

CNIC-00177

CN9000325

SIP-0025

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

在MM-2磁镜上对热电子环的实验观测



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00177

SIP-0025

在MM-2磁镜上对热电子环的实验观测

顾 彪 关维恕 程仕清 陈定国

段淑云 苏天华 尚振奎

(西南物理研究所, 四川)

中国核情报中心

北京·1988.3

摘 要

通过注入15kW、15GHz的微波进行电子回旋共振加热，在MM-2简单磁镜中建立了热电子环。电子环半径约为4~5cm。实验观察到了电子环对低频扰动的抑制作用。从低频扰动的再次爆发可推测在微波关断以后热电子环仍可存在10~15ms，而表征热电子存在的X射线辐射可延续50~70ms。微波启动的头2ms的主要作用是电离工作气体，在15kW、9ms微波注入的实验条件下，建立热电子环的最佳充氢气压为 1.2×10^{-3} Pa。

关键词 磁镜实验 电子回旋共振加热 电子环

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF HOT ELECTRON RING ON MM-2 MIRROR DEVICE

Gu Biao Guan Weishu Cheng Shiqing Chen Dingguo
Duan Shuyun Su Tianhua Shang Zhenkui
(Southwest Institute of Physics, Sichuan)

ABSTRACT

A hot electron ring of 4~5 cm radius was established on MM-2 simple mirror through ECRH of 15 kW, 15GHz microwave injection. The suppression of hot electron ring on low frequency fluctuations in plasma has been observed experimentally. It can be inferred from the burst, moment of those fluctuations that the ring can exist for 10~15ms after cutting off the microwave injection, even the X-ray radiation from hot electron can insist for 50~70ms. The pre-ionization of H₂ will expend the beginning 2ms of microwave pulse. The optimum background hydrogen pressure is 1.2×10^{-3} Pa to establish the hot electron ring if 15kW microwave is injected for 9ms.

一、引言

当前,串级磁镜的发展趋势是增强装置磁场位形的轴对称性,以求向完全轴对称过渡^[1],其物理实质则是寻求在轴对称位形下宏观稳定等离子体的有效方法,通过电子回旋共振加热(ECRH)在磁镜等离子体中建立一个热电子环是一种可供选择的方法。60年代,电子环对磁镜等离子体的稳定效应已在INTERM^[2]与ELMO^[3]装置上获得实验证实,皱纹环EBT与NBT就是从此思想发展起来的。近年来,磁镜装置TPM^[4],SM^[5],与HER^[6]又进一步对加热机制及热电子环特性进行了较深入的实验研究,在MM-2磁镜装置上,1985年进行了装置调试与初步的ECRH实验^[7],建立了热电子等离子体。

本文将介绍MM-2磁镜电子回旋共振加热实验的进一步实验结果,文章第二节简要介绍装置和实验参数,第三节介绍MM-2上实验确定的热电子环建立条件,第四节介绍热电子环的特性及其对等离子体低频扰动的抑制作用,第五节则为结果与讨论。

二、装置和实验参数

MM-2为一脉冲运行的简单磁镜^[1],磁峰距为60cm,磁镜比为2.64:1,真空室内直径为20cm,在中央平面上、下、前、后开有4个直径为8cm的测量孔道。回旋管输出的大功率15GHz微波由上孔道经波导输入等离子体。磁镜场由电容器组采用LC放电回路供电,放电波形为半周期等于200ms的近似正弦波,利用压降较小的平顶区工作。装置中心典型工作磁场为0.285T。

图1给出了MM-2磁镜装置简图。图2给出了在中心磁场等于0.285T时的磁场径向分布与轴向分布。图1中还画出了反磁线圈与环形送气管道。实验时,装置先预抽至 6×10^{-6} Pa,然后由置于磁峰附近的环形送气管多孔对轴注入氢气。图中还标示了磁力线分布及基波共振面($\omega = \omega_{ce}$)与二次谐波共振面($\omega = 2\omega_{ce}$)的所在位置,前者垂直于磁轴,距中央平面 ± 17 cm,后者与中央平面正交,距装置中心5cm。

除图1所示逆磁线圈、多栅粒子能量分析器以外,在前水平测量管道外,半径为73cm处安置了 $\phi 40 \times 40$ mm的NaI晶体用以探测热电子韧致辐射的X射线,晶体探头通过光电倍增管接定标器测X射线计数或接多道脉冲高度分析器测X射线能谱;在后水平测量管道内,在半径10cm处径向安置了一个高频天线,用以探测等离子体中的低频扰动,并由低频频谱仪分析频谱。实验所得各诊断信号均可由存储示波器(Textronix5113和5441)显示并拍照记录。

实验采用成都电讯工程学院高能电子研究所提供的回旋管作为微波源,该管可输出脉宽30ms,功率30~50kW的15GHz微波。这一阶段实验中微波脉宽取9ms或14ms,功率为15kW。微波是通过圆波导在中央平面上对心注入装置的,所以输入微波的模式为 $H_{0,1}^0$ 。波导口距装置中心10cm。

实验由程序控制器控制运行。回旋管三套电源直流工作,磁镜场电源开始放电后80ms启动回旋管高压脉冲调制电源输入大功率微波,程控器同时输出触发脉冲启动各诊断工具工作。

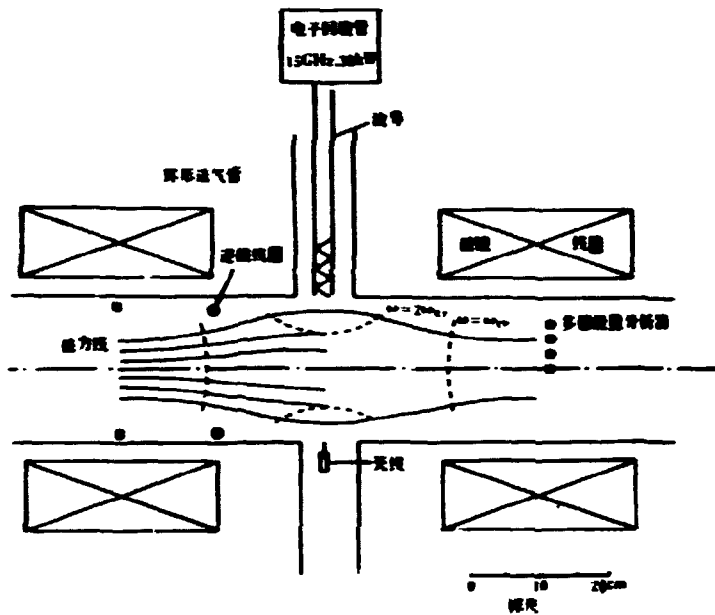


图1 MM-2磁镜装置简图

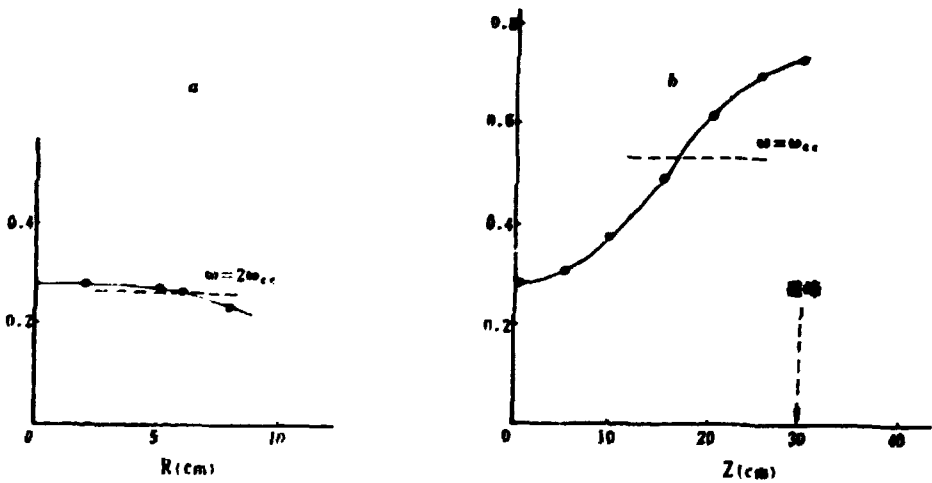


图2 MM-2磁镜装置磁场分布 (中心磁场 $B_0 = 0.285\text{T}$)

a) 中央平面上的径向分布; b) 沿装置轴线上分布。

三、热电子环的建立条件

在磁镜位形中, 通过ECRH建立热电子环的物理过程是: 微波输入装置的起始阶段先将工作气体电离, 产生初始等离子体; 然后在基波共振面与二次谐波共振面所围成的谱探测腔

中，微波不断被共振面所反射并加热电子。在基波共振面附近，微波可将电子加热到温热。在二次谐波共振面附近，电子对微波的共振吸收率较高，温热电子被继续加热到高温并形成热电子环。

表征热电子存在的直观显示是热电子韧致辐射的X射线。由于多道脉冲高度分析器的可资利用时间很少，在我们的实验中，只好利用放电期间X射线的累计计数与持续时间来测定加热效果。图3是一次典型放电的示波迹线记录。照片底部的迹线是微波脉冲（9ms），顶部迹线显示了X射线的强度与持续时间，中间的迹线是端部多栅测得的电子流强度。

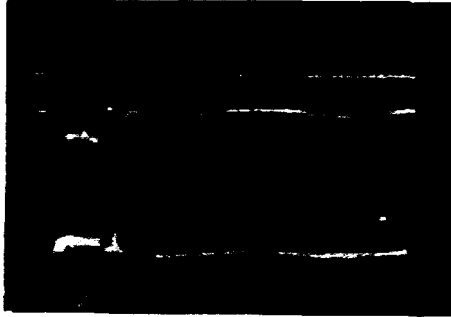


图3 一次典型放电示波记录

多次放电表明，X射线辐射都是在微波开始注入后2ms才出现。这微波输入的起始阶段（2ms）的作用是使工作气体（氢）电离，若要建立热电子环，微波脉宽必须大于2ms。目前很多聚变实验装置采用ECRH产生初始等离子体，微波脉冲宽度取2~5ms，这是与我们的实验结果符合的。

据前述建立电子环的物理过程可知，要使电子加热到高能，基波与二次谐波共振面必须存在于等离子体约束区内；若要建立热电子环，还需调节磁场使二次谐波共振面具有一定的半径。由图1可见，当中心场强 $B_0=0.285\text{T}$ 时（指放电电流达峰值时的场强，微波开始注入时在峰前20ms， $B_0=0.271\text{T}$ ），两共振面所处位置可较好地满足要求，在此情况下电子环半径为5cm。

应该说明的是，由于镜场是由LC回路自然放电所产生的，虽然ECRH选在峰值附近进行，但在微波脉冲期间磁场值是有漂移的。验算表明，图2所示实测磁场分布可用近用的磁镜场经验表达式：

$$B_z(r, z) = \frac{B_0}{1-\alpha} \left\{ 1 - \alpha I_0 \left(\frac{2\pi r}{L} \right) \cos \left(\frac{2\pi z}{L} \right) \right\} \quad (1)$$

表示。式中： B_0 为中心场强， L 为磁峰距， I_0 为零阶变形贝塞尔函数， $\alpha = (R_m - 1)/(R_m + 1)$ ， R_m 为磁镜比。利用(1)式可以求得 $B_0=0.285\text{T}$ 时， $\omega=2\omega_{ce}$ 共振面在微波注入期间随时间沿半径（中央平面上）漂移的情况（图4）。由图4可见在 $B_0=0.285\text{T}$ 的情况下，二次谐波共振加热区将由 $R=3\text{cm}$ 变化到5cm，其主要加热区在 $R=4\sim 5\text{cm}$ 之间，即热电子环所在径向位置。

实验中用一组距轴分别为0，2，4，6cm的多栅粒子能量分析器测量径向电子密度分布，当其距中央平面为6.3cm时，测得的结果示于图5。图中顶部迹线为微波脉冲，由下至上四条迹线为 $R=0, 2, 4, 6\text{cm}$ 的四个多栅测得的信号，图中还示有三角形扫描电压迹线。分析

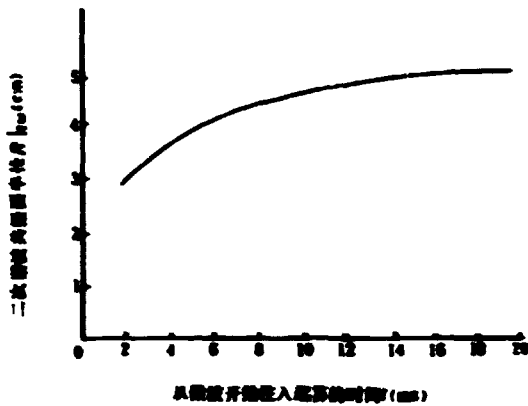


图4 二次谐波共振面位置随时间变化曲线

表明，在 $R=4\sim 6\text{cm}$ 之间冷电子密度有一极大值^[9]。可以认为这是由热电子二次电离效应所致。这为热电子环位置提供了一条旁证。

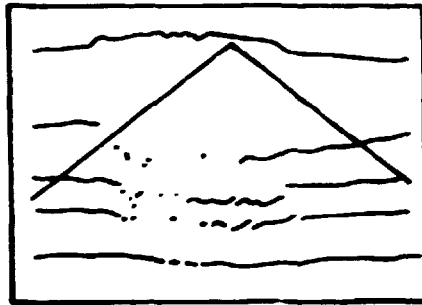


图5 径向排列的多道分析器测得的背景等离子体密度分布

实验观测了X射线计数与持续时间随磁场变化的情况。图6给出了 B_0 由 0.263T 变化到 0.317T 时X射线的计数与持续时间。实验时所用充氦压强为 $1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ，微波脉宽为 9ms 。因为当 B_0 由 0.263T 变至 0.317T 时， $\omega=2\omega_c$ ，共振加热区将由轴上变至 $R=7\text{cm}$ 以外，图6表明：

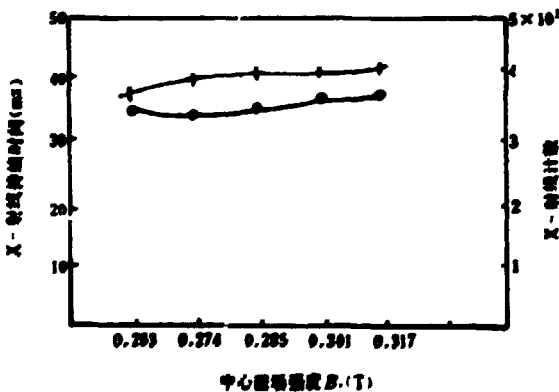


图6 X射线的计数与持续时间随 B_0 的变化

只要两个共振面同时存在于等离子体区，均可将电子加热至高能，而且加热效果基本相同。

EBT与NBT的电子回旋共振加热实验表明，在一定微波注入功率下，随着本底气压的增加，ECRH有三种工作模式：M模式、T模式与C模式，在T模式工作状态，才能在装置中较好地建立起热电子环。换言之，在微波功率(P_p)与充气压强 p_0 为参数变量所构成的二维空间中存在一个“压力窗”(Pressure Window)^[10]，只有在此窗口所限的参数范围内，才能较好地建立起热电子环。在MM-2上的ECRH实验中，在 $B_0=0.285\text{T}$ ， $P_p=15\text{kW}$ ，微波脉宽 $=9\text{ms}$ 的情况下，观测了X射线计数及持续时间随充气压强的变化情况，结果示于图7。由此可见，在充气压强 $p_0=1.2\times 10^{-3}\text{Pa}$ 时，X射线计数与持续时间均取极大值，在 $p_0>1.25\times 10^{-3}\text{Pa}$ 时，X射线的计数与持续时间均大大减小，这是由于热电子在背景等离子体中迅速冷却所致，在 $p_0<1.0\times 10^{-3}\text{Pa}$ 时，X射线的计数与持续时间亦明显减小。可以认为在 $P_p=15\text{kW}$ 的情况下， $p_0=1.0\sim 1.25\times 10^{-3}\text{Pa}$ 区段为加热效果较好，较易建立热电子环的区段。

实验还观测了在 $p_0=1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ， $P_p=15\text{kW}$ ， $B_0=0.285\text{T}$ 条件下X射线计数与持续时间随微波脉宽的变化情况(见图8)。结果表明，两者均随脉冲的加宽而近似线性地增大，尚未出现饱和趋势。可见，微波脉冲加宽是有利于热电子环建立与维持的。

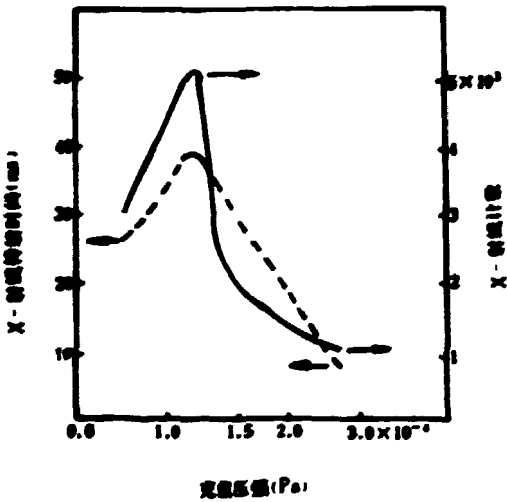


图7 X射线计数与持续时间随充气压强的变化

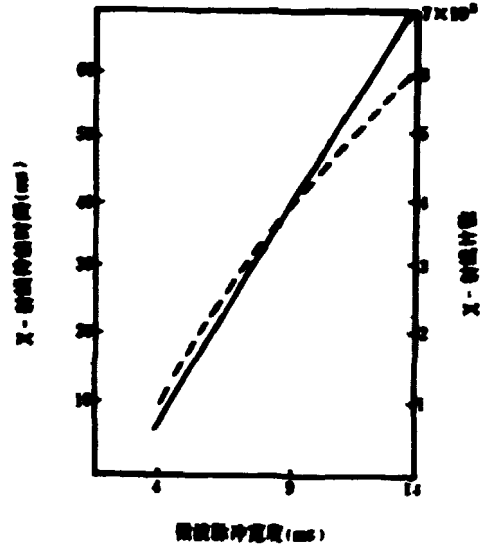


图8 X射线计数与持续时间随微波脉宽的变化

四、热电子环特性及其对等离子体低频扰动的抑制作用

严格地讲，X射线辐射的存在只能说明等离子体中含有高能热电子，检验热电子环是否建立起来的一个重要标志是等离子体中的低频不稳定性(槽纹模，交换模)能否被抑制。因此实验观察了等离子体中的低频扰动。

图9给出了当 $B_0=0.285\text{T}$ 时在不同参数情况下观察到的低频扰动信号，表1列出了获得各个迹线的条件与结果。

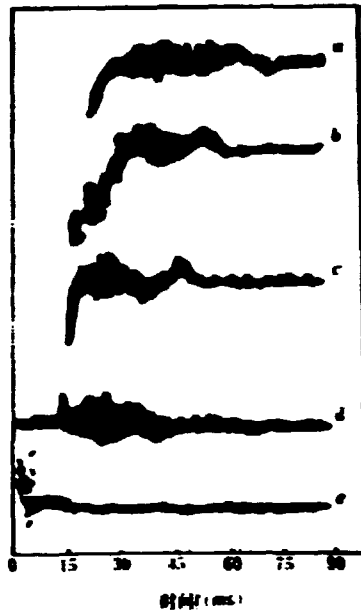


图9 微波脉冲及充氢压强不同时观测到的低频扰动信号

表1 低频扰动激发时间及工作参数表

迹线标称	a	b	c	d	e
微波脉宽 τ_p (ms)	14	14	14	14	1
充 H_2 压强 P_0 (Pa)	1.14×10^{-3}	2.67×10^{-3}	6.67×10^{-3}	6.67×10^{-3}	3×10^{-3}
X射线计数	3616	1731	900	518	/
低频振荡爆发的时刻 t_L (ms)	29	24	18	14	0

由实验结果可知：在a, b, c三种情况下等离子低频扰动分别被抑制了15ms, 10ms, 4ms。可以认为这就代表了微波脉宽停止以后热电子环继续存在的时间。d迹线情况下，微波脉冲停止的同时低频扰动就爆发了，说明微波注入期间所建立的热电子环很不稳定。e迹线情况下微波脉冲仅1ms，刚进行预电离和建立初始等离子体，电子环尚未建立，所以伴随着等离子体的产生就存在着等离子体低频扰动。如第二节所述，微波脉冲注入2ms以后才开始明显的二次谐波加热与建立热电子环，因此可以认为在MM-2 ECRH实验中，在较好的工作参数下，热电子环的建立与存在时间可达27ms，虽然其热电子存在时间可长达50~70ms。

对低频振荡的谱分析表明^[10]：振荡中包含有20kHz至200kHz频率的多种振荡，其基波频率为80kHz。这些振荡应该是由槽纹模与互换模(Intecchange Mode)所激发起来的，有待进一步的实验与分析来确定。

实验用1024道脉冲高度分析器测量了X射线能谱，结果示于图10。

应该说明，由于多道的可资利用时间的限制，未能作多次重复测量，图10所示原始数据

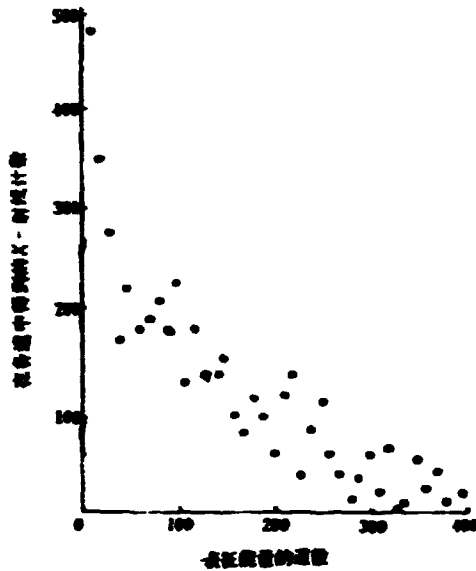


图10 X射线能谱

离散度较大。为求得热电子能量，对数据进行了5点3次平滑处理。^[11]

假设热电子遵守Maxwellian分布，且其光子发射截面取准经典近似，则在 $(E, E + \Delta E)$ 能量间隔中发射的光子数为 $\eta(E)$ 。

$$\eta(E) = 3.38 \times 10^{-18} Z^2 N n_h T_h^{-\frac{1}{2}} E^{-1} \exp\left\{-\frac{E}{T_h}\right\} \quad [\text{光子数 (s}^{-1}\text{cm}^2\text{-keV)}] \quad (2)$$

式中： N 为原子密度， Z 为原子序数， n_h 和 T_h 为热电子密度与温度。

根据公式(2)，使用线性最小二乘法将平滑所得的数据对半对数曲线拟合，计算可得热电子温度 T_h 为135keV，若忽略低能端，仅对100~400道能区所得数据进行处理和拟合，可得 $T_h=180\text{keV}$ 。文献[10]曾将所有热电子环实验的结果作过经验定标，发现大部分实验所得电子拉摩半径 ρ_e 均在0.5~0.6cm之间。按照MM-2装置的共振磁场可以发现上述热电子能量所对应的 $\rho_e=0.32\sim 0.46\text{cm}$ 。基本上与经验定标接近。利用公式(2)还可进一步估算出热电子密度 $n_h \approx 2 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ 利用多栅粒子能量分析器可以测得背景等离子体的电子温度 $T_c=20\sim 50\text{eV}$ ，冷电子密度 $n_c \approx (0.5\sim 1) \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 。所以MM-2装置中 $n_h/n_c=0.02\sim 0.04$ 。此比例高于其它ECRH实验^[12]所得到的热电子含量(0.01)。

五. 结果与讨论

MM-2 ECRH实验得到了如下结果。

1. 在工作气体为氩气的情况下，15GHz，15kW的微波注入首先需耗费2ms的脉冲将工作气体预电离产生初始等离子体。这种初始等离子体是不稳定的，若微波脉宽小于2ms，伴随着等离子体的产生将发生低频扰动。

2. 在微波脉宽大于2ms时, 在MM-2磁镜装置中建立起了半径约为5cm的热电子环。其热电子能量与密度分别为80~135keV与 $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 其背景等离子体的电子能量与密度分别为20~50eV与 $(0.5 \sim 1) \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 。实验观测到了热电子环对等离子体低频扰动的抑制作用。注入14ms、15kW微波所建立的热电子环可维持27ms, 即将低频扰动爆发延迟了10~15ms, 热电子环破裂以后, 热电子仍可继续在装置中存在一段时间, 表征热电子存在的X射线最长可持续50~70ms。

3. 通过X射线的计数与持续时间来监测, 我们观察到了与EBT装置ECRH实验中发现的三种工作模式的类似效应。在MM-2实验条件下, 建立热电子环的压力窗大致为 $1.0 \sim 1.25 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。

4. 在磁镜装置中若要建立热电子环, 其基波共振面与二次谐波共振面必须同时存在于等离子体的约束区, 二次谐波共振面所在位置即热电子环所在位置。

热电子环对芯等离子体的稳定性理论假设了环是刚性的, 1979年, Van Dam Lee^[11]预言, 电子环本身不可能是刚性的, 环与芯等离子体之间耦合作用将限定电子环所能稳定的芯等离子体的 β 值低于10%。这一理论预言已导致了EBT研究途径的严重困难, 若要在串级磁镜中采用电子环作为一种稳定措施, 则Van Dam Lee理论的实验检验是十分重要而有意义的。MM-2实验的下一步目标是: (1) 首先解决测量环与芯等离子体 β 值, (2) 然后通过其它手段 (比如ICRF) 改变芯等离子体 β 值, 研究环与芯等离子体之间的耦合效应。

参加本项实验工作和运行的人员还有: 徐前卫, 黄均成, 刘锡荣, 裴回秀, 陈康伟。

参 考 文 献

- [1] 顾彪, 参加 IAEA 1984年度磁镜装置技术委员会(Moscow)会议情况总结, (1985.1), 未发表。
- [2] 顾彪, 参加 IAEA 1985年度磁镜装置研究技术委员会(京波)会议情况报告, (1985.12), 未发表。
- [3] R.A.Daude et al., Proc.Int.Conf.Novosibirsk, 1980.Vol.2., P.435, (1980)
- [4] R.A.Daude et al., Proc.Int.Conf.Moscow, 1979.Vol.2., P.607, (1979)
- [5] M.Hosokawa, H.Ikegami, Nagoya Univ.Report IPPJ-497, (1980.11)
- [6] B.H.Quon et al., Conf-811203, P.461, (1981)
- [7] 任亮奇, 杨思泽等, HER串级磁镜以及用ECRH产生热电子等离子体的性能(中国科学院合肥等离子体所内部报告, 1985)。
- [8] 关维超等, MM-2磁镜装置上的电子回旋共振加热实验, 未发表。
- [9] 顾定刚, MM-2装置冷等离子体参数测量, 未发表。
- [10] D.L.Hillis, Conf-811-203, P317(1981.12.)
- [11] 李天华, MM-2装置低频不稳定测量, 未发表。
- [12] 顾彪云, MM-2装置上热电子参数的测量, 未发表。
- [13] J.W.Van Dam and Y.C.Lee, Conf-791228, P471, (1979)



P.O.Box 2103

Beijing, China