

电子迴旋加热等离子体及热电子环特性的实验研究

关维恕 王恩耀 程仕清 段淑云 王纪海 顾彪 尚振奎

(中国西南物理研究所)

1988年4月4日收到

在简单磁镜 MM-2 中,采用 15GHz 大功率迴旋管进行了电子迴旋共振加热 (ECRH) 实验. 结果表明,随充气压强的提高,预电离时间迅速变短. 在高气压“C-模式”运行区,等离子体径向密度分布呈马鞍形. 在迴旋管输出 30kW 功率的条件下,适于建立热电子环的气体压力窗为 $(0.4-1.2) \times 10^{-3}$ Torr. 利用一个可移动 Laugmuir 探针配合反磁测量的简便方法,在中心场为 2.95kG 时,确定了电子环半径为 7cm,环厚约 4cm,环的轴向边界由 $z = \pm 10$ cm 一直延伸到 $z = \pm 20$ cm. 热电子温度为 140—170keV,热电环平均 β 值为 (4—5)%. 观测到了由热电子环不稳定性引起的迸发式径向电子逃逸,并同时发生反磁信号跌落.

一、引 言

最近,用电子迴旋共振加热产生热电子等离子体引起了人们更大的兴趣. 在皱纹环 (如 EBT) 和串列磁镜的热垒概念中,热电子等离子体起着关键作用^[1,2]. 串列磁镜的发展趋势是增强装置的轴对称性,以求向完全的轴对称过渡. 其技术关键是寻求在轴对称条件下,宏观稳定等离子体的方法. 用 ECRH 建立足够强的热电子环是可能的选择之一^[3]. 目前电子迴旋加热 (ECH) 也在托卡马克实验中受到了重视,在预电离、电流驱动、电流分布控制和加热方面都取得了可喜的结果. 最近苏联在 T-10 上用 4MW 的 ECRH 加热电子得到了接近 10keV 的电子温度,同时实现了电流分布控制^[4].

为开展 ECRH 在聚变装置中的应用研究,首先我们在一个简单磁镜中,用频率 15 GHz 的迴旋管作为波源建立热电子等离子体. 为开展热电子等离子体的物理实验研究创造了条件,并掌握 ECRH 工程建造和装置运行的第一手经验^[5]. 在磁镜装置中,用大功率微波产生等离子体与两个过程有关:在一次谐振面形成等离子体并使之“温热”;在二次谐振面电子被有效加热形成相对论电子环. 环的宽度为几个电子拉莫尔半径,环长取决于装置的磁力线曲率和电子平行与垂直轴线方向的速度比 $V_{\parallel}/V_{\perp}$ 等因素. 在 ECH 等离子体中的热电子成份可利用如下特性来诊断:测量它们产生的磁场,辐射 (如 X 射线, ECE 等)以及对背景等离子体和中性气体的电离和激发等^[6].

本文介绍了我们在简单磁镜 MM-2 中,开展 ECRH 热电子等离子体实验研究的近期结果,着重于研究热电子环和背景等离子体的基本特性. 我们应用探针技术与其它诊断相结合的办法测量热电子环特性. 这一方法的特点是简单、易操作,不但能给出电子环

的空间分布,也描绘出热电子运动的图象。

二、实验装置

实验装置如图 1 所示。磁镜位形由两个螺线管线圈组成,两个线圈中心距离为 64 cm,轴上镜比为 2.64,图 2 给出了计算所得磁力线与等强线分布。在中心场 $B_0 = 2.95\text{kG}$ 时, $\omega = 2\omega_{ce}$ (即二次电子迴旋共振面)处于半径为 6.8cm 圈环上,基波谐振面 $\omega = \omega_{ce}$,处于距中心 $\pm 15.3\text{cm}$ 处。真空室内径 20cm,中平面上开四个窗口,正上方安装微波天

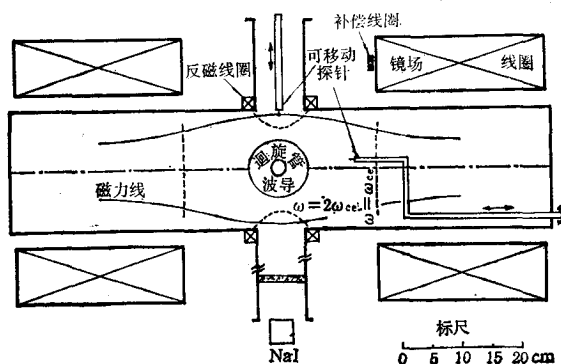


图 1 MM-2 磁镜装置简图

线,左、右两个水平窗口以及底部窗口分别安放各种诊断探头。一个 15GHz 频率,峰值功率可达 150kW 的迴旋管作为微波源,本实验中运行功率 20—40kW。迴旋管垂直安装于中平面的正上方。为减少波导传输损失,应尽量缩短微波源与装置之间的距离,本装置传输波导长 0.5m,工作模式为 H_{01}^0 圆波导^[7]。在磁镜线圈和迴旋管之间加上了铁磁屏蔽层,从而有效地减少了磁镜线圈杂散场对迴旋管正常工作的影响。迴旋管稳定运行的关键是

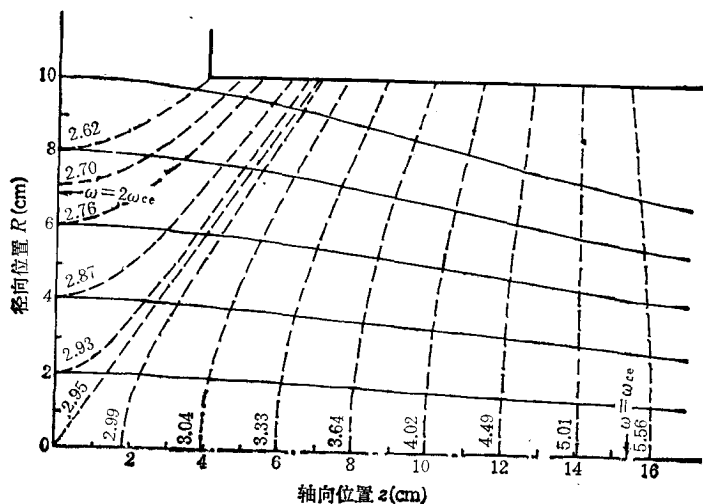


图 2 磁场位形

实线表示磁力线;虚线表示等强线,所标场值以 kG 为单位

主磁场的稳定度。我们采用电阻与晶体三极管并联调节电路,使主磁场 500A 电流稳定度优于 0.05%^[8]。

在装置中平面两侧 5cm 处各安放一探测线圈组成亥姆霍兹线圈,用以探测热电子环的反磁信号,在磁镜线圈的一侧安放另一线圈探测磁镜场信号与反磁线圈反串联用以补偿磁镜场信号,差信号经 RC 积分器送入数据采集器。用 NaI 闪烁晶体获得高能电子的 X 射线信号经多道脉冲幅度分析器可得到高能电子的能谱、电子温度 T_{eh} 、密度 n_{eh} 等参数。在中平面水平窗口和端部窗口安放了径向和轴向可移动探针,用以探测背景等离子体参数和热电子环的尺寸与位置。一套 Apple II 计算机与快速采集器多路数据获取系统实现数据的记录与分析。装置放电的触发信号与电网 50Hz 同步,这样可用计算机和数据获取系统有效地消除各种不良接地的干扰信号。

三、ECH 等离子体的特性

在装置结构复杂、尺寸是微波波长十几至几十倍的条件下,难以实现腔体很好的谐振,通过注入微波加热产生等离子体更加依赖于电子回旋共振。微波加热理论表明:微波首先在 $\omega = \omega_c$ 基波共振面上加热产生温热电子并将气体电离产生冷等离子体,由于波在 $\omega = 2\omega_c$ 二次谐振共振面上的吸收系数远大于在基波共振面上的吸收系数,波将在二次谐波共振面上把冷电子迅速加热至高能并形成热电子环。实验表明,当磁场过低,使基波共振面不在磁镜约束区之内时,不能建立起等离子体。仅当基波与二次谐波共振面均处于磁镜约束区内(如图 1 所示)时,才能建立起理想的热电子等离子体。这些结果与 HER 简单镜^[9]所得实验结果相似。

图 3 给出当(空气)本底气压为 $P_0 \approx 10^{-5}$ Torr,微波功率 $P_m \approx 30$ kW 条件下的典型放电波形。图 3 中 *a* 为微波功率波形,脉宽 6ms; *b* 为探针饱和离子流,它反映了背景等离子体的建立与衰减情况。由图 3 可见,饱和离子流的起始时间比微波延迟了一段时间 τ_p (我们称其为预电离时间),微波关闭后,离子流信号迅即消失,这表明冷等离子体不能在磁镜中被约束。图 3 中 *c* 为反磁信号波形,它显示了热电子环的建立与衰变过程。波形表明,微波注入经时间 τ_p 后,建立了一个稳定的热电子环;微波关闭后,它以 2—3ms 的时间常数衰减。图 3 中 *d* 为 X 射线信号。图线表明,在背景等离子和电子环建立之前,已经出现了表征高能电子存在的 X 射线信号,根据所用 NaI 闪烁晶体探头的灵敏度可以判断这些电子的能量至少在 10—20keV 以上。微波关闭以后, X 射线信号持续大约 40—50ms。这说明电子环消失以后,杂散高能电子仍然被磁镜约束了几倍于环的存在时间。但其能量,从 X 射线信号判断,已大大降低。

预电离是建立 ECH 等离子体的前奏,微波在共振层附近加热稀薄气体中的游离电子,进而电离气体,但同时也存在着各种粒子损失与能量损失过程,所以从微波开始注入至气体击穿所需之预电离时间 τ_p 将随充气压强而变化。电离需更长的时间,随着压强的提高,预电离时间很快缩短。从图 3 中 *d* 的 X 射线信号可以看出,在预电离过程中,已经出现了高能电子,实验还观测到,在一定的气压下,提高微波功率将使预电离时间缩短。

为了进一步了解预电离过程, 我们尝试采用了一个简化的物理模型¹⁾来描述这一过程。代表这一模型的方程组包括粒子密度变化, 能量变化及中性气体密度变化的速率方程, 它们分别描述了电离与粒子损失过程、微波加热电子和电子与离子的能量交换过程以及电离与复合过程。计算结果表明, 在气体击穿以前高能电子已经产生, 甚至其能量比建立的热电子环中热电子的能量还要高很多, 这与图 3 中曲线 *d* 的实验结果是相符合的。从计算结果还可以定性解释预电离时间是随气压的提高而迅速下降的。实验结果, 但由于模型中没有包括共振吸收过程, 还不能取得定量符合。

在大于 $(1-2) \times 10^{-5}$ Torr 的高气压或微波功率较低的情况下, 热电子环不能形成, 在 EBT 中称之为“C-模式”运行。在此条件下, 我们用一个 0.1mm 粗的 Langmuire 探针在中平面上沿水平方向测量了饱和离子流的径向分布。图 4 显示了其不同时刻的(1—5ms) 分布曲线。图 4 中 $R = \pm 10$ cm 为真空室壁, 但由于水平窗口及测量孔道的存在, 在探针移动的方向上, 等离子体可以扩散到 $|R| > 10$ cm 处。 $R = 0$ 为装置轴线, 图 4 中

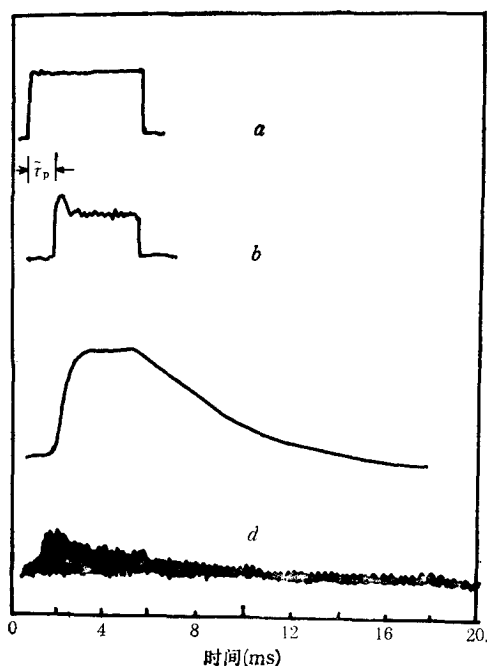


图 3 典型的放电波形 a 为微波; b 为探针饱和离子流; c 为反磁信号; d 为 X 射线信号

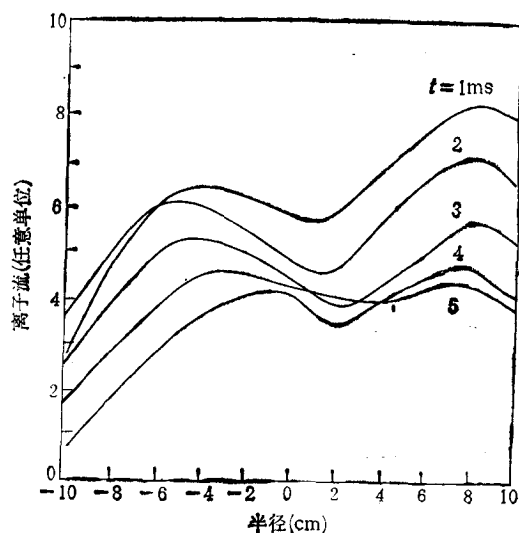


图 4 不同放电时刻探针饱和离子流沿径向的分布曲线

的不同时刻的分布均呈现为“中空”的马鞍形分布。中心位置的偏移可能与探针的定位误差有关, 驼峰位于二次谐振面附近, 是由于该处虽不能形成热电子环但其电子温度由于共振吸收而比其它区域高, 因而产生了密度较高的等离子体。不对称的一种可能解释是由于在较高的密度下, 上、下两部分等离子体受到不同的加热, 上部距离天线较近, 从而吸收了更多的微波功率。这种局部温升形成电场 E , 进而 $E \times B$ 漂移导致了左、右两边不对

1) 私人通讯

称的分布,随着放电时间增加,分布由不对称向较为对称发展,这是由于开始时等离子体密度较高所致.在 Phaedrus 磁镜^[10]实验中,也观测到了这种 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移所导致的不

对称分布,当然这一结果还待进一步实验研究,因为所有的 ECRH 等离子体中,都可能会有这种类似的漂移出现.

在热电子等离子体中,在密度很高时,会出现不稳定性.在爆发这种不稳定性时可以观测到抗磁信号的明显破坏,在电子回旋频率附近爆发强烈的超高频辐射的同时,电子横越磁场大量被抛出^[11].图5是在我们的实验中观测到的典型的热电子不稳定性行为.当反磁信号出现不稳定振荡时,对应在径向上出现大量的电子横越磁力线逃逸.图5中曲线所示探针饱和电子流是在中平面上 $R = 10\text{cm}$ 处测得的.同时在装置端部只观测到信号噪声有所增加,而没有出现与反磁信号振荡相对应的电子纵向逃逸.

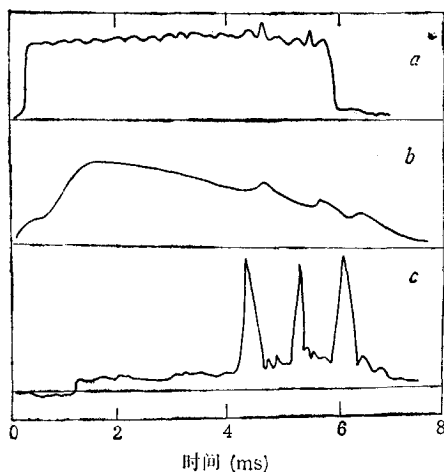


图5 热电子环不稳定性的观测 a 为微波功率; b 为反磁信号; c 为在位于 $R = 10\text{cm}$ 处探针饱和电子流波形

四、热电子环的特性

在适当的选择气体压强和微波功率的条件下,装置经较长时间的放电清洗后即可获得稳定的电子环.电子环的温度由中平面水平窗口安装的 NaI 闪烁晶体探测器获得 X 射线信号经多道分析器给出.典型的热电子环温度为 $140\text{--}170\text{keV}$.背景冷等离子体电子温度 T_{ec} 为 $10\text{--}40\text{eV}$,密度 n_e 为 $(10^{11}\text{--}10^{12})\text{cm}^{-3}$,估计离子温度比电子温度低.而热电子与冷电子之密度比 n_{eh}/n_{ec} 约百分之几.从上述的数据可以估计热电子环的垂直能量 ($n_{eh} \times T_{eh}$) 比背景等离子体能量 $n_{ec} (T_{ec} + T_i)$ 大约高几十到上百倍.因此我们从反磁线圈获得的信号可以认为主要是来自热电子环的贡献.因此它可以作为热电子环的直接指示.从反磁信号估算出的环平均 β 值为 $(4\text{--}5)\%$.

用反磁信号估算 β 值必须知道环尺寸,而环的位置和尺寸是环的基本参数之一.我们用 0.1mm 直径的细钨丝探针,沿径向测量等离子体的悬浮电位分布,同时观测 X 射线信号和反磁信号.图6示出了探针悬浮电位的分布图.从图6中可以看出,在电子环所在位置(二次谐振区域)有负位阱(悬浮电位)分布出现.当探针碰到电子环时,X 射线信号发生明显变化,随着探针向内移动反磁信号逐渐减少,当探针位于半径 R 小于环半径时,反磁信号最小,这说明了热电子沿环向分层在磁面上作漂移运动.如果热电子在原地作拉莫尔运动,而没有环向漂移,当探针从外沿径向向内逐步移动时,只能局部干扰反磁信号而不会观测到反磁信号的明显减少以致于全部打掉热电子环的存在.尽管小探针严重地减小了环的反磁性,这是由于密度积累不上去造成的;但由于它们处于足够高的温度,仍然使探针悬浮电位形成负位阱分布.这就使我们获得了一个非常简单的、仅用 Langmuir

探针测悬浮电位的方法以确定电子环的径向分布成为可能,从图 6 可以看出环厚约 4cm, 环半径 $R = 7\text{cm}$, 这与理论计算的二次谐振面位置相符合。用一竖直探针从外向中平面沿轴移动逐步接触电子环, 同时观测中平面窗口上的反磁信号和 X 射线信号用以获得环沿轴的分布。图 7 是沿轴移动探针的位置与对应的反磁和 X 射线信号曲线, 从图 7 中可以看出环沿轴有一很宽的边缘区域, 在 $z = 10\text{cm}$ 到 $z = 20\text{cm}$ 之间。热电子沿磁面除作为环向漂移运动外, 同时也沿轴向作反弹运动, 环长除决定于磁场形态外, 还取决于电子的 $V_{\parallel}/V_{\perp}$ 。因反弹边缘区域的分布, 在一定程度上给出了电子速度的沿轴和垂直轴分量之比, 这使我们对电子的运动有了更进一步的了解。用探针“触摸”电子环的方法除了给出它的空间分布外, 还一定程度地揭示了它们的运动图象, 因此它比用 X 射线照相更为优越。

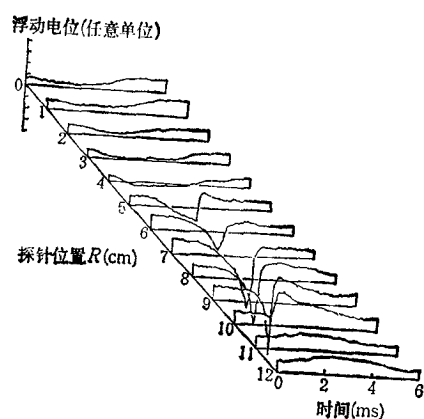


图 6 探针径向悬浮电位分布曲线

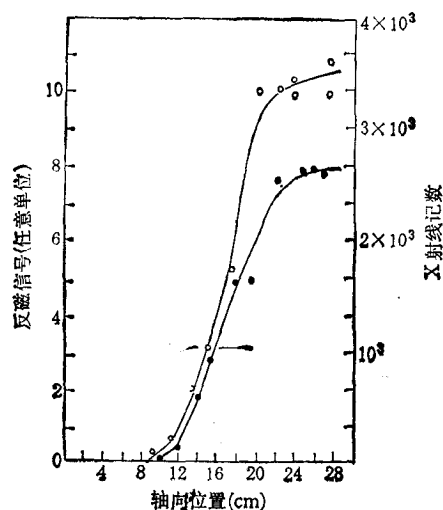


图 7 竖直探针轴向位置与反磁和 X 射线信号关系曲线

五、结 论

MM-2 简单磁镜中 ECRH 实验结果表明:

1. 建立 ECH 等离子体必须经过一个预电离阶段。在 30kW 微波加热功率下, 充气压力由 $4 \times 10^{-6}\text{Torr}$ 提高至 $1.2 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 时, 其预电离时间由 7ms 迅速减至 1ms 以下。随着微波功率的提高, 预电离时间亦将缩短。预电离阶段, 气体击穿前, 就已形成了高能电子, 但形不成电子环。微波关断后, 冷等离子体迅即消失, 电子环 β 值以 (2—3)ms 的时间常数衰变。 β 值衰变为零以后, 热电子环衰变为杂散高能电子被磁镜中继续约束几十毫秒。

2. 在高气压、低微波功率的典型的“C-模式”运行情况下, 不能建立起电子环, 只能建立起冷等离子体。其密度在水平径向方向上的分布呈“中空”的不对称马鞍形, 其密度峰邻近于二次谐振面。这种左、右不对称的分布随着密度的减小将向较为对称演变。

3. 在热电子密度较高的情况下, 观测到了热电子激发的不稳定性。其特征是伴随着迸发式横向电子逃逸, 反磁信号出现同步振荡, 却没有明显的纵向电子逃逸。

4. 为建立热电子环, 装置磁场必须调节到使基波与二次谐波共振面均处于等离子体约束区内。而所建立电子环的 β 值是随充气压强的提高而减小的。在 30kW 微波加热功率下, 适于建立热电子环的气体“压力窗”为 $(0.4-1.2) \times 10^{-5} \text{Torr}$ 。

5. 仅采用一根径向移动的小的探针测悬浮电位并配合反磁测量, 测得在中心磁场为 2.95kG 时, 热电子环半径为 7cm, 与二次谐波面符合; 环的最小厚度为 4cm, 环的轴向边界由 $z = \pm 10\text{cm}$ 一直延伸到 $z = \pm 20\text{cm}$ 。环的平均 β 值为 (4-5)%、X 射线诊断给出热电子温度为 140-170keV。

感谢李世民和马山明对数字获取系统和电源方面的帮助、黄均成、刘西荣、陈康伟、柳蓉、黎英等参加装置运行; 本所一室提供多道分析器, 在此一并表示感谢。

- [1] M. A. Uckan *et al.*, Proceedings of the 2nd Workshop on Hot Electron Ring Physics, ORNL, Oak Ridge, Tenn., (1981), p. 3.
- [2] D. E. Baldwin and B. G. Logan, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 1318.
- [3] N. A. Krall, Proceedings of the 2nd Workshop on Hot Electron Ring Physics, ORNL, Oak Ridge, Tenn., (1981), p. 45.
- [4] M. I. Petelin, Seminar on Fourth International Symposium on Gyrotron and Free Electron Laser, Chengdu, Sichuan, China, June 1-5, (1987).
- [5] W. S. Guan *et al.*, The Digest of The Fourth International Symposium on Gyrotron and Free Electron Laser, Chengdu, Sichuan, China, June 1-5, (1987), p. 16.
- [6] G. R. Haste *et al.*, The Proceedings of the 2nd Workshop on Hot Electron Ring Physics, ORNL, Oak Ridge, Tenn., (1981), p. 23.
- [7] 丁晓加, 王金河, 核聚变与等离子体物理, **5**(1985), 84.
- [8] 马山明等, 电源技术, (1988), 将发表.
- [9] 黄朝松, 任兆杏, 陈世贤, 张束清, 核聚变与等离子体物理, **7**(1987), 151.
- [10] D. C. Sing *et al.*, *Phys. Fluids*, **29**(1986), 4224.
- [11] M. C. Ioffe *et al.*, *У. Ф. Н.*, **100**(1970), 601.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PROPERTIES OF E. C. H. PLASMA AND HOT ELECTRON RING

GUAN WEI-SHU WANG EN-YAO CHENG SHI-QING DUAN SHU-YUN

WANG JI-HAI GU BIAO SHANG ZHEN-KUI

(Southwestern Institute of Physics, Leshan Sichuan, China)

ABSTRACT

The ECRH experiment has been carried out on a simple mirror—MM-2 device by use of a 15 GHz high power gyrotron. The experimental results showed that the preionization time will be rapidly shorten following raising the pressure of puffed gas. During the “C-mode” operation where the gas pressure is higher, the radial profile of plasma density exhibits a saddle shape. The gas “pressure window” for building a hot electron ring is $(0.4-1.2) \times 10^{-8}$ Torr, as the gyrotron output is about 30 kW. Simply by using a movable Langmuire probe accompanied with diamagnetic measurment. it has been determined that the hot electron ring radius is 7 cm, the thickness is about 4 cm and the axial boundary of the ring extends from $Z = \pm 10$ cm to $Z = \pm 20$ cm, when the central field is 2.95 kg. The hot electron temperature is 140 to 170 keV. The average beta value of hot electron ring is (4—5)%. The radial bursts of electrons due to ring instabilities accompanied with the drops of the diamagnetic signal have also been observed.