 其脉冲宽度为 15ms, 电子枪触发电路见图 2. 一个频率为 15 GHz、峰值功率可达 150kW 的迴旋管作为微波源, 本实验中运行功率 30kW, 其脉冲宽度为

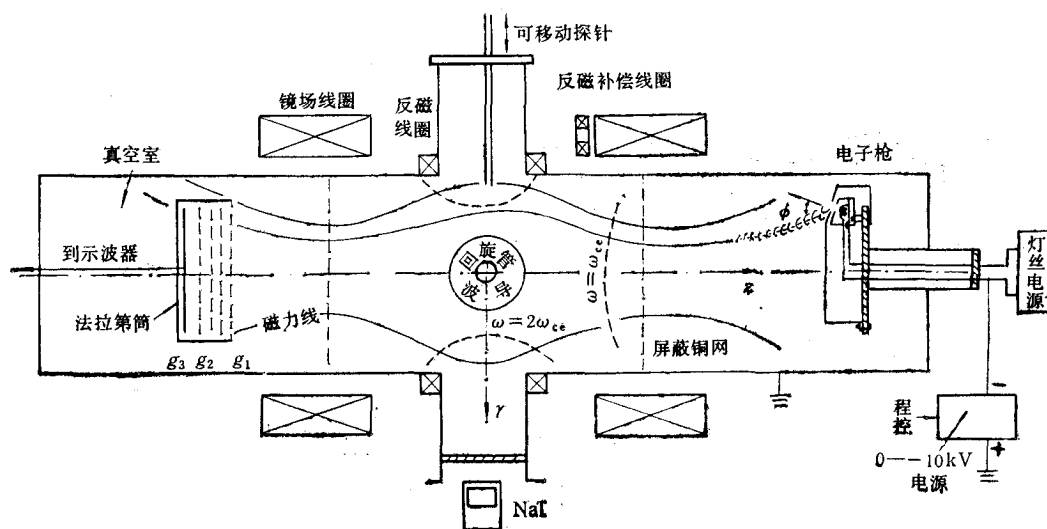


图 1 捕获实验装置示意图

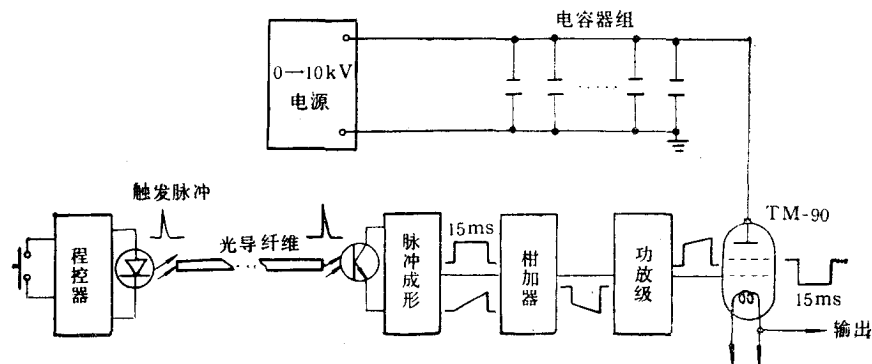


图 2 电子枪控制电路

10ms. 在磁镜轴向的另一端安装了一个大面积多栅能量分析器用以测量接收电子流信号, 在多栅分析器和电子枪前 $z = \pm 20\text{cm}$ 处分别安装了两个半径为 9cm 的接地屏蔽铜网, 以防止在电子枪区域和多栅分析器区域产生等离子体. 装置的中平面上有四个窗

口,微波从正上方的窗口注入,左、右两个水平窗口分别安装 Langmuir 探针和 X 射线探头。反磁测量线圈位于图 1 所示的位置。实验的数据采集与处理系统见文献[6]。

三、原理简介

如所周知,位于速度空间损失锥中的电子是不能被磁镜所反射或约束的。图 3 示出 MM-2 磁镜装置的损失锥,具体地讲,速度与磁力线交角小于 38° 的注入电子将穿过磁镜约束区从另一端逃逸。但是在注入大功率微波进行电子回旋共振加热的情况下,行经二次谐波共振面附近的电子将受到微波场的垂直加速、获得一个垂直速度增量 $\delta v_\perp$ 而进入磁镜约束,成为捕获电子。由于微波场对电子的加热是共振加热,电子会在很短的时间内受到强烈的垂直加速,获得一个很大的垂直速度增量 $\Delta v_\perp$,形成高能捕获电子,进而使磁镜约束的热电子密度 n_{eh} 增加,使热电子环贮能增加,参数改善。

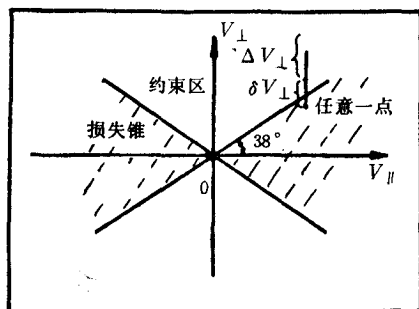


图 3 实验原理简图 $\delta v_\perp$ 为电子在 ECRH 作用下进入约束区的垂直速度改变量; $\Delta v_\perp$ 为电子被 $\omega = 2\omega_{ce}$ 加热成为热电子的垂直速度增加量

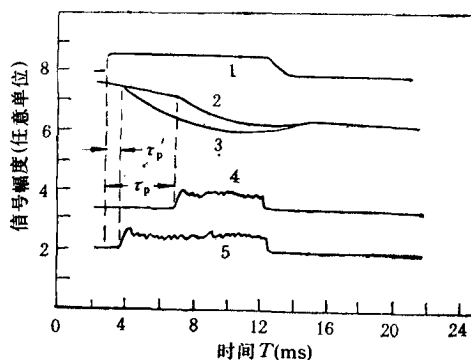


图 4 加枪后 τ_p 缩短的典型放电波形 曲线 1 为二次放电的微波波形; 曲线 2, 3 为反磁信号; 曲线 4, 5 为探针悬浮电位 曲线 2, 4 对应于无电子束注入; 曲线 3, 5 对应于电子束注入

四、实验结果与讨论

实验按图 1 所示安排和第二节所述条件进行。

实验观测了 ECRH 捕获电子对预电离过程的影响。在注入 30kW 微波功率的情况下,令电子束比微波提前 5ms 注入,利用反磁信号测量和用探针测量等离子体悬浮电位的方法来确定预电离时间 τ_p 。图 4 是在充氩气压强为 5.33×10^{-4} Pa 情况下得到的典型示波图。由图 4 可见,在没有注入电子束的情况下, $\tau_p = 4.4\text{ms}$; 在注入电子束的情况下, $\tau_p' = 1.0\text{ms}$ 。图 5(a) 给出预电离时间随充氢气压的变化曲线,注入电子束与不注入电子束的实验对比结果。可见,由于 ECRH 对注入的电子束的捕获以及随后的共振加热引起的热电子密度的快速积累,大大加快了气体击穿和建立等离子体的预电离过程。

其次,实验观测了 ECRH 波场对注入电子的捕获效应。因为理论分析易知热电子

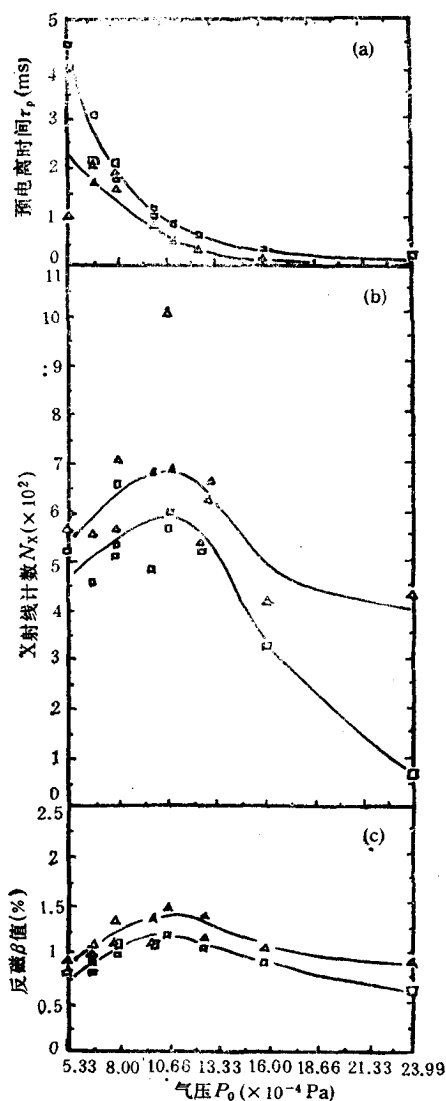


图 5
(a) P_0 - τ_p 关系曲线; (b) P_0 - N_x 关系曲线; (c) P_0 - β 关系曲线;
□ 为无电子束注入; Δ 为有电子束注入

所安置的粒子收集器测得电子的捕获效率。当注入电子束流为 $I_e = 5\text{mA}$, 对应 62% 的反磁 β 增量(或 N_x 增量)时, ECRH 对注入电子的捕获效率为 30—40%, 也就是说, 被捕获且被加热成为热电子的那部分电子占注入电子总数的 30—40%。

在皱折环 EBT 的 ECRH 实验中曾发现热电子环存在 M 模、T 模和 C 模三种运行模式。在 MM-2 的 ECRH 实验中测得^[6]在 30 kW 微波注入的情况下, 其 T 模运行的压力范围为 5.33×10^{-4} — $1.60 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。本实验发现, 在注入电子束的情况下, 由于 ECRH 对电子束的捕获效应使压力范围扩展为 4.67×10^{-4} — $2.13 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。而且在 1.6×10^{-4} — $4.0 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 的范围内即在 M 模运行区, ECRH 对注入电子束的捕获增加了热

密度是随电子环反磁 β 值或与韧致辐射 X 射线计数 N_x , 增加而增加, 即当热电子能量固定时 $n_{eh} \propto \beta \propto N_x$, 因此通过在没有注入电子与注入电子时及磁 β 和 X 射线计数 N_x 的改变来确定捕获效应。图 6 是在本底气体压强为 $1.33 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 的情况下反磁测量典型示波图。结果表明, β 值和 N_x 在注入电子束的情况下均比未注入电子束时提高 62%。图 5(b)和(c)则给出反磁 β 值及 X 射线计数 N_x 在注入电子束与未注入电子束情况下随充氢气压变化的实验曲线。

MM-2 的 ECRH 实验结果^[6]表明: 热电子密度为 $n_{eh} \approx 1 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$, 热电子湿度为 $T_{eh} = 140$ — 170keV , 热电子环体积为 $V \approx 5.3 \times 10^3\text{cm}^3$ 。热电子环的寿命为 $\tau_\beta \approx 2.5\text{ms}$ 。在本实验中通过磁镜另一端

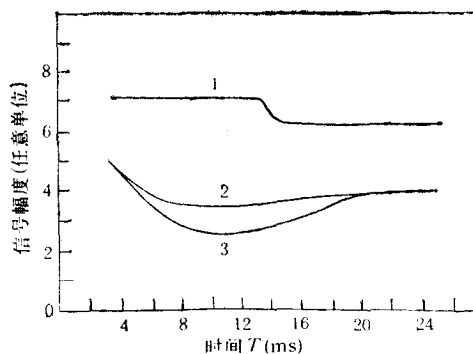


图 6 反磁信号增加的典型放电波形(电子束提前于微波 5ms 注入) 曲线 1 为微波信号; 曲线 2 为无电子束注入时反磁信号; 曲线 3 为有电子束注入时反磁信号

电子环稳定存在的概率。

实验中还观察了一、二次谐振面均不在磁镜约束区中时 ECRH 对注入电子束的捕获效率。在这种情况下, 注入微波不能建立起热电子等离子体, 称其为“非共振捕获”。实验时取中心磁场为 1.65 kG, 把电子枪引出孔设置在 $z = 30\text{cm}$ 的磁轴上, 沿磁轴向磁镜中平行注入电子, 通过磁镜另一端的法拉第筒测量收集电流的变化来确定捕获效率。此实验中电子束比微波提前 1ms 注入。实验结果表明非共振捕获效率为 17%, 并且在注入电子流为 2—6mA 范围内保持不变。实验还观测到非共振捕获效率是随注入微波功率的变化而线性变化的。

图 7 的示波图显示了收集电流随注入微波功率线性变化的实验结果。

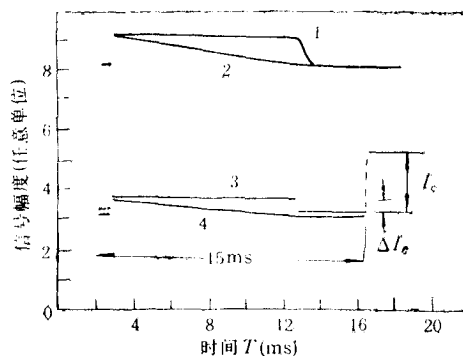


图 7 捕获效率-功率关系曲线示波图 曲线 1,2 为微波信号; 曲线 3,4 为分析器接收器的电流; 曲线 1 对应曲线 3; 曲线 2 对应曲线 4; I_c 为多栅分析器接收到的接收电子流信号; ΔI_c 为受微波作用而减少的部分; 非共振捕获效率为 $\eta \approx \Delta I_c / I_c$ 。

感谢邱孝明研究员、王中天、赵长林副研究员的有益讨论;感谢参加装置运行的黄均成、陈康为、徐前卫、刘锡荣、黎英、柳蓉和裴四秀等同志。

- [1] Zhao Hua, Yang Si-ze, ECRH Trapping of High Energy Gyrate Electron Beam in a Magnetic Mirror, Precepted at 2th National Symposium on Nuclear Fusion and Plasma Physics, Loshan, China, Nov., 22--25, (1987).
- [2] M. N. Rosenbluth *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **51**, (1983), 1967.
- [3] J. Y. Hsu *et al.*, *Phys. Fluids*, **29** (1986), 507.
- [4] J. P. Friedberg *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **51**, (1983), 2105.
- [5] 黄朝松, 热电子等离子体的研究, 博士论文, 1987年8月。
- [6] 关维恕等, 物理学报, **38**(1989), 228.

EXPERIMENTAL STUDY ON ECRH TRAPPED ELECTRON BEAM INJECTED INTO THE SIMPLE MIRROR

ZHANG JUN WANG EN-YAO GUAN WEI-SHU CHENG SHI-QING

DUAN SHU-YUN GU BIAO SHANG ZHEN-KUI

Southwestern Institute of Physics, China, Leshan, 614007

(Received 5 April 1989)

ABSTRACT

The experiments on ECRH trapped electron beam injection in various ways have been carried out on a simple mirror-MM-2 device by use of a 15GHz high power gyrotron. The experimental results show that the preionization time of plasma will be greatly reduced for the electron beam injection ahead of the microwave. And because of ECRH trapped electron beam, the parameters of hot electron ring will be improved greatly, and the diamagnetic value increases about 62 percent. The trapping efficiency of electron beam for the increasing rate of diamagnetic is about 30—40 percent. The gas “pressure window” for building a hot electron ring is $(4.67—21.3) \times 10^{-4}$ Pa, as the gyrotron output power is about 30 kW.

PACC: 7155; 5255; 2852; 7220J