

009200561

中国核科技报告

中国科学院原子能研究所
中国科学院原子能研究所
中国科学院原子能研究所
中国科学院原子能研究所



中国科学院原子能研究所

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00493

SIP-0045

MM-2 装置中 ECR 等离子体空间分辨的观测

段淑云 顾 彪 关维恕 程仕清

柳 蓉 陈康伟 尚振奎

(西南物理研究院,四川)

摘 要

介绍了用硬 X 射线的针孔成像法测量简单磁镜装置 MM-2 中 ECR 等离子体特性的方法及结果。这种非破坏性的成像法,直观显示了热电子等离子体的空间分布,一次放电即可成一帧清晰的像。大量实验照片给出了发射强度随放电参数的变化关系。

OBSERVATION OF SPATIAL RESOLUTION OF ECR PLASMA ON THE MM-2 MAGNETIC MIRROR

(In Chinese)

Duan Shuyun Gu Biao Guan Weishu Cheng Shiqing

Liu Rong Chen Kangwei Shang Zhenkui

(SOUTHWEST INSTITUTE OF PHYSICS, SICHUAN)

ABSTRACT

The measuring method and results of the ECR plasma properties taken from hard X-ray pinhole camera on the MM-2 magnetic mirror are presented. This non-destructive imaging method can directly display the spatial distribution of hot electron plasma. A frame of clear picture could be taken at one shot of discharge. The relationships between emission intensity and discharge parameters are also shown by experimental pictures.

前 言

测量磁约束等离子体中热电子的空间分布有如下几种方法:刮板探针法,可见光探测法,回旋辐射或X射线测量法等。刮板探针法通常用来得到热电子分布的平均半径和特征结构的粗略估计,然而由于它的特性,测量时会给等离子体带来扰动;而辐射测量不能给出空间结构;可见光较易于成像技术,然而这里包含有冷等离子体的信息;韧致辐射X射线或回旋辐射直接与热电子有关,但是由其得到的1个二维的像要比从可见光得到的要困难得多。

软X射的针孔照像法,在等离子体物理研究中最初是用于测量激光聚变等离子体的。随着CsI等光电器件及MCP像增强器的出现及计算机技术的广泛应用,X射线成像技术得到了广泛的发展。使用MCP及CCD电视摄像机等可构成高时空分辨的软X射线针孔相机以代替二极管阵列,在对等离子体的X射线进行非破坏性的、快速的时间分辨与空间分辨的测量上,X射线针孔成像法显示了无比的优越性。

1 实验安排

在简单磁镜场地形下,微波产生的热电子等离子体取一个环的形状^[1]。MM-2是一个简单的磁镜装置,其参数为典型的中心磁场 $B_0 = 0.295T$,轴上镜比为 $2.64:1$,磁缝距为60cm。用15GHz,30kW的微波进行ECRH实验,得到典型的等离子体参数为:

- 冷电子密度 $N_c = 10^{11}cm^{-3}$;
- 冷电子温度 $T_c = 10 \sim 50eV$;
- 热电子温度 $T_w = 140 \sim 170keV$;
- 热电子密度 $N_w = (1 \sim 5) \times 10^{10}cm^{-3}$

中平面处热电子环的半径 $R = 7cm$,径向厚度4cm,其轴向平均长度 $\sim 30cm$,热电子等离子体体积 $V = 5.28L$ 。

为了观测热电子等离子体的空间分布,使用了一个带有开口式MCP的增强器的针孔相机,实验安排如图1所示。其针孔相机系统包括①带有直径为0.8mm的小孔的铅制孔屏;②一系列用来选择通过不同能量的X射线的铜箔;③一个铅制的准直器;④带荧光屏的开口式MCP像增强器;⑤一个近焦距的照相机,使用国产20°全色胶卷记录。

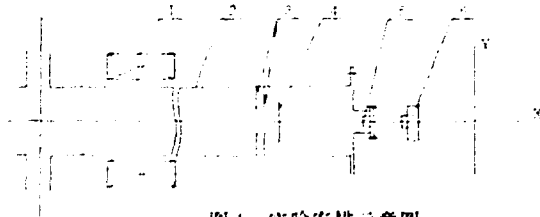


图1 实验安排示意图

- 1. 镜场线圈; 2. 真空室; 3. 准直器; 4. 孔屏及铜吸收箔; 5. 像增强器; 6. 照相机。

相机系统安装在装置的轴线上对电子环成像,MCP的有效直径为 $\phi 32mm$,真空室直径 $\phi 200mm$,故放大率 M 最大为 ~ 0.16 。考虑到荧光屏在真空室外便于观察、拍照和加高电压,

为此,铅孔屏是可移动的,以确保 M 在 0.16 左右变化。针孔前加不同厚的铝箔,以实现对不同能量的 X 射线成像。

来自热电子韧致辐射的硬 X 射线,其强度正比于 $\sim N_e N_p T_e^{-1/2} \cdot e^{-E/E_0}$,而荧光屏上的发光强度(亮度)与 X 射线强度成正比,因此从荧屏上的亮度(底片黑度)可以反映出热电子等离子体的 X 射线辐射的空间分布。

2 实验结果及讨论

大量的照片表明,在典型的放电条件下,确实观察到了一个环状的强发射区,见图 2、图 3 和图 4。

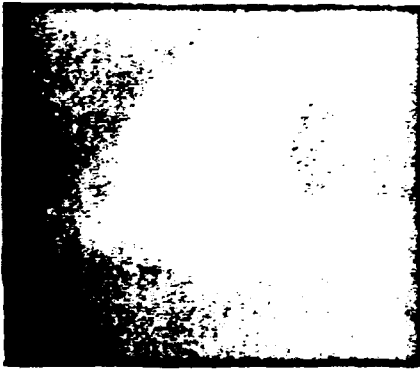


图 2 典型放电条件下的放射强度照片

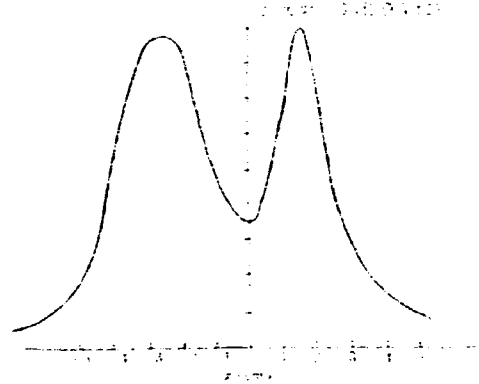


图 3 同一次放电底片上温度随半径的变化

由测量结果可知,最大发光尺寸随中心磁场强度 B_0 的增加而增加,这与二次谐波共振面的半径随 B_0 的增加而增加的理论预言是一致的,典型结果如图 5 所示,其直线 1 为文献 [2] 中使用刮板探针法测得的环半径 B_0 的变化,直线 2 和 3 均为成像法测量的结果,两者数量上的差异来源于:(1) 成像法系统测量误差;(2) 磁力线弯曲使得发光尺寸变小。对于前者,主要为所用元器件(如像增强器的光谱响应,乳胶的感光特性等)的非线性带来较大的误差;对于后者,在简单磁镜场中,磁场强度沿轴向分布是在中心平面处($z=0$)最小,二次共振面尺寸最大,当 $z \neq 0$ 时,谐振面尺寸变小。在文献 [2] 的测量中,钨靶置于中平面上,测得的电子环尺寸为中平面处的值,而成像法是对整个热电子所占区域成像,是一个沿 z 轴的积分结果,如果认为环对中平面对称的,那么累计发射最强区域的半径呈现出小于中平面处谐振面的半径的性质。

为了研究电子环的特性及放电参数对电子环的影响,我们在不同的放电条件下对热电子等离子体的发射特性进行了测量。从图 6~9 中可见,当微波功率变小或脉冲时间变短时,加热不充分,发光区域为半环, β 值也小;当 β 值大时,为整环;当微波时间长时,发光区域为一个实芯的亮团,说明芯部也被加热了,芯部的发射也变得强烈了,而当只有微波功率 P_0 没有磁场 B_0 或只有 B_0 而没有 P_0 时,荧光屏上见不到光亮,照片也无感光。

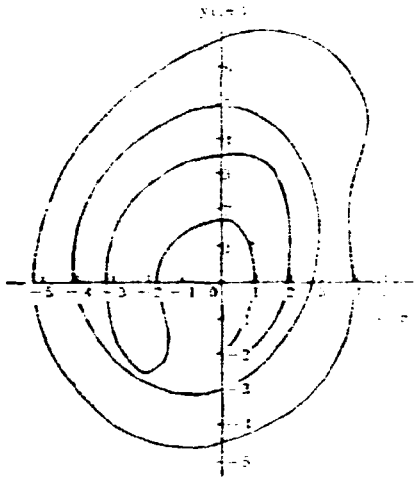


图4 同一微波脉冲二维等发射等强度曲线

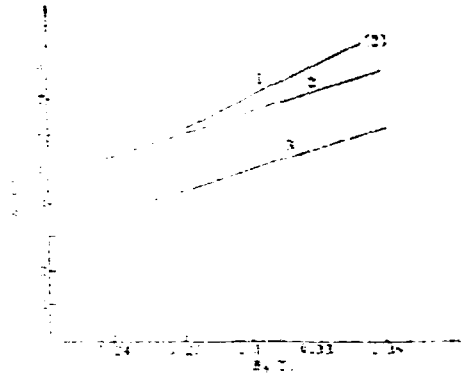
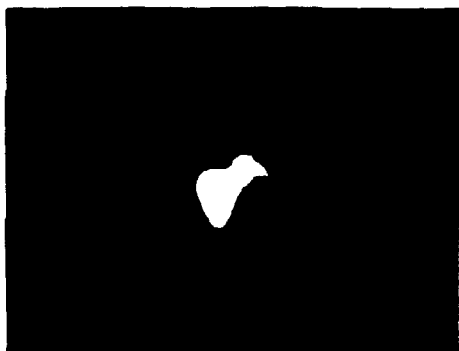


图5 最大发光尺寸随中心磁场 B_0 的关系

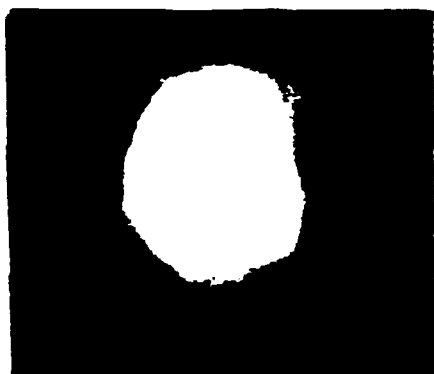
图6~9为不同 β 值辐射图像,可见当 $\beta=2\%$ 时,便可形成一个环,当 β 值足够大时芯部的发射也变得强烈了,说明芯部被热化了。图8为微波功率改变时的发射图,加大微波功率利于加热,这与文献[2]的结论是完全一致的。其中4号照片所对应的微波为分开的两个脉冲,所以形成两个半环,是典型的两次放电时的发射,其两个像没有重叠在一起,反映了它们空间位置不同,其原因归结为磁场及初始等离子体温度和密度的影响,MM-2的磁镜场为半周期近似等于400ms的正弦波,调程控系统使其在185ms处触发,以确保微波是在磁场平顶区注入,使放电期间磁场变化最小。磁场的变化将引起谐波共振面位置的变化,从而使得发射强烈区位置发生变化。另外,微波的吸收依赖于等离子体的温度和密度,然而稠密的等离子体对微波的吸收强烈,对后一个微波脉冲而言,前一个脉冲相当于电离作用,因而后面的微波脉冲更易于被吸收,辐射也就更强烈些。实验中观察到了这个现象,即远离中心区域先发光先熄灭,而靠近芯部的后发光后熄灭,形成两个不重叠的发射区。图9为微波脉冲宽度改变时发射图像的变化,提高微波注入功率和延长注入时间无疑都对加热有利,这与文献[2]中的测量结果完全相同。图7为刮板探针的位置对发射图像的影响。在文献[3]的测量中,详细讨论了用探针配合X射线强度及反磁 β 值测量电子环位置和尺寸的结果,并给出了热电子的运动图像,在本实验中又进一步得到了证明。微波是从装置上方($y=100\text{mm}$, $x=z=0$)垂直注入的,探针则在中平面上沿水平方向放置($z=0$, $r=0\sim 100\text{mm}$),可见探针伸入深度(用探针所在位置半径 x 表示)不同,对环的破坏程度也各异,其 β 值也不同。但在微波注入处被加热了的电子在反弹运动中,尽管有横越磁力线的漂移(其漂移频率约为 10^6Hz),但在未触到探针之前,仍以辐射的形式损失能量,故积累的效果可见到, $x=0$ (即探针伸入到装置中心处)时仍有半环的发射区,随着探针退出(x 增大),发光区域变大, β 值也增大,且形成一个完整的环,当 $x\geq 100\text{mm}$,使完全脱离了环。这与从前的测量结果完全相



$\beta = 1.6\%$



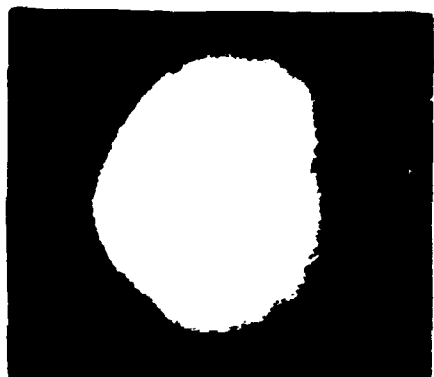
$x = 0, \beta = 1.6\%$



$\beta = 2.6\%$



$x = 5, \beta = 1.1\%$



$\beta = 3.9\%$

图6 不同 β 值时的辐射图像



$x = 10, \beta = 2.2\%$

图7 探测位置对发射图像的影响
x——探测所在位置,cm

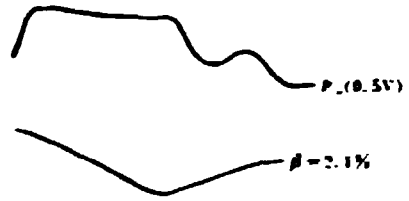
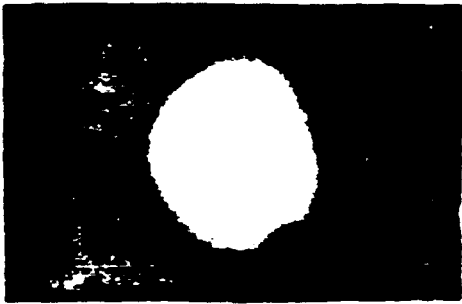
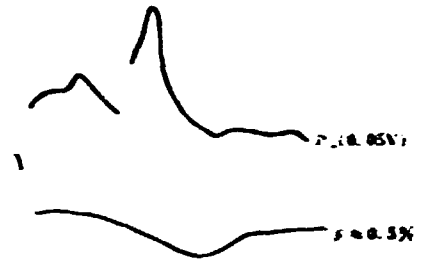
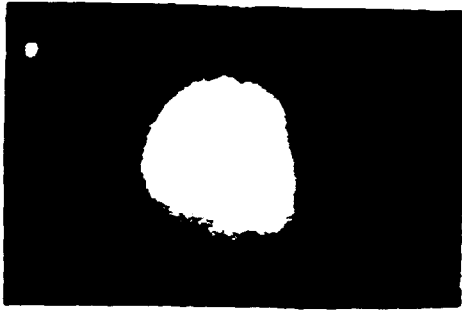


图 8 微波功率对放电的影响

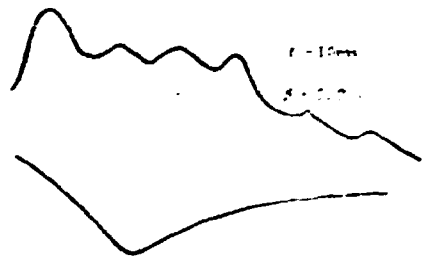
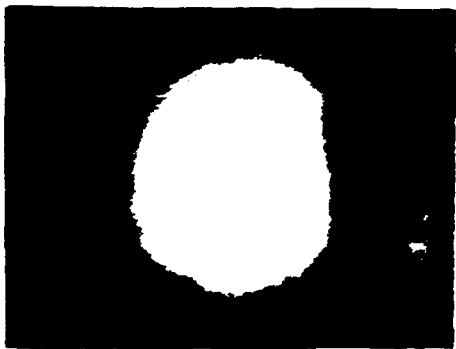
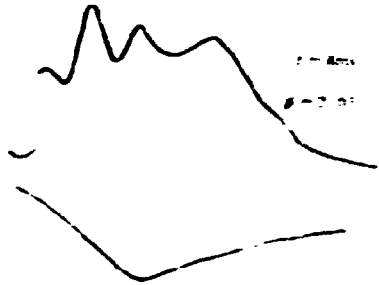
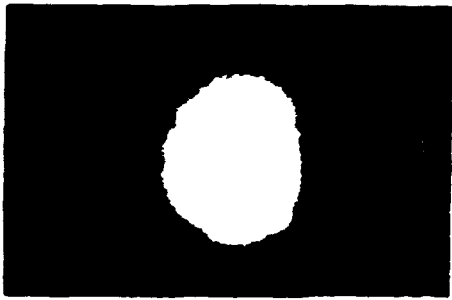
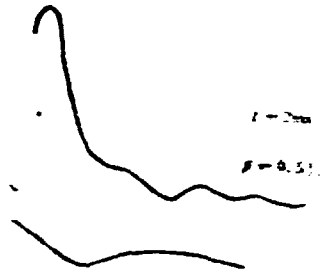
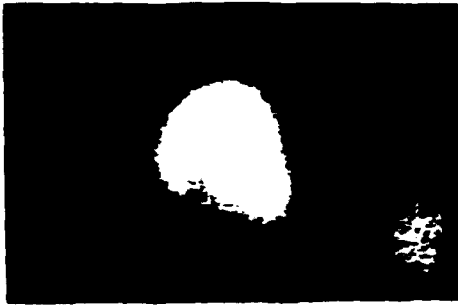


图9 不同波脉冲宽时的辐射图

同。

大量照片表明, X 射线发射强度并非轴对称的。主要表现为上下不对称, 轴线上方较下方为亮(强度大), 且发光区域(径向厚度)也大。可见加热程度并非对称, 而是上方加热要充分, 相对而言, 下方加热不足。

这种上下不对称性可能来源于微波功率密度的差异, 这与波在等离子体中的传播与吸收有关。在简单磁镜场中平面注入的波, 包括寻常波和非寻常波(即 O 波与 X 波), 这两种波以不同的方式在等离子体中传播, X 波在到达右旋截止层之前被多次反射, 不能达到基波共振区, 而在整个的二次谐波共振区, X 波都是可近的, O 波则几乎是在直线传播, 整个等离子体区都是可近的。在 MM-2 装置中, 微波从顶部垂直注入, 波在通过轴线上方共振层或经右旋截止层反射后才能抵达下部共振层, 甚至于要经过多次这种过程才能抵达下部。由上可见, 波在到达上部共振层和下部共振层时的能量密度是不同的, 无论是 O 波还是 X 波都如此。因此上和下部的能量沉积也就不同, 而且能量的吸收与等离子体的密度和温度有关, 等离子体温度和密度的增加会使局部的回旋共振吸收增加, 这样只能更加导致上下部分的差异。在文献[3]的测量中, 已谈及这种加热的不均匀性对冷等离子体离子密度的影响, 结论是一致的。其次, 等离子体对波的吸收问题的研究表明, 冷等离子体的密度和温度较低, 以至于 O 波在基波共振区及二次谐波共振区对冷等离子体的加热都是可以忽略的, X 波在二次谐波共振区对冷等离子体的加热也甚微。而 O 波及 X 波均能被电子环吸收, 差不多注入能量的 1/4 到 1/3 被环吸收, 最终形成了一个相对论电子环。热电子被加热后, 将趋于麦克斯韦化分布, 且与冷等离子体也有能量交换过程, 因而加热时间长了, 冷部发射亦变强, 这都是是一致的。

实验中观察到了随放电不同而致荧光屏多次发光的现象, 这主要在微波波形不是规则的方波时发生, 大多数情况是外部大环先亮先天且强度较弱, 而内部小环(有时为实芯小亮团)后亮后灭, 且发光强度也大。

3 结 论

- (1) 大量的结果表明, 环状的强发射区是存在的, 在典型的放电条件下可形成一个强环。
- (2) 关于环的性质的研究, 与从前的观测结果相互验证, 符合得很好。
- (3) 有待进一步开展具有时空分辩的测量, 针孔成像的结果是对空间和时间的累计结果。开展多路的时间空间分辩的测量, 以求对 ECR 等离子体的特性有更深入的了解。

参加本项工作的还有黄均成、刘锡荣、黎英、费四秀等, 对李可华同志的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Wang Enyan et al., Plasma Profile and Drift of Hot Electron Ring in the MM-2 Mirror, IAEA-CN-50/H-1-3, 12-19 Oct. 1984
- [2] 殷震云等, 使用磷化钼探测器对简单磁镜装置 MM-2 中热电子环特性的研究, 第六届全国等离子体物理学技术会议, 大连, 1982, 10
- [3] 吴维忠等, 电子回旋加热等离子体及电子特性的实验研究, 物理学报, 1989, 38(2): 224

MSI-2 装置中 ECR 等离子体空间分辨的观测

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16 印张 1·字数 4 千字

1991 年 1 月北京第 1 版·1991 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5022-0140-7

71·0227

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

ISBN 7-5022-0440-7

TL 027

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre