

CNJC-00817
STP-0068

CN9401700

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

离子灵敏探针及其在磁镜装置中的应用

AN ION SENSITIVE PROBE AND ITS
APPLICATION TO A MIRROR DEVICE

(In Chinese)



原子能出版社

中國核情報中心

China Nuclear Information Centre



段淑云：核工业西南物理研究院副研究员，1964年毕业于天津大学核电子学专业。

Duan Shuyun, Associate professor of Southwestern Institute of Physics, CNNC. Graduated from Tianjing University in 1964, majoring in nuclear electronics.

CNIC-00817

SIP-0068

离子灵敏探针及其在磁镜装置中的应用

段淑云 杨志刚

(核工业西南物理研究院, 成都)

摘 要

使用离子灵敏探针对 MM-2U 简单磁镜装置中等离子体的离子温度和电子温度进行了测量。描述了这种静电离子探针的工作原理及主要的设计参数。对从探针特性曲线得到的离子温度及密度也予以讨论

AN ION SENSITIVE PROBE AND ITS APPLICATION TO A MIRROR DEVICE

(In Chinese)

Duan Shuyun Yang Zhigang

(SOUTHWESTERN INSTITUTE OF PHYSICS, CHENGDU)

ABSTRACT

The basic principle and design parameters of an ion sensitive probe are introduced. The ion and electron temperature in a mirror is successfully measured by this probe. Discussions about the curves of ion temperature and density measured by the probe are also presented.

前言

静电探针(亦称朗缪尔探针)是等离子体诊断中最常用的工具之一。尽管其理论相当复杂,但在简化条件下,仍可从置于等离子体中的探针的伏-安特性曲线来获得电子的温度、密度和空间电位等重要参数并具有一定的空间分辨能力,而且结构简单、使用方便,因此不失为一个十分有用的诊断手段。但由于鞘电势的作用,朗缪尔探针测量离子温度成为不可能。尤其存在强磁场条件下,使得探针的特性曲线产生严重的畸变。通常测量粒子能量的最简单的方法是采用带有推迟栅的静电分析器,但是存在栅网所产生的二次电子发射的干扰的主要缺点。

本文所描述的离子灵敏探针正是利用了磁化等离子体的特性,即离子的拉摩半径远远大于电子的拉摩半径($\rho_i \gg \rho_e$),可以把电子对探针电流的影响减到最小。这种探针主要是由一个内部的离子收集电极和一个被称为保护电极的外部圆柱形电极构成,如果探针垂直于磁场方向放置,且离子收集电极较保护电极缩回一个长度 h 并满足 $\rho_i > h \gg \rho_e$,则在理想情况下,只有离子会被收集到内电极上。Katsumata及其同事们研制的基于这种工作原理的探针,在密度为 $10^{16} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 和磁场为 $0.1 \sim 0.4 \text{ T}$ 的Q装置和其他等离子体实验装置上测量了 $0.5 \sim 10 \text{ eV}$ 的离子温度^[1],R. P. Dasilva等人用这种探针测量了TBR-1小托卡马克装置鞘层的离子温度为 $23 \pm 4 \text{ eV}^{1/2}$ 。

1 离子灵敏探针

在ICRH等离子体参数的测量中,离子能量及其分布的测量是十分重要的。这不仅在研究ICRH的加热效率,而且还在波的传播、吸收及等离子体的平衡与稳定的研究中,都是一个至关重要的参数。如前所述,静电Langmuir探针不失为测量等离子体电子温度和密度的一个十分有用的工具,但是用插入等离子体中的简单的Langmuir探针来测量离子温度是不适用的。

Katsumata和Okagaki等人研制的离子灵敏探针为磁化等离子体的一种诊断工具,通过施加于探针上的相对于等离子体正电位为负的偏压,把电子分开而单独地收集离子,并不需要任何的网状栅极。与静电Langmuir探针类似,从离子灵敏探针的伏-安特性曲线可以得到离子温度(T_i)、电子温度(T_e)、离子密度(n_i)及等离子体电位(V_p)等信息。

这种探针的基本原理是在磁化等离子体中,离子的拉摩半径远远大于电子的拉摩半径($\rho_i \gg \rho_e$),因而电子与离子在磁场中的运动模式是根本不同的,当考虑到空间电荷效应亦即鞘层存在时,电子的运动可以看成是沿着磁力线的回旋运动与在鞘层中沿等位面的 $E \times B$ 的漂移运动的合运动。离子由于其大得多的拉摩半径,则在探针附近相对磁场而言可认为是自由的。这可以用作用于带电粒子上的洛伦兹力来加以说明: $F = e(E + v \times B)$,其鞘层内的电场 E 与探针偏压 \bar{V} 及鞘层厚度(通常用德拜长度 λ_D 来衡量)的关系为 $E = \frac{\bar{V}}{\lambda_D}$,经换算后得 $F = \frac{e\bar{V}}{\lambda_D} \left(1 + \frac{2\lambda_D}{\rho_i} \right)$,式中 e 为带电粒子电荷; \bar{V} 为探针偏压; ρ_i 为粒子的拉摩半径。对离子而言, $\lambda_D/\rho_i \ll 1$,而对电子则 λ_D/ρ_e 的范围则很宽,可以接近于0直至大于1,因此在鞘层中电子的行为则依赖于 λ_D/ρ_e 的值。

探针是由一个平顶的内部离子收集电极 c 和一个圆柱形的外部屏蔽电极 G (亦称保护电极) 构成。如果收集极较保护电极缩回一个长度 h , 且满足

$$\rho_0 \gg h \gg \rho_0$$

则电子将只被外部保护电极收集, 离子只会被内电极收集, 如果考虑到空间电荷效应, 亦即鞘层存在时则应满足

$$h \gg \lambda_D$$

探针的工作原理及详细结构如图 1 所示。

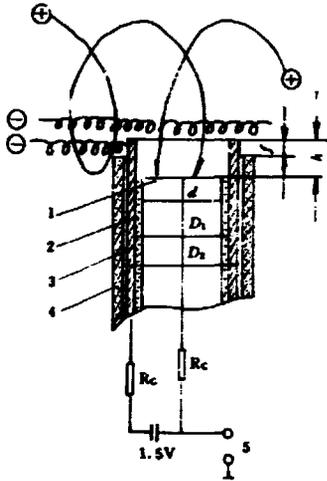


图 1 离子灵敏探针工作原理及结构示意图

- 1—内部离子收集电极 (C);
- 2—石英玻璃管;
- 3—外部保护电极 (G);
- 4—陶瓷管;
- 5—偏压电源 (扫描电压为 $\pm 95V$).

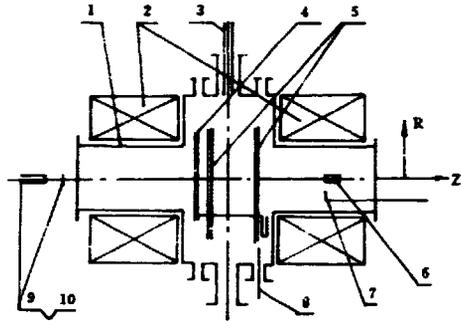


图 2 装置示意图

- 1—真空室;
- 2—射频线圈;
- 3—15GHz 微波注入波导;
- 4—4.8MHz 的 RF 天线;
- 5—光栏;
- 6—多谱能量分析器;
- 7—轴向可移动 ISP;
- 8—径向 Langmuir 探针;
- 9、10—测量 H 用的透镜及光阑径向。

假如平行于探针轴向上离子的能量分布满足 Maxwell 分布, 则探针上的离子电流将按 $I = I_0 \exp(-eV/kT_i)$ 规律变化, 式中 I_0 为饱和离子流, V 为探针偏压, I 为探针电流。因此从探针内电极 C 上的伏-安特性曲线的半对数斜率可以得到离子温度 T_i , 而从保护电极 G 的伏-安特性曲线可得到电子温度 T_e , 从饱和离子流 $I_0 = \frac{1}{4} n_i e \bar{v}_i S_{eff}$ 可得到离子密度 n_i , 式中 \bar{v}_i 为离子的平均热速度, $\bar{v}_i = (8kT_i/M_i)^{1/2}$, S_{eff} 为探针的有效面积。

在探针的设计中, 有几点是必须注意的:

a. 外面的保护电极 G 不能被任何绝缘子取代, 且电极 C 与电极 G 必须施加一个相同的偏压。为了产生一个利于离子向 C 电极运动的静电场位形, 在电极 C 与电极 G 之间可加一个 $0.1 \sim 1.5V$ 的直流电位, 即可抑制流入到 C 电极上的电子又不至于产生 $\vec{E} \times \vec{B}$ 旋转。

- b. 选用具有比外电极 G 更高功函数的材料作内电极。
- c. 内电极 C 较外电极 G 轴回的长度 h 有一个极限 h_c , 只有 $h > h_c$ 时, 流向 C 电极的电子流才能被禁止, h_c 取决于探针的几何尺寸 D_1 , 鞘层厚度 S_0 , 电子平均拉摩半径等, 为了方便通常取 $S_0 = 10\lambda_D$, h_c 经验值为

$$\alpha \rho_m \leq h_c \leq \beta \rho_m + \gamma \lambda_D$$

式中 α, β, γ 为系数, 通常取 $\alpha = \beta = \gamma = 10$ 。

d. f 值太大, 对等离子体扰动大, 不一定合适, 单从外电极 G 的特性曲线测电子温度来考虑, 则 $f = 0$ 或很小的负值足矣。

据 MM-2 装置中 ECRH 的实验结果^[1], $\rho_m = (1 \sim 4) \times 10^{-2} \text{mm}$, 因此我们使用的 ISP 的设计参数为:

$$d = 0.8 \text{mm}, D_1 = 1.2 \text{mm}, D_2 = 1.6 \text{mm}, h = 0.6 \text{mm}, f = 1.0 \text{mm}$$

取内电极为一个 $\phi 0.8 \text{mm}$ 的平顶钨丝, 保护电极为一根不锈钢管, 绝缘子分别为石英玻璃及陶瓷管, 探针的取样电阻分别为 $R_s = 1 \text{k}\Omega$, $R_c = 25 \Omega$, 经差分放大器放大后, 分别送入 XJ1084 数据采集器记录及 5113 记忆示波器观测拍照。

2 实验安排

高频波加热等离子体是目前受控核聚变研究中提高离子温度的主要手段之一, 借助于 $\omega = \omega_c$ 的离子回旋(慢)波, 或者由在 $\omega = 2\omega_c$ 附近的磁声(快)波, 可以对单离子等离子体进行离子回旋共振加热, 其中 ω 为所加高频波的角频率, ω_c 为离子的回旋频率, 近些年来在托卡马克装置上进行了大量的 ICRH 加热实验, 在磁镜装置中, 离子回旋射频波电场可以用来加热、稳定和控制等离子体, 射频场被用来约束等离子体中的离子及实现 RF 堵漏, 实验表明, 离子温度 T_i 、电子温度 T_e 、离子密度 n_i 及等离子体的 β 值均随 RF 功率的增加而增加, 在 RF 频率接近离子回旋频率时, 甚至在 RF 频率明显地大于离子回旋频率时 ($\omega = 1.3 \sim 1.6\omega_c$), 有质动力的稳定作用都是有效的。

为了提高磁镜等离子体参数, 研究 RF 场加热等离子体的效果, 继在简单磁镜装置 MM-2 中的 ECRH 等离子体实验之后, 又在简单磁镜装置 MM-2U 中开展了 ICRH 的实验研究, 安装示意图如图 2 所示。

MM-2U 为一个简单磁镜装置, 中心磁场强度 $B_0 = 0.37 \text{T}$, 轴上镜比为 $R_m = 2.1$, 磁峰距为 $L = 70 \text{cm}$, 真空室直径为 $\phi 650 \text{mm}$, 用一抽速为 1500L/s 的涡轮分子泵可望获得约 $1.3 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 的本底真空度, 一个频率为 15GHz , 功率为 30kW 的微波源, 在满足电子回旋共振的磁场及气压条件下, 在装置上方中平面处 ($Z = 0$) 垂直于装置轴向 (Z 轴) 注入, 用来产生 ECR 本底等离子体, 一个频率为 4.81MHz , 功率为 20kW 的射频功率源, 通过位于 $Z = \pm 18 \text{cm}$ 处的一对半匝天线耦合到真空室中, 对其中的离子实现 ICRH 实验, 位于 $Z = \pm 15 \text{cm}$ 处的一对光栏用于防止等离子体与天线的直接接触, 各种诊断工具亦如图示, 轴向 ISP 是一个径向位置 $R = 4 \text{cm}$ 的轴向可移动探针, 径向 ISP 是一个位于中平面上 ($Z = 0$) 径向位置 $R = 8 \text{cm}$ 的水平放置的固定探针。

3 实验结果

实验中, 我们使用一个三角波扫描电压作为 ISP 的偏压电源, 电源扫描电压范围为 \pm

95V，周期为 2ms，这样可以使得我们在一次放电中（约 10ms）同时观测 RF 功率注入前后的离子温度变化，大大缩短了测试时间，同时又减少了由于放电的高散性带来的误差。

图 3 示出了一次放电时典型的 ISP 波形，其中 a 为探针偏压波形，扫描电压为 -95V ~ -85V，周期为 2ms；b 为内电极 C 上的离子电流波形；c 为外电极 G 上的电子电流波形， $t=0$ 为测量电路扫描起始时刻； t_1 为 15 GHz ECRH 微波注入时刻； t_2 为 4.81MHz 的 RF 波注入时刻。

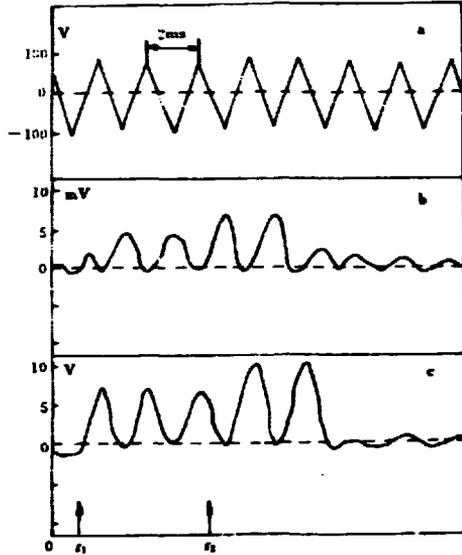


图 3 一次放电的典型 ISP 波形

a——探针偏压电源扫描波形；b——内电极上离子电流波形；c——外电极上电子电流波形。
 $t=0$ 相当于测量电路扫描开始； t_1 为 15 GHz 微波注入开始； t_2 为射频 4.8 MHz 波注入开始。

由于内外电极施加同一个扫描电压，因此通过时间标定可将图 3 中的 b、c 波形分别转换成 ISP 的离子及电子的 $I-V$ 曲线，对其电流取对数，从半对数曲线上可分别计算出离子及电子的温度，而从饱和离子流可推算出离子密度。图 4 为 ISP 的伏-安特性曲线的半对数曲线，其中 a 为内电极的离子电流的 $\ln I-V$ 曲线；b 为外电极的电子电流的 $\ln I-V$ 曲线。数据处理时均取其扫描电压下降的半周期。

多组实验测量结果为：

	RF 功率注入前	RF 功率注入后
T_i (eV)	2~4	6~10
T_e (eV)	10~30	20~40

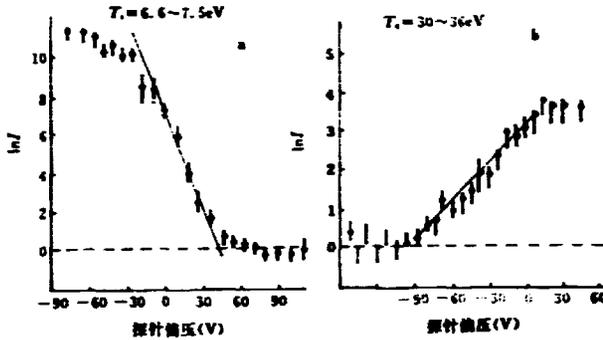


图4 一次放电的 ISP 的伏-安特性曲线的半对数曲线

a——内电极 C 上离子电流的 $\ln I-V$ 曲线；b——外电极 G 上电子电流的 $\ln I-V$ 曲线。

大量的实验数据表明，RF 功率注入前的离子温度和电子温度均低于 RF 功率注入后的相应值。尽管放电存在离散性，但是因为一次放电可同时获得 RF 功率注入前后的几条 $I-V$ 曲线，因此足以证明离子温度及电子温度均有提高，说明了离子及电子均得到了加热。实验中也观测到，在 RF 功率注入前，离子温度较低，而当 RF 功率注入后，随着 RF 功率的积累，离子温度有逐渐升高的趋势，但因微波时间较短，因此没有进一步地测量。

离子与电子温度的升高及波形图上见到离子及电子饱和电流的增加，说明 RF 功率被吸收，电磁波能转化为等离子体中粒子的热能。

在中心磁场 B_0 、本底真空度 P 及 RF 功率不变的情况下，移动轴向可移动 ISP。在 $R = 4$ cm 时测得离子温度及电子温度沿轴向的变化，从结果可看出，离子温度除了在 $Z = 14 \sim 22$ cm 区间有较大变化外，其离散度不是很大的，这可暗示离子温度沿轴向是均匀的，而在 $Z = 14 \sim 22$ cm 处的离子温度出现较大的偏差可认为是在天线附近 ($Z = 18$ cm) 强的 RF 场的影响所致。电子温度分布则表现在芯部 ($Z = 0$ 附近) 较低，而在 $Z = 22$ cm 处稍高，此处相当于 ECR 等离子体的基波共振处，其电子被加热至“温热”所致，这属于 ECR 等离子体的性质，与在 MM-2 装置中的实验结果相符，结果如图 5 所示。

波理论研究表明，当 $\omega \ll \omega_c$ 时，波将被回旋阻尼，波能将转化为等离子体热运动的能量而加热等离子体中的离子，这便是离子回旋共振加热。在我们的实验中，RF 电源的频率 $f = 4.81$ MHz 是固定的，因此只能用改变磁场亦即改变 ω_c 的办法来检验是否满足离子回旋共振加热条件。测量 T_e 随中心磁场强度 B_0 的变化关系，结果表明在 $B_0 = 0.28 \sim 0.32$ T 的范围内， T_e 基本上不变，可见在功率相同条件下，离子回旋共振加热的效果基本上是相同的，结果如图 6 所示。

离子饱和电流 $J_0 = \frac{1}{4} n_i \bar{v}_i S_{in}$ ，因此可从 J_0 估算出离子密度 n_i ，式中 $\bar{v}_i = (8kT_i/M_i)^{1/2}$ ，为平均离热速度； $S_{in} = S_p \cdot \epsilon$ ，为探针的有效收集面积； $S_p = \pi(D_{1/2})^2$ ，为探针入口面积； ϵ 为系数， $\epsilon = \frac{(\pi/4)(D_{1/2} + d/2)^2}{2\pi(D_{1/2})h + \pi(D_{1/2})^2}$ (各值见图 1)，我们在 MM-2U 中使用的 ISP，其 $S_{in} = 0.26$ mm²，估算出 $n_i = (1.5 \sim 5.1) \times 10^{11}$ cm⁻³。

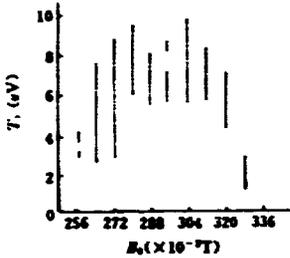


图5 T_1 与 T_2 沿轴向变化

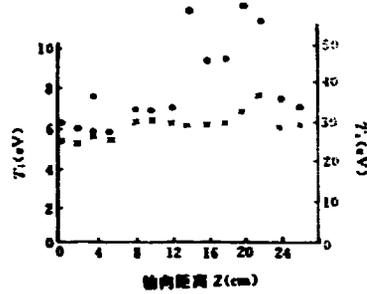


图6 T_1 随中心磁场强度 B_0 的变化

4 结束语

离子灵敏探针虽然在简单磁镜装置中用于离子温度及电子温度的测量初步获得了成功,但仍有许多不尽如人意之处:首先,相对于离子收集而言,存在一个几何因素引起的偏差,低能离子即 ρ_0 较小的离子不能被收集,因此在低能区, $\ln I-V$ 曲线存在畸变;而那些平行于磁场速度 v_{\parallel} 与垂直于磁场速度 v_{\perp} 之比 (v_{\parallel}/v_{\perp}) 大的离子,它们打在屏蔽板上较之打在收集板上更容易些,使得探针的 $I-V$ 曲线发生畸变,因此在计算 T_1 时,应取高能区数据。其次,另一个重要的系统误差是回旋中心远离收集板的高能离子较低能离子更容易被收集,等离子体密度和空间电位在一个离子回旋半径内的可观变化,将增加分布函数测量的复杂性,因此所取数据应在高场区,使得回旋半径范围内密度和电位的变化最小。另外探针对电子的甄别能力没有测试,应该设计一个 h 值可调的 ISP,以便找着一个最佳的 h 值,使得在偏压一定的情况下,收集的离子电流最大。由于我们只安装了一种 h 值的 ISP,实验中发现收集了过多的电子,通过改变扫描电压的直流偏压来加以改善,收集电子的机制还有待进一步探究,可以通过增加负偏压及调整 h 值来改善。

总之,可以通过选择探针的参数,用 ISP 来测量磁化等离子体的密度与温度。这种探针既简单又能提供对离子温度和密度的直接的局部测量,因此在等离子体参数的测量中是很有用的。

参加本职工作的还有程仕清、陈学盟、潘清、关维恕等同志。

参 考 文 献

- [1] Katsumata I., Okazaki M. Ion Sensitive Probe—A New Diagnostic Method for Plasma in Magnetic Fields. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1967(6), 123
- [2] Dasilva R P. et al. Electrostatic Ion Probe for Tokamak Plasma-Edge Diagnostic. *Rev. Sci. Instrum.*, 1984-57(9), 2205
- [3] 关维恕等, 电子回旋加热等离子体及电子环特性的实验研究. *物理学报*, 1989, 38(2), 228

(京)新登字 077 号



离子灵敏探针及其在环境监测中的应用

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷



开本 787 × 1092 1/16 · 印张 1/4 · 字数 11 千字

1994 年 3 月北京第一版 · 1994 年 3 月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-1086-5

TL · 560

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 7-5022-1086-5
TL • 669

China Nuclear Information Centre