

CNIC-00850

SIP-0072

CN9500695

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

用 $H\alpha$ 光谱测量研究 MM-2 装置
中热电子等离子体性质

INVESTIGATION ON PROPERTIES
OF HOT ELECTRON PLASMA IN MM-2 MIRROR
BY $H\alpha$ SPECTRA MEASUREMENT

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre



徐前卫：核工业西南物理研究院助理研究员，1980年毕业于中国科技大学等离子体物理专业。

Xu Qianwei; Researcher of Southwestern Institute of Physics, CNNC. Graduated from University of Science and Technology of China in 1980, majoring in plasma physics.

CNIC-00850

SIP-0072

用 H α 光谱测量研究 MM-2 装置 中热电子等离子体性质

徐前卫 段淑云 程仕清

(核工业西南物理研究院, 四川)

摘 要

描述了简单磁镜装置 MM-2 中 ECRH 等离子体的 H α 面发光度的特性, 与朗缪尔探针、X 射线探测器、反磁探针等测量结果相结合, 给出了 MM-2 装置中 ECRH 等离子体的 H α 发射时间特性及预电离特性等重要参数。结果表明, 在热电子环建立之前, 预电离期间已有 H α 谱的发射, 而在热电子环破裂之后, 冷等离子体的衰减时间常数比热电子环的衰减时间常数大, 这与 X 射线方法测量的结果是一致的。

**INVESTIGATION ON PROPERTIES OF HOT
ELECTRON PLASMA IN MM-2 MIRROR
BY H_{α} SPECTRA MEASUREMENT**

(In Chinese)

Xu Qianwei Duan Shuyun Cheng Shiqing

(SOUTHWESTERN INSTITUTE OF PHYSICS, CNNC, SICHUAN)

ABSTRACT

The properties of H_{α} area-emission come from ECRH (electron cyclotron resonant heating) in the MM-2 simple mirror device is described by using measured H_{α} spectra. This method combined with the Langmuir probe, X-ray detector and diamagnetic probe etc, gives the properties of the pre-ionization and time feature of H_{α} emission of ECRH plasma. The results show that during pre-ionization the H_{α} has already emerged before hot electron ring is built and still presents after hot electron ring has broken away. The decay time constant is larger than that of hot electron ring. This is conformed with results measured by use of X-ray detector.

引 言

在磁镜位形中,用微波利用电子回旋共振加热(ECRH)来产生热电子等离子体,已进行了大量的实验研究^[1]。由于 ECRH 产生的热电子环的高 β 值及其产生的局部深的磁阱,只要位阱足够深,就能起到稳定等离子体的作用。而且这种轴对称的热电子环磁镜,装置可以容易构成稳定运行的皱折环位形,如 EBT、NBT 等。另外在串级磁镜的热垒概念中,热电子等离子体起着关键作用。串级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^[2]。目前,电子回旋共振加热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等方面都取得了可喜的结果。

为开展 ECRH 等离子体的实验研究,我们在一个简单磁镜中,用一频率为 15 GHz 的微波源建立并加热等离子体,理论与实验结果表明,热电子等离子体的产生与两个过程有关:微波首先在一次谐波共振面形成“温热”等离子体,然后在二次谐波共振面附近电子被有效加热形成相对论热电子环。环的厚度为几个拉莫尔半径量级,环长取决于装置的磁力线曲率和电子的平均速度 $V_{||}$ 与垂直速度 V_{\perp} 之比等因素。在我们的实验中,ECRH 等离子体的参数是通过反磁探针、硬 X 射线、静电探针及 H_{α} 等诊断技术测量的。

本文介绍了在开展 ECRH 热电子等离子体实验研究中,对热电子环和背景等离子体 H_{α} 谱的测量结果,揭示了热电子等离子体的基本特性及其物理图像。

1 实验装置与测量系统

MM-2 装置是一个用微波预电离并加热等离子体的简单磁镜装置,真空室长 310 cm,半径 10 cm,中心磁场 $B_0 = 0.295T$,镜比 $R = 2.64 : 1$ 。所用的微波频率 15 GHz,功率约 30 kW,持续时间约 10 ms。背景等离子体半径 4 cm,长度约 12 cm。

磁镜等离子体特性及热电子环对稳定性的影响是磁镜等离子体研究的重要课题。我们用单路光学测量系统,配合静电探针、反磁探针,初步观测了磁镜装置中的不同气压下 H_{α} 谱的辐射,比较了冷等离子体与热电子环同时存在时 H_{α} 的辐射情况,为进一步研究电子回旋共振加热下形成热电子环的参数奠定基础,并获得了有意义的结果。

实验装置与测量布置如图 1。正常工作状态下基波共振面 $\omega_p = \omega_{ce}$ 在距装置中心 16 cm 的等强线上,二次谐波共振面 $\omega_p = 2\omega_{ce}$ 位于装置中半面上半径约 7 cm 处, $\omega_p = \omega_{ce,cr}$ 为非寻常波截止层的位置。 ω_p 是微波频率, ω_{ce} 是局部电子回旋共振频率, $\omega_{ce,cr}$ 是截止频率。根据电子回旋共振加热理论^[2],微波注入首先在基波共振面附近击穿中性气体产生低温冷等离子体,然后在二次谐波共振面附近,电子被强烈加热形成一薄层高温(约 140~170 keV)电子环,环长约 30 cm。改变磁场强度和工作气压,可使系统处于不同的运行状态,呈现出不同的特性。

测量系统放置于装置中平面的径向水平窗口附近。它由透镜、光纤、单色仪、光电倍增管、信号放大器、记忆示波器组成。在对面的径向窗口装入一可移动静电探针配合实验。

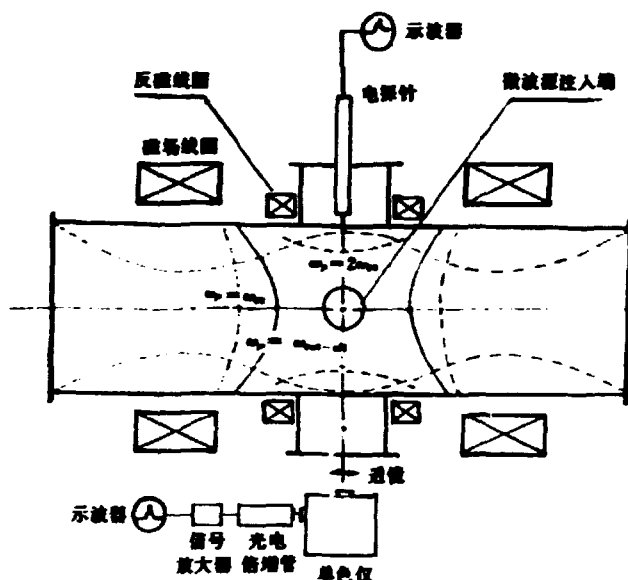


图1 实验装置和测量系统布置

2 实验原理

根据理论推导,已知等离子体中H_α面发光强度 $I \propto \int N_e N_0 Q dl$, 式中 N_e, N_0 分别代表电子密度和氢原子密度, Q 是碰撞激发系数,它只是 T_e 的函数。在我们的实验条件下 ($T_e = 10 \sim 30$ eV),它基本上不随温度变化而变化。如果认为沿观测方向上 N_e, N_0 是均匀分布的,且氢原子密度 N_0 正比于充气压强 P_0 , 于是就有关系:

$$I \propto Q N_e N_0 L \quad (1)$$

$$I/P \propto Q N_e L \quad (2)$$

$$\Delta I/I \propto \Delta N_e/N_e + \Delta N_0/N_0 \quad (3)$$

L —— 沿观测方向上等离子体尺度

这样,利用测得的 I 值,通过上述关系式可直接获得有关等离子体特性,如 H_α 发光时空分布,密度涨落 ($\Delta I/I$), 线电子密度变化等信息。

如果考虑等离子体具有轴对称分布,等离子体为光性薄的,它的辐射就是各向同性的。利用阿贝尔变换:

$$I(x) = 2 \int \frac{f(r) r dr}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \quad (4)$$

就可得到 H_α 面发光的时间、空间分布。

如果等离子体不是轴对称的,则可用 Fourier 反变换:

$$f(r, \theta) = \frac{1}{4\pi^2} \int r dr \int d\varphi \exp[ikr \cos(\varphi - \theta)] \int_{-\infty}^{\infty} I(x', \varphi) \exp(-ikx') dx' \quad (5)$$

$$\theta = \varphi - \cos^{-1}(r/r_0) \quad (6)$$

也可以求得同样的结果。

式中 $I(x', \varphi)$ 是在弦高为 x' , 角度为 φ 观察时所测的面发光度。

3 实验结果与讨论

图 2、图 3, 为一组不同气压下所获得的放电波形。

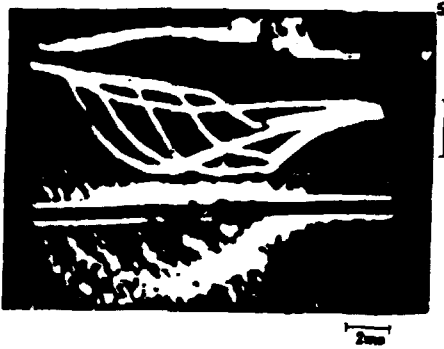


图 2 不同气压下的放电波形
(2 ms/div, 5 mv/div)

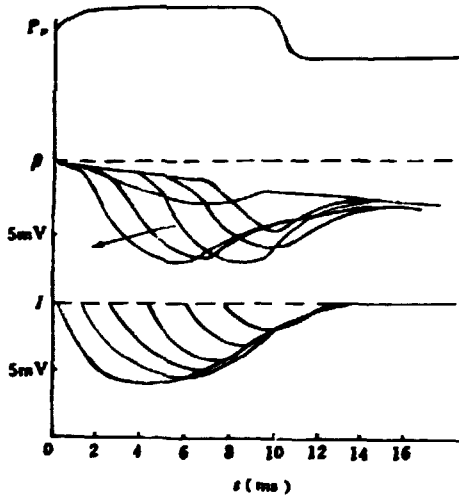


图 3 不同气压下典型的放电波形
图中箭头所指为气压增加方向

3.1 H_α 发光度 I 随时间变化特性

图 4 给出了当 $p_0 = 1.07 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 微波功率 $P_0 \approx 30 \text{ kW}$ 条件下的一组典型放电波形。

(1) 在 t_0 时刻, 微波功率注入开始。

(2) $t_0 \sim t_1$ 时刻内, 即 $\tau_1 \approx 0.5 \text{ ms}$, 反磁信号为零, $\beta = 0$ 。但是从 H_{α} 信号反映出 $I \neq 0$, 有信号出现。这一阶段时间为预电离阶段。表明热电子环尚未形成。但已有气体的电离与激发, 因而伴随有 H_{α} 的辐射, 为等离子体的建立过程。

(3) 在 $t_1 \sim t_2$ 时间内, 反磁信号开始出现并达到最大值, β 值达到最大值。这说明随着微波功率不断注入, 波在二次谐振面把冷电子迅速加热至高能并形成了热电子环。 H_{α} 信号也存在一个最大值。这是由于微波功率的注入及热电子环的加热作用, 使得芯部等离子体被激发、电离、加热变得强烈了, 因而 H_{α} 线发射强度也不断增强。

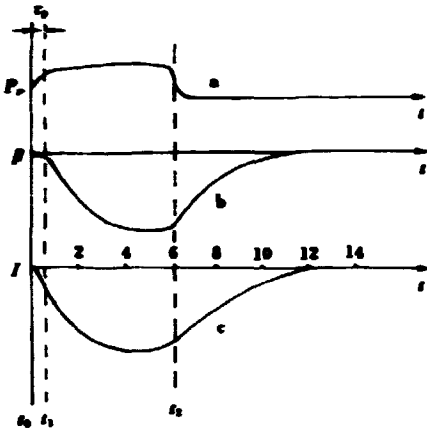


图4 H_α发光度随时间变化放电特性波形
a 微波; b 反磁信号; c H_α信号

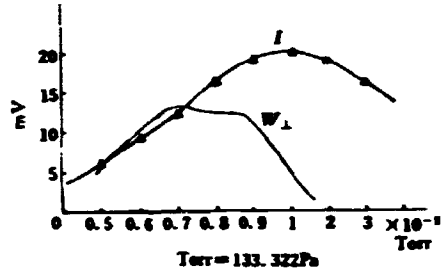


图5 H_α发光度 I 、反磁信号 W_{\perp} 随气压变化

(4)当微波功率注入关闭后,即 t_1 时刻,反磁信号较快衰减,持续时间约 8 ms,而 H_α 信号的衰减较为平缓过程,持续时间稍长。这说明热电子环破裂后,本底等离子体仍然受磁场的约束存在一定时间。

3.2 H_α 发光度 I 、反磁信号 W_{\perp} 随气压变化关系

从图 5 可以看出,随充气压的不同,放电有三种模式:

(1) $p < p_1 = 0.8 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 处于“压力窗”范围之外,微波注入使中性气体电离、激发产生初始冷等离子体,但由于 p 的限制,没有形成热电子环,因而,反应热电子环储能的反磁信号 β 值为零。由于初始冷等离子体的存在,电子的碰撞电离与激发过程的存在而伴随有 H_α 的辐射,处于此气压区间的等离子体是不稳定的。

(2) $p = (0.8 \sim 1.2) \times 10^{-3} \text{Pa}$, 为“压力窗”范围,此时形成一个稳定的高 β 值的热电子环,此时反磁 W_{\perp} 达到较高值并不随气压变化而变化。在这一压强区间等离子体是稳定的,为“T-模”运行。由于电子的作用也使得 H_α 辐射强度 I 不断增强。

(3) $p > p_2 = 1.2 \times 10^{-3} \text{Pa}$, “压力窗”之外高压区间,这时反磁 W_{\perp} 迅速下降,热电子环不能形成,类似于 EBT 中的“C-模”运行。当 $p = 1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时, H_α 信号强度 I 达到最大值,此后 H_α 将随气压增加而减小。

由此可见,反磁信号 W_{\perp} 在“压力窗”范围内基本上为一常数,即在我们的运行条件下 ($P_e \approx 30 \text{ kW}$), W_{\perp} 为一恒定值。而 I 则随气压的增加而增强 ($I \propto N_0 N_e Q L$), 这与理论预言是一致的。H_α 发射的物理机制为电子激发氢原子而产生的能级跃迁引起的光辐射正比于 N_0 与 N_e 之积,因此在 N_0 变化时, I 存在一个极大值。当 I 达到某一极大值后,气压继续增加时,在微波功率注入一定的条件下,则受放电条件的限制使得气体的电离与激发变弱, I 值也逐渐下降,这与热电子环等离子体无关。

3.3 预电离时间随气压的变化

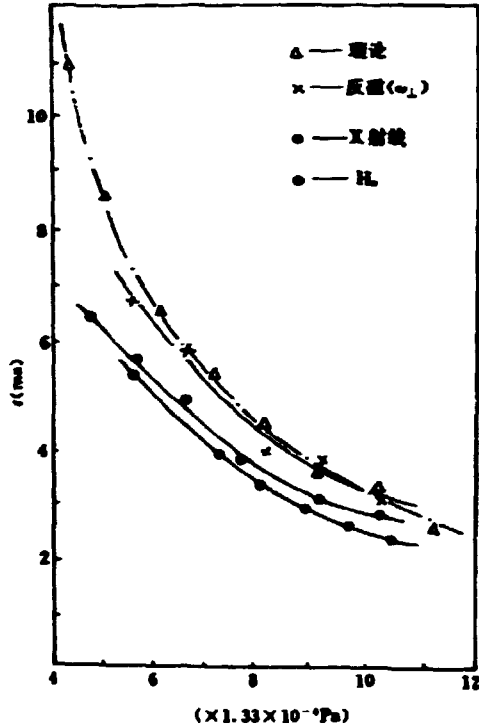


图6 预电离时间随气压的变化

由图3所得到的预电离时间($W_L \neq 0$ 的时刻)与H α 信号($I \neq 0$)的时刻同气压的关系如图6所示。可以看出I的出现较 W_L 的出现超前时间 Δt ,这是由于在热电子环形成之前已有气体的电离与激发,因而存在H α 信号,这与X射线测量结果十分相近。

4 结束语

综上所述,(1)反磁 W_L 的出现标志着热电子环的建立,而适于建立热电子环的“压力窗”为 $(0.8 \sim 1.2) \times 10^{-4} \text{ Pa}$;(2)建立ECRH等离子体必须经过一个预电离阶段。从微波注入至热电子环的建立为预电离时间,在预电离期间已有H α 谱的信号I出现,其结果(见图6)与理论值,反磁信号 W_L 测量及X射线方法测量结果完全一致。(3)使用H α 谱的测量技术,成功地研究了微波等离子体的预电离特性、等离子体的建立及随气压变化和衰减过程,获得了令人满意的结果。如果配以多路光纤及探测系统,则可获得有关等离子体的具有时间分辨能力的时空分布信息,且这种非破坏性的测量技术对等离子体诊断,尤其在Tokamak边缘等离子体诊断中是十分有用的。

感谢MM-2课题组全体工作人员的大力支持。

参考文献

- [1] 关雄起、王思聪、程仕清等. 物理学报. 1989. 38(2): 228
- [2] Buzcher D B. et al. Nucl. Fusion. 1980. 20(4): 403
- [3] 黄朝胜、任亮春、陈进贤等. 核聚变与等离子体物理. 1987. 7: 151
- [4] 项志通、余昌顺. 高温等离子体诊断技术. 上海科学技术出版社, 1982

(京)新登字 077 号

图书在版编目(CIP)数据

用 H_α 光谱测量研究 MM-2 装置中热电子等离子体性质 = INVE. ON PRO. OF HOTELEC. PLAS IN MM-2 MIRR. BY SPE. MEA: 汉英对照/徐前卫等著. —北京: 原子能出版社, 1994. 5

ISBN 7-5022-1215-9

I. 用… II. 徐… III. 磁镜-磁化电离子体-性质-研究
N. 0572. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 0059 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:李曼莉

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 8 千字

1994 年 6 月北京第一版·1994 年 6 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1215-9



9 787502 212155 >

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre