

KT-5B 托卡马克装置上离子伯恩斯坦波 激发条件的实验研究

刘万东 闻一之 万树德 俞昌旋

中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230026

1989年3月28日收到

本文介绍了在 KT-5B 托卡马克装置上, 线性离子伯恩斯坦波的激发与边缘离子密度涨落、托卡马克放电参数以及发射天线位置之间关系的实验研究结果。实验表明, 边缘离子密度涨落过大, 将使离子伯恩斯坦波激发变得困难; 正常的托卡马克运行的放电参数范围与有效激发离子伯恩斯坦波的范围一致; 对纵环电流天线, 可能存在静电模转换激发和直接激发这两种离子伯恩斯坦波激发方式共存的情况。

PACC: 5235; 5240F

一、引言

近几年来, 在托卡马克装置上应用外激发离子伯恩斯坦波 (IBW) 加热等离子体的研究十分活跃。在 PLT, ALCATOR-C, JIPPT-IIU 等装置上的实验表明^[1-4]: IBW 加热具有效率高、整体离子加热、抑制低频涨落等一系列优点, 是一种有竞争力的辅助加热手段。目前的 IBW 实验都是在较大型装置上进行, 其主要目的是考察大功率 IBW 的加热效果, 同时由于较大型装置上缺乏高空间分辨的探测 IBW 的有效手段, 所以对 IBW 在托卡马克位形中的激发、传播、吸收等基本过程的实验研究甚少。为此, 利用了小型装置低温、低密度的特点, 采用高空间分辨的高频 (RF) 电探针作为 IBW 主要探测手段, 在 KT-5B 托卡马克装置上成功地进行了线性 IBW 的激发、传播、共振吸收等实验。文献[5]中报道了对 IBW 的论证和色散关系的测量, 以及利用 IBW 测量离子温度分布等实验结果。本文将给出在 KT-5B 托卡马克装置上, IBW 的激发与放电参数、等离子体状态之间的关系的实验结论。

二、实验装置与实验安排

KT-5B 是一小型托卡马克装置, 其主要参数: 大半径为 $R = 28.5\text{cm}(30\text{cm})$; 孔栏半径为 $a = 6.5\text{cm}(8\text{cm})$; 等离子体电流为 $I_p = 3-7\text{kA}(10-20\text{kA})$; 纵场强度为 $B_T = 0.3-0.6\text{T}$; 中心电子温度为 $T_{e0} \approx 70\text{eV}(100\text{eV})$; 线密度为 $\bar{n}_e \approx 0.7-1.0 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$;

等离子体电流时间为 $\tau_p = 1.0\text{ms}(2.0\text{ms})$ 。其中括号中数值是在不进行 IBW 实验时所达到的。

实验安排如图 1 所示。IBW 的发射天线为 Faraday 屏蔽的纵环电流天线, 其纵环方向弧长为 35cm, 宽为 5cm, 天线在水平方向可以移动, 两端由两限制器支承并处于限制器阴影中。

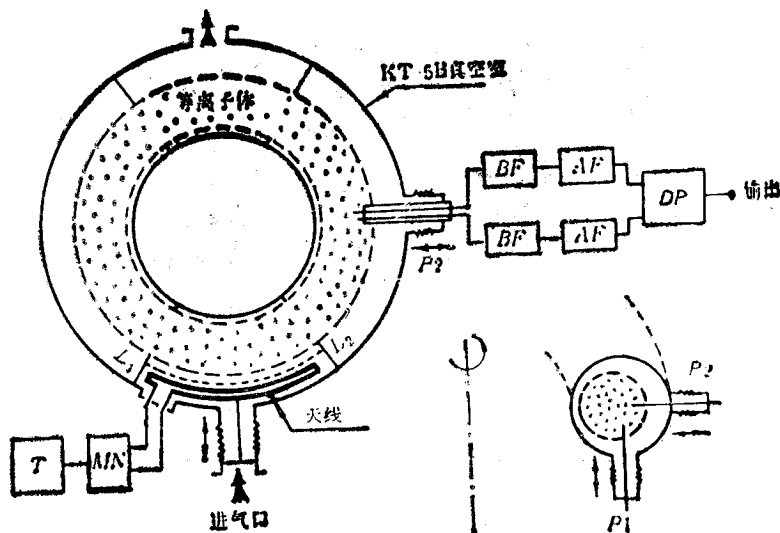


图 1 KT-5B 托卡马克装置上离子伯恩斯坦波实验安排

T 为功率波源; MN 为匹配网络; L_1, L_2 为限制器; P_1, P_2 为 RF 电探针; BF 为高通滤波器; AF 为放大器; DP 为比例鉴相器

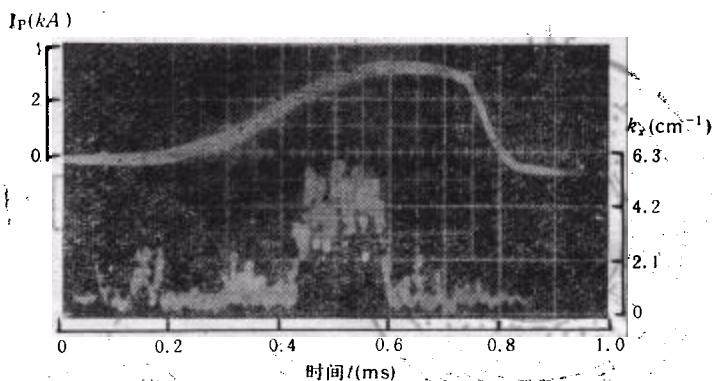
在大环方向与发射天线中心相距 90° 处, 有两个可移动的 RF 电探针用于探测 IBW。其一为水平放置的具有两端头的双探针, 两端头水平位置相距 5mm, 适合于探测垂直波数 $k_z \lesssim 2\pi\text{cm}^{-1}$ 的波。另一探针为垂直放置的单探针。两探针的移动精度可达 0.1mm, 最大移动间距为 10cm。波源的频率为 $\omega/2\pi = 6-10\text{MHz}$, 通过匹配网络, 耦合至发射天线的功率为 5—15W。实验时, 通常将 RF 电探针加上约 50V 的负偏压以收集离子流。探针离子流信号通过高通滤波器和放大器后, 送入比例鉴相器鉴相, 即可获得波数信号。整个探测系统对离子密度涨落的灵敏度为 $\hat{n}_i < 5 \times 10^8\text{cm}^{-3}$ 。

三、实验结果与讨论

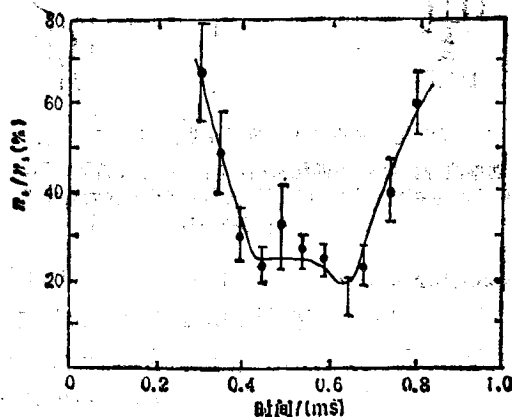
1. 离子密度涨落对 IBW 激发的影响

由于 IBW 的垂直波数(指垂直于磁场方向) k_z 较大, 可以从双探针的鉴相信号大小判断 IBW 是否被激发^[2]。可以发现, 并非在整个等离子体电流存在区间均能激发 IBW, 而是仅在等离子体电流波形相对平稳时, 才能激发 IBW。图 2(a) 为典型的鉴相器输出信号和等离子体电流的波形。由图 2(a) 可以看出, IBW 仅在时间为 0.4—0.6ms 的区间出现, 此时 k_z 较大, $\approx 5.88\text{cm}^{-1}$ 。进一步实验表明, 在等离子体电流起始和结束前后,

IBW 不能激发的主要原因是等离子体的离子密度涨落过大. 图 2(b) 给出在限制器边缘处 ($r = 6.5\text{cm}$) 离子密度涨落随时间的变化. 很明显, 在放电电流起始和结束时, 相对密度涨落远大于电流相对稳定值. 低密度涨落的时间与 IBW 激发时间有相当好的一致性.



(a) 典型的等离子体电流 I_p 和鉴相器输出信号波形



(b) 限制器边缘处 ($r = 6.5\text{cm}$) 相对离子密度涨落随时间变化

图 2

为了确证上面结论, 我们排除了其它因素的影响, 改变各种宏观放电参数和条件, 考察 IBW 的激发时间, 结果是在任何情况下, IBW 仅在相对密度涨落较小的电流缓变区域内才能出现.

Ono 曾考察过低频密度涨落对 IBW 激发和传播的影响, 受低频密度涨落散射的概率为^[6]

$$P_i \approx 5 \times 10^{-6} T_i^{-1/2} (\text{keV}) |a_i|^2 (\%) a (\text{cm}) B_0 (\text{T}),$$

式中 T_i 为离子温度, a_i 为相对离子密度涨落, a 为小半径, B_0 为磁场强度. 由此式可以看出, 在低温的小型装置上, 相对离子密度涨落过大, 对 IBW 的激发和传播会造成很大影响, 可以解释实验中观察到的现象.

2. 托卡马克放电参数对 IBW 激发的影响

IBW 有无穷多支, 在频率处于离子回旋频率的各次谐频之下各有一支. 我们所激发的 IBW 为

$$\omega_{ci} < \omega \leq 2\omega_{ci}$$

这一支. 实验上, ω 越远离 $2\omega_{ci}$, IBW 越难激发, 但 ω 十分接近 $2\omega_{ci}$ 时, 由于回旋阻尼严重, 也难激发出能有效传播的 IBW. 实际上, 在一定的放电条件下, 能够激发 IBW 的频率比 ω/ω_{ci} 有一定的范围, 称为激发区间. 定性地讲, 激发区间越宽, 表明等离子体状态越适合于激发 IBW. 所以, 可以用激发区间的大小定性判断 IBW 的最佳激发条件.

KT-5B 托卡马克放电参数中, 能直接控制的主要有等离子体电流 I_p 和中性气体压强 P . 图 3(a), (b) 分别给出激发区间和 I_p, P 的关系的实验结果. 由图 3 可以看出, 当等离子体电流过小 ($I_p < 1.5\text{kA}$) 或中性气体压强过大 ($P > 9 \times 10^{-5}\text{Torr}$) 时, 完全不能激发出 IBW; 当等离子体电流过大 ($I_p > 5\text{kA}$) 或中性气体压强过小 ($P < 2 \times 10^{-5}\text{Torr}$) 时, IBW 的激发区间也有明显的减小. 对这两种放电参数, 均存在一个有效激发 IBW 的范围 ($3\text{kA} < I_p < 4\text{kA}$, $3 \times 10^{-5}\text{Torr} < P < 6 \times 10^{-5}\text{Torr}$).

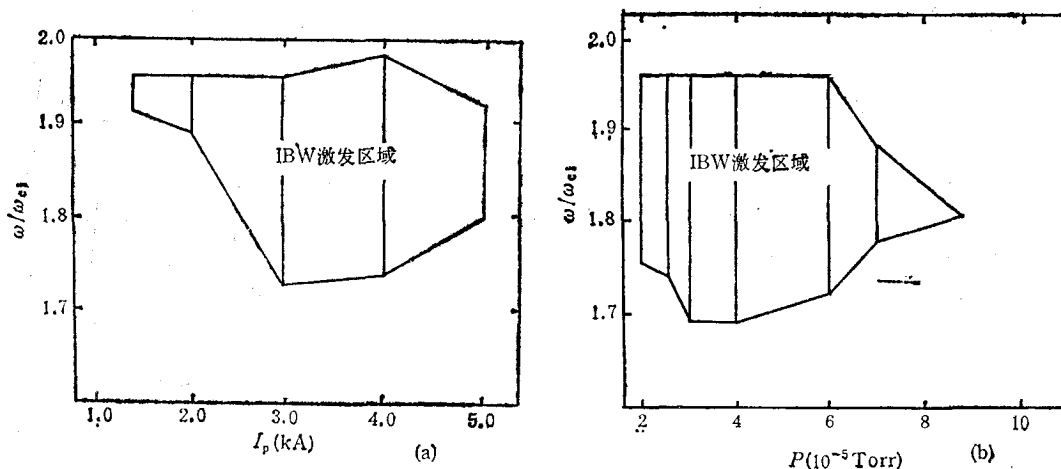


图3 IBW 激发区域与 (a) 等离子体电流 I_p , (b) 中性气体压强 P 之间的关系

注意到最佳激发 IBW 的放电参数范围正是 KT-5B 托卡马克装置进行正常放电的参数区间. 所以, 尽管放电参数对 IBW 的激发有影响, 但在追求最有效激发 IBW 与较好的托卡马克放电状态之间没有矛盾. 这一点对应用 IBW 高效加热托卡马克等离子体很重要.

3. 天线位置对 IBW 激发的影响

本实验中, 发射天线是可移动的, 其径向位置可以从 $r_s = 7\text{cm}$ 移至 11cm . 天线位置与 IBW 的激发关系较大. 图 4 给出 IBW 激发区间与天线位置 r_s 之间关系的实验

结果,当天线距离限制器边缘较近时 ($r_a < 7.5\text{cm}$),不能激发出 IBW;当天线与限制器边缘距离大于 2cm 时 ($r_a > 8.5\text{cm}$),能正常地激发出 IBW,其中在 $r_a = 9.5\text{cm}$ 时,激发区间最大。值得注意的是,在 $r_a = 10\text{cm}$ 时,IBW 激发区间锐减,而天线继续向外移动时,激发区间又逐渐变大。

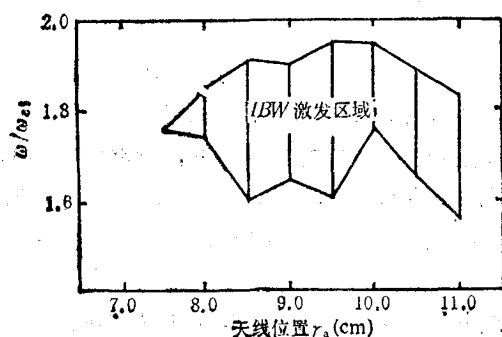


图4 IBW 激发区域与天线位置 r_a 之间的关系

发 IBW 的重要因素^[7],实测 KT-5B 托卡马克限制器阴影区域的离子密度随径向位置的变化呈指数下降形式,

$$n_i(r) = n_i(a) \exp[-(r-a)/L],$$

式中 $n_i(a) \approx 5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$, $a = 6.5\text{cm}$, $L = 0.78\text{cm}$.

对比边缘密度变化和 IBW 激发情况,可以得出,天线处密度过大,将影响 IBW 的正常激发。还注意到,激发区间出现锐减时的天线处密度约为 $6 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$,接近低杂共振层位置(低杂共振层处密度为 $3.7 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$)。这表明,可能存在两种激发模式,即直接激发^[7]和静电模转换激发^[8]。这两种激发方式以天线位置与低杂共振层位置关系而区分。当天线处于低杂共振层之外时,天线可以通过静电模转换方式激发 IBW。当天线接近低杂共振层时,静电模转换方式被禁止,只能存在直接激发的过程。在直接激发方式中,天线与等离子体之间的耦合在一定程度上随天线处密度增加而增强,故出现了共振层附近处 IBW 的激发区间有一突然减小的现象。

四、小 结

在托卡马克放电初期和结束前后,相对离子密度涨落较大,低频密度涨落对 IBW 的散射造成了 IBW 不能有效的激发。

对每一个托卡马克放电参数,均存在一个最佳激发 IBW 的范围。实验表明,正常的托卡马克运行参数,对 IBW 的激发有利。

IBW 发射天线在限制器阴影中的位置,与 IBW 的激发情况相关,同时也与 IBW 的激发模式相关。

感谢项志邈教授对本实验的关怀和支持。

[1] M. Ono et al., Phys. Rev. Lett., 54(1985), 2339.

[2] J. D. Moody, M. Porkolab et al., Phys. Rev. Lett., 60(1988), 298.

- [3] M. Ono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 60(1988), 234.
- [4] Y. Ogawa *et al.*, *Nucl. Fusion*, 27(1987), 1579.
- [5] Liu Wandong *et al.*, to be published in *Chinese Phys. Lett.*
- [6] M. Ono, *Phys. Fluids*, 25(1982), 990.
- [7] W. N. -C. Sy, T. Amano *et al.*, *Nucl. Fusion*, 25(1985), 795.
- [8] M. Ono, K. L. Wong *et al.*, PPPL-1819, (1981).

EXCITATION CONDITIONS OF ION BERNSTEIN WAVE IN KT-5B TOKAMAK

LIU WAN-DONG WEN YI-ZHI WAN SHU-DE YU CHANG-XUAN

*Department of Modern Physics, University of Science
and Technology of China, Hefei, 230026*

(Received 28 March 1989)

ABSTRACT

In this paper, the research results of the relations between the excitation stage of linear ion Bernstein wave (IBW) and the edge ion density fluctuation, the discharge parameters of tokamak and the antenna position in KT-5B tokamak are presented. The experiments show that large edge ion density fluctuation will make it difficult to excite IBW, the ranges of discharge parameters for optimally exciting IBW are consistent with those for normal operation of KT-5B tokamak. We find that for our toroidal current antenna, there may exist two ways of excitation, i.e. direct excitation and excitation through the electrostatic mode conversion process.

PACC: 5235; 5240F