

CNIC-00180

CN9000327

SIP-0026

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

MM-2电子回旋共振加热实验  
的等离子体诊断



中国核情报中心  
China Nuclear Information Centre

CNIC-00180 .

(SIP-0026).

# MM-2电子回旋共振加热实验 的等离子体诊断

陈定国 苏天华 关维恕 程仕清

(西南物理研究所, 四川)

中国核情报中心

北京·1988.2

## 摘 要

本文主要叙述了MM-2装置通过ECRH加热等离子体并形成热电子环的实验诊断方法,原理、结果和讨论。该方法采用多瓣分析器测得了冷等离子体电子密度和温度、离子密度和温度、冷电子端损失分布和冷等离子体电子密度径向分布、寿命及电子环的位置大小。本文还扼要介绍了低频扰动的测量方法测得电子环的形成时间和存在时间。

**关键词** 热电子环 多瓣分析器

# THE PLASMA DIAGNOSTIC OF THE ECRH ON MM-2

Chen Dingguo    Su Tianhua

Guan Weishu    Cheng Shiqing

(Southwest Institute of Physics, Sichuan)

## ABSTRACT

The diagnostic methods, experiment results and some discussion in MM-2 ECRH experiment for heating plasma and building a hot electron ring have been presented in this paper. By use of multigrid energy analyzer we measured the parameters:  $T_{ee}$ ,  $n_{ee}$ ,  $T_{ie}$ ,  $n_{ie}$  and the profile of electron density radial and the endloss. The method to measure the low-frequency fluctuation has been described briefly also. From this measurement, the formtime and life time of the electron ring can be detected.

目前运行的MM-2装置是一个简单的磁镜装置。它通过15GHz, 15kW, 9~14ms的微波脉冲注入离解氨分子形成初始等离子体并进行加热形成热电子环。该装置的实验诊断是由多栅分析器、低频振荡测量、X射线测量和其它诊断工具相互配合进行的。

我们用DSH-2多栅分析器<sup>[1]</sup>对MM-2磁镜装置电子回旋共振加热实验<sup>[2]</sup>冷等离子体参数进行了如下的诊断实验：

1. 轴向距中心5.4cm, 径向距轴向中心线5cm处对冷等离子体电子密度和电子温度以及等离子体电位进行了测量；

2. 轴向距中心54mm, 径向距轴中心线约10mm处对冷等离子体离子密度和离子温度进行了测量；

3. 轴向距中心63mm处安放四个多栅分析器, 沿径向方向每相隔2cm安放一个, 即距轴向中心距离分别为0, 2, 4, 6cm共四点的径向电子密度分布测量；

4. 轴向距中心312mm (即在磁峰外12mm) 处测得等离子体端损失通量分布, 轴向上安放一个多栅, 距轴线5cm处也安放一个多栅, 在进行此测量时磁场和真空度分别进行了不同的变化。

另外, 我们采用一根经过静电隔离的细小耦合天线沿径向插入, 靠近等离子体边沿感应振荡信号经高频退耦输入示波器等从而测量等离子体的低频振荡。

## 二、原 理

### (一) 多栅分析器原理和实用公式推导

多栅分析器的结构示于图1, 多栅分析器共有五个电极, 其中 $G_1$ 为屏蔽栅, 它与被测装置系统外壳等电位, 亦是多栅分析器的外壳, 当其它电极电位变化时, 就不会使 $G_1$ 外面的等离子体电位受到扰动, 它把多栅口电场完全屏蔽起来, 故称屏蔽栅。

$G_2$ 是分离栅, 在这个栅极上加足够大的正电压以阻挡离子, 从而使电子流通过。相反, 如果加上足够大的负电压阻挡电子, 便可让离子流通过,  $G_2$ 是怎样起分离和阻挡作用的呢? 在等离子体中, 如果正粒子和负粒子距离大于德拜长度 $\lambda_d$ , 这时候可以认为正负粒子已经分开。但是, 在没有外场的作用下, 正负粒子分开的距离就是德拜长度 $\lambda_d$ 。我们采用分离栅 $G_2$ , 用外加电场使正负粒子分开的距离大于 $\lambda_d$ , 若设外加最小的分离和阻挡电场为 $E_{min}$ , 则

$$eE_{min}\lambda_d = \frac{1}{2}kT$$

$$\text{又} \quad \lambda_d = \frac{1}{e} \sqrt{\frac{kT}{4\pi n}}$$

$$\therefore E_{min} = \sqrt{n\pi kT}$$

$$\therefore u_{02min} = d \sqrt{n\pi kT}$$

这里  $d$  为多栅的特征长度 (即  $G_1$  与  $G_2$  之间的距离), 我们在磁镜装置的实验中,  $G_2$  一般加在 150V 分离阻挡离子, -150V 分离阻挡电子。

$G_3$  为分析栅, 它专门用来分析等离子体的电子流和离子流的特性曲线。

$G_4$  为抑止栅, 它的作用是抑止二次电子。

$K$  为收集极, 收集电子流或离子流。

多栅各极网孔目数的选择和栅极之间距离的要求是十分重要的, 一般来讲, 好象网孔的目数越多越好, 这样电场均匀, 各栅的作用更强。例如, 分离栅是用来分离电子和离子的, 如果网孔目数多, 电场均匀且强度适中, 显然利于分离电子和离子使之距离超过等离子体的德拜长度。极间距离越小越好, 这样空间电荷产生的影响变小, 但是实际工作时, 网孔目数太多, 严重影响了多栅分析器的透射率和灵敏度, 极间距离越小, 加工难度越大。因此, 要求网孔直径大小和极间距离和等离子体德拜长度相近似, 尽量保证在同一数量级范围, 以使测量的准确性更加可靠。等离子体德拜长度<sup>[2]</sup>的计算公式为

$$\lambda_D = 7.43 \times 10^2 T^{1/2} n^{-1/2} [\text{cm}]$$

其中  $T$  以 eV 为单位,  $n$  以  $\text{cm}^{-3}$  为单位。

我们设计和加工的 DSH-II 多栅分析器网孔目数为 80 目, 网孔直径为 0.128mm, 各栅之间距离为 2mm, 它适用于目前正在运行中的任何磁镜装置等离子体诊断。

假定等离子体为稀薄等离子体, 即电子平均自由程  $\lambda$  远大于多栅分析器特征长度  $d$ ; 电子的速度分布服从麦克斯韦分布规律; 电子打在栅网后完全被多栅分析器所吸收, 那么在单位时间内打在单位面积多栅收集极表面上的电子数为  $\frac{1}{4} \alpha N_e \bar{v}$ , 其中  $\alpha$  为多栅分析器的总透射率,

$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$  为电子的平均速度<sup>[4]</sup>。那么, 在单位时间内打在多栅收集极表面上的电子饱和电流为

$$I_{e0} = \frac{1}{4} \alpha N_e \bar{v} S_e = \frac{1}{2} \alpha N_e S_e \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi m_e}} \quad (1)$$

其中  $S_e$  为多栅分析器收集电子的有效面积,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ,  $kT_e = 1 \text{eV}$  时,  $T_e = 1.16 \times 10^4 \text{K}$ , 相当于  $kT_e = 1 \text{eV}$  时, 常数

$kT_e = 1.6014 \times 10^{-19} \text{J}$ ,  $m_e = 9.1095 \times 10^{-31} \text{kg}$ , 代入 (1) 式后得

$$I_{e0} = 2.68 \times 10^{-14} \alpha N_e S_e \sqrt{kT_e} \quad (2)$$

其中  $kT_e$  以电子伏为单位, 其余均采用法定计量单位。

由 (2) 式可直接求得电子密度的实用公式

$$N_e = 3.73 \times 10^6 \frac{I_{e0}}{\alpha S_e \sqrt{kT_e}} \quad (3)$$

其中  $I_{e0}$  以  $\mu\text{A}$  为单位,  $S_e$  以  $\text{cm}^2$  为单位,  $kT_e$  以 eV 为单位,  $N_e$  单位为  $\text{cm}^{-3}$ 。

多栅分析器接收到的电子流特性曲线中间上升部分随分析栅扫描电压  $V$  满足于变化规律为

$$I_e = I_{e0} \exp \frac{eV}{kT_e} \quad (4)$$

两端取对数后再求导, 从而可求得等离子体电子温度, 用  $kT_e$  表示为

$$kT_e = \left| \frac{d(eV_{e2})}{d \ln I_1} \right| \quad (5)$$

式中  $kT_e$  和  $eV_{e2}$  均以 eV 为单位。

采用同样的方法可以得到在单位时间内打得多栅分析器收集极表面上的离子流为

$$I_{i0} = \frac{1}{2} \alpha \alpha N_i S_i \sqrt{\frac{2kT_i}{\pi m_i}} = 6.26 \times 10^{-10} \alpha N_i S_i \sqrt{kT_i} \quad (6)$$

由 (6) 式不难计算出离子密度的实用公式

$$N_i = 1.6 \times 10^7 \frac{I_{i0}}{\alpha S_i \sqrt{kT_i}} \quad (7)$$

其中  $I_{i0}$  为多栅收集的饱和离子流，单位为  $\mu A$ ， $\alpha$  为多栅的总透射率， $S_i$  为多栅接收面积，单位为  $cm^2$ ， $N_i$  为离子密度单位为  $cm^{-3}$ ， $kT_i$  单位为 eV。

同理可得

$$kT_e = \left| \frac{d(eV_{e2})}{d \ln I_2} \right| \quad (8)$$

式中  $kT_e$  和  $eV_{e2}$  均以 eV 为单位。

多栅测得的电子流（或离子流）饱和特性曲线饱和点对应的电压  $V$ ，即为等离子体电位。

我们所使用的四个 DSH-II 多栅分析器在 MM-3 稳态磁镜实验装置<sup>(3)</sup> 上测量结果，其透射率为 8%~12% 范围内。

原理线路安排的方框图如图 2 所示，分析栅扫描电源单次扫描，通过触发同步信号和 MM-2 装置高压和微波脉冲同步。

## (二) 低频振荡测量原理简介

约束在磁镜中的等离子体，从热力学的意义讲是不平衡的，它将发生一系列的不稳定性，其中最严重的是集体不稳定性。

要抑制这种不稳定性有几种方法，电子回旋共振加热是目前国际上比较重视的一种途径。因为热电子环的形成除了能抑制等离子体的宏观不稳定性，还能有效地提高等离子体的温度和密度。

为了测量等离子体的低频振荡，我们从径向用一根经过静电隔离的细小耦合天线接近等离子体的边沿耦合其振荡的能量，经过高频滤波后用示波器和低频频谱仪观测，分别显示低频振荡产生的时间，持续期，振荡衰减情况和频谱成分及强度，拍照记录下实验的结果。测量设备和示意框图如图 3 所示。

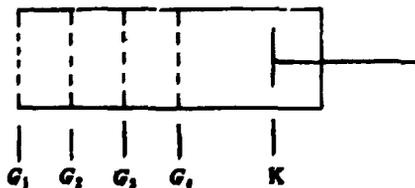


图 1 多栅分析器结构示意图

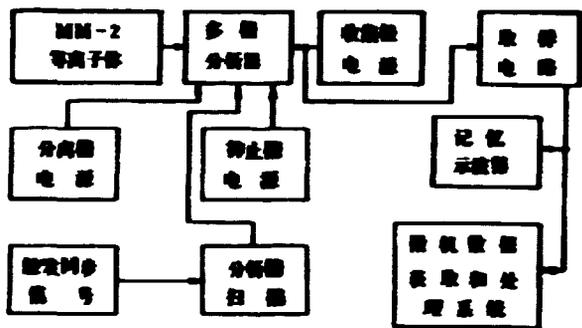


图2 测量原理方框图

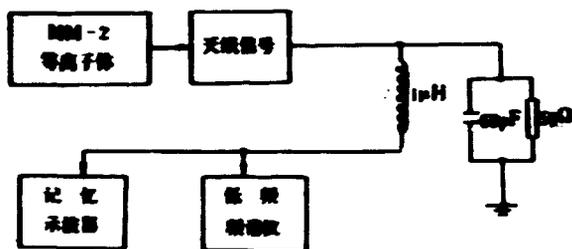


图3 低频测量原理方框图

### 三、测量结果

#### (一) 冷电子参数测量结果

如图4所示为(多瓣分析器位于距装置中心轴向距离为54mm, 径向距轴线50mm处)测得的电子流特性曲线在记忆示波器上拍下来的照片。利用公式(3)和(5)可以求得

$$kT_e = 20 \sim 50 \text{ eV}$$

$$n_e = 5 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$V_p = 15 \sim 25 \text{ V}$$

#### (二) 冷离子参数测量结果

如图5所示为(多瓣分析器沿轴向送入, 轴向距装置中心距离为54mm, 径向距轴线约为10mm左右)测得的离子流特性曲线在记忆示波器上拍下来的照片。利用公式(7)和公式(8)可以计算出

$$kT_i = 10 \text{ eV左右}$$

$$n_i = 2 \sim 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

前述测量结果与1980年名古屋大学等离子体物理研究所热电子环特性测量<sup>[1]</sup>同样参数结果基本一致。

#### (三) 冷电子端损失测量结果

如图6照片所示, 在端部轴线上多瓣所接收到的最大信号有13mA左右, 而在距轴线为5cm处的多瓣有信号, 但信号很小, 表明端损失分布不均匀, 在轴线上最大, 这和磁镜逸出输的理论是吻合的。

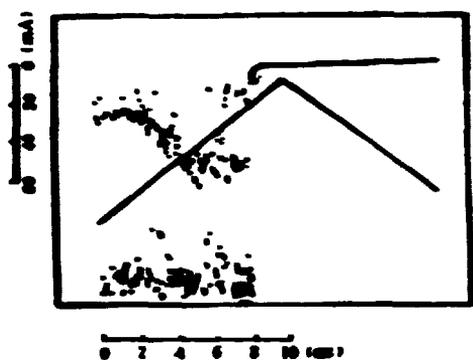


图4 电子束特性曲线和微波信号示波图上:

上: 电子束特性曲线

中: 三角波扫描电压10ms, -85-+100V

下: 微波信号15GHz, 15kW

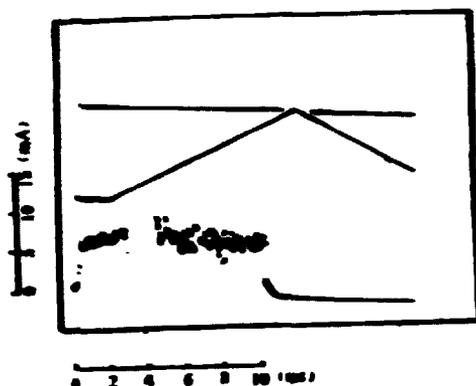


图5 离子束特性曲线示波图

上: 三角波扫描电压10ms, -85-+100V

下: 离子束特性曲线

通过公式我们可以求出端损失逃逸的密度在轴线 $\phi 6\text{mm}$ 范围内的大小为

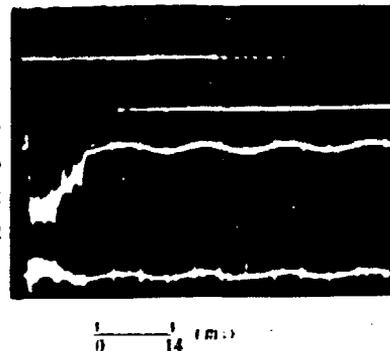
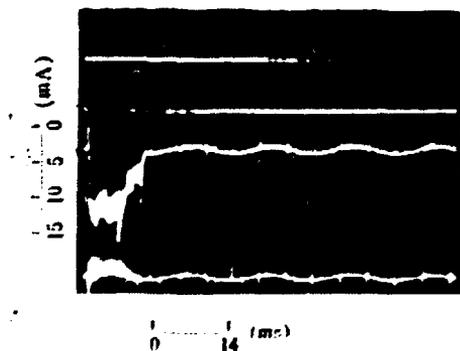
$$n_e = 3.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$$

这个结果是应用公式 (3) 求得的。

在实验中, 我们多次观察到在热电子计数增多时, 冷电子端损失通量反而减小这一重要物理现象。

图6中微波和高压持续时间为14ms, 在高压和微波结束后, 由图充分可见, 冷电子信号延续了1.5ms左右的时间, 而热电子持续时间高达50~70ms, 在微波和高压结束后延续了大约35~55ms。

如图7照片所示, 多幅位置同图6, 只是高压和微波的持续时间有所改变, 为9ms, 此时端部损失最大信号和分布与图6相同, 只是最大信号平坦段时间不等, 图7为6.5ms, 图6为8~9ms。



(a) 微波信号为14ms/0.12V; X射线持续时间为53ms, (b) 微波信号为14ms/0.14V; X射线持续时间为70ms。

图6 微波信号为14ms时端损失测量结果示波图

上: 高压信号和X射线持续时间测量;

中: 端部外轴线上多瓣分析器测量电子端损失通量;

下: 端部外距轴线5cm处多瓣测量电子端损失通量。

### (四) 冷等离子体电子密度分布测量

如图8所示,为四个多瓣分析器放置于轴向距中心为6.3cm处的径向电子密度分布测量,由下向上为距轴线距离为0, 2, 4, 6cm四个测量点,前三个多瓣分析器接收面直径为 $\phi 6\text{mm}$ ,第四个多瓣接收面直径为 $\phi 8\text{mm}$ 。

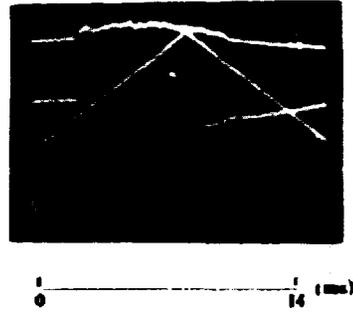
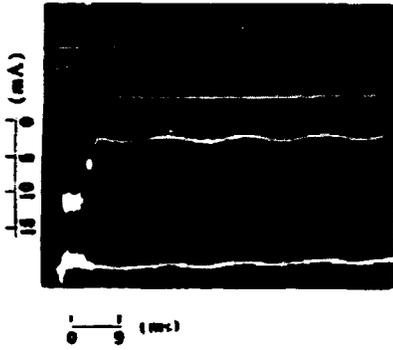


图7 微波信号为9ms时端损失测量结果示波图

上: X射线测量和高压信号;  
中: 轴损失和外端损失通量;  
下: 距轴线5cm处端损失通量。

图8 冷电子密度径向分布测量示波图

上: 微波信号;  
中: 三瓣波扫描;  
下: 分别为四瓣多瓣测量。

测量结果表明,在轴线上密度最小,等离子体是一个中空环状分布,其分布的大小随径向的关系如图9的曲线所示,密度分布在径向4~6cm处有最大值,这正好同电子环相对应,与日本名古屋大学TPM磁镜装置测量结果相似。

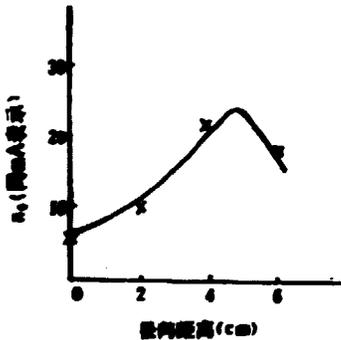


图9 电子密度径向分布曲线

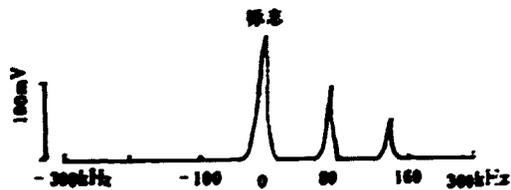


图14 低频振荡频谱

### (五) 低频振荡测量结果

如图10所示,当微波注入仅1ms便终止,实验条件为 $B_0=0.285\text{T}$ ,  $P=4 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 时,照片中波形1和2为X射线持续时间和强度测量;波形3为微波脉冲,持续时间1ms;波形4为多瓣分析器在磁镜端处所测得的慢粒子逃逸信号大小,波形5为测量的低频振荡信号,持续时间为2.8ms。

图11为测量得到的临界状态振荡波形, $B_0$ 和 $P$ 的参数同图10,由照片可见,波形1为微波脉冲信号,持续时间14ms;波形2为测量的低频振荡信号,微波脉冲刚一停止它就产生,持续时间长达27ms。

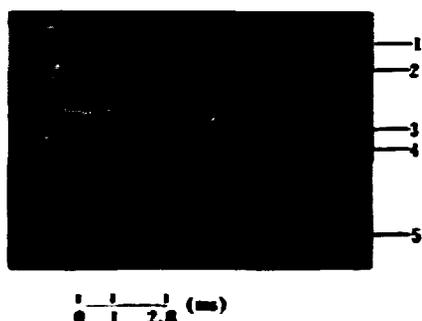


图10 微波脉冲为1ms时的低频振荡波形

波形1为微波脉冲1ms;  
波形2为低频振荡2.8ms。

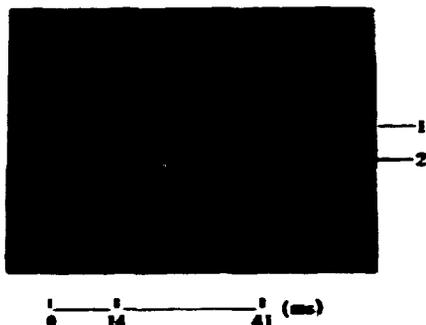


图11 临界状态波形

波形1为微波脉冲10ms;  
波形2为低频振荡41ms。

图12为测量得到的过临界振荡波形。 $B_0$ 和 $P$ 的参数同图10。波形1为微波脉冲信号,持续时间为14ms;波形2为测量的低频振荡信号,它是在微波脉冲停止5ms后开始发生,持续时间长达24ms。

图13为测量得到的超临界振荡波形。 $B_0$ 为0.3T,真空 $p=4 \times 10^{-3} Pa$ ,波形1为微波脉冲信号,持续时间为14ms;波形2为测量的低频振荡信号,它是在微波脉冲停止14ms后开始发生,持续时间长达28ms。

图14为测量得到的低频振荡谱分析图。测得低频振荡频率基波为80kHz,幅度可达到100mV。

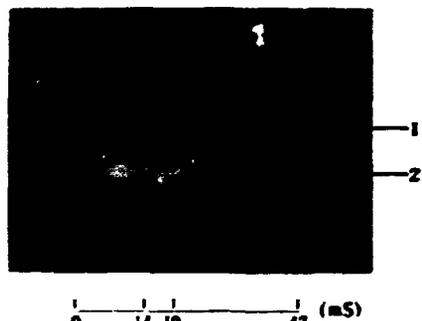


图12 过临界振荡波形

波形1为微波脉冲;  
波形2为低频振荡波形。

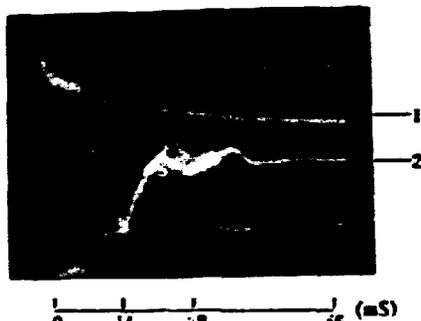


图13 超临界振荡波形

波形1为微波脉冲;  
波形2为低频振荡。

#### 四. 分析和讨论

由多瓣分析器诊断测量结果可以得到如下基本结论:

- (1) MM-2磁镜装置电子回旋共振加热实验冷电子密度为 $5 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11} cm^{-3}$ ;
- (2) 冷电子温度为20~50eV范围;
- (3) 等离子体电位为15~25V范围;
- (4) 冷离子密度为 $(2 \sim 3) \times 10^{11} cm^{-3}$ 左右;

(5) 冷离子温度约为 $10\text{eV}$ 左右;

(6)  $\phi 6\text{mm}$ 的接收面, 端损失电子流为 $13\text{mA}$ 左右, 损失的通量为 $(3\sim 5) \times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ ;

(7) 冷等离子体的约束时间至少有 $1\sim 1.5\text{ms}$ ;

(8) 热电子环的直径大约为 $4\sim 6\text{cm}$ 之间。

通过冷电子径向密度分布和端损失通量测量, 我们进一步作出如下的分析和讨论。

1) 热电子在微波产生以后 $2\text{ms}$ 就开始发生, 这已经被X射线诊断结果充分说明, 我们想讨论的是, 通过图6和图7端损失的测量说明热电子环在微波产生以后多长时间后形成了热电子环。图7表明, 在整个微波区间, 端损失基本为一定值, 没有明显下降趋势, 因而此时有热电子产生, 但尚未形成热电子环, 或者说形成电子环的时间较短。因为, 我们通过多次观察, 在热电子计数大时, 冷电子端损失反而减小的现象, 由图6可见, 在微波出现 $8\sim 9\text{ms}$ 时, 端损失不变, 而当 $8\sim 9\text{ms}$ 以后, 端损失逐渐变小, 呈线性状, 我们认为此时热电子密度增加, 在微波出现 $8\sim 9\text{ms}$ 后热电子环稳定地形成。结论妥当否, 要求MM-2装置微波、高压和磁场进一步稳定后, 由X射线诊断和端损失分布测量来进一步确定。

2) 如图8和图9所示, 在距捕集室中心为 $63\text{mm}$ 的地方, 我们测量了冷等离子体电子密度径向分布表明, 等离子体是中空的, 在径向 $4\sim 6\text{cm}$ 处有一极大值存在, 这和日本TPM磁镜装置冷电子密度分布测量结果相似, 间接证明了MM-2磁镜装置热电子环已经形成。

由低频振荡测量可以看到, 图10的低频振荡波形是在加热不正常的状态下产生的, 微波脉冲仅 $1\text{ms}$ 便终止了, 这时形成的初始等离子体不但密度低, 而且能量也低, 还未达到形成热电子环的条件。因而, 当脉冲注入 $0.5\text{ms}$ 左右便出现低频振荡, 并且很快衰减消失。

图11至图13是在微波加热脉冲工作正常的状态下形成了热电子环时测得的低频振荡波形, 由图可知, 这些热电子环的寿命约为 $12\text{ms}$ 至 $20\text{ms}$ 。

从测量结果中还可以看到, 当热电子环破裂后产生的低频振荡都是比较强烈的, 一般都在数十毫伏, 而且持续时间长。这是因为热电子环的高温度和高密度为环破裂后的低频振荡提供了足够的能量。但同时也应看到, 这些振荡都是阻尼的, 随着带电粒子的电荷交换产生的复合和逃逸损失, 等离子体的温度和密度不断降低, 当密度降至约 $10^{16}\text{cm}^{-3}$ 阈值时振荡便停止。

从图14可知道由低频频谱仪测得的低频振荡频率基波为 $80\text{kHz}$ , 幅度可达 $100\text{mV}$ 。

上述的诊断实验自始至终得到高振奎、顾庭两位同志的关心和指导, 在此致以衷心感谢。参加实验工作的有MM-2组和诊断组两个大组全体同志。

### 参 考 文 献

- [1] 廖定国、苏天华等, 多圈分析器测量等离子体参数, 1986年五八五所年报。
- [2] 吴德超等, 在MM-2磁镜装置上的电子团及其加热实验, 1986年内部资料。
- [3] 康寿万、陈厚祥, 等离子体物理学手册, 科学出版社, 1981年。
- [4] 顾志超, 食品旋磁管, 高温等离子体诊断技术, 上册, 1982年, 上海科学技术出版社。
- [5] 廖定国、苏天华、王全河, MM-3磁镜装置实验报告, 1980年12月成都“受控与等离子体物理学会会议资料汇编第四卷, 内部资料。
- [6] M. Hoshino and H. Ikegami 1971-497, 1980.



P.O.Box 2103

Beijing, China

**China Nuclear Information Centre**