

CT-6B 托卡马克微波预电离实验

中国科学院物理研究所—O—组¹⁾

中国科学院物理研究所—O—组²⁾

中国科学院电子学研究所四室³⁾

1986 年 3 月 18 日收到

提 要

用迴旋管产生的大功率微波在电子迴旋频率的基频及二次谐波频率进行了托卡马克放电的预电离实验。实验证明,这种预电离方法比一般的预电离方法的击穿气压低,击穿电压及放电初期所耗费的变压器磁通也低得多。基频共振较二次谐波共振的效果好。

一、引 言

对于托卡马克放电而言,选择适当的方法进行预电离是很重要的。这是因为、预电离方式对于放电初期的等离子体参数影响很大。而在放电初期,由于温度较低,欧姆加热变压器磁通耗费较多。在整个放电过程中的杂质主要也在放电初期引入。

较强的预电离不仅会节约磁通,减少杂质,而且会降低击穿气压因而降低等离子体密度。这对 CT-6B 装置所要进行的电子迴旋共振加热实验来说极为重要。这是因为,等离子体对波的吸收效率与等离子体参数有关^[1]。对于 CT-6B 装置及我们的微波源而言,吸收效率极大值处于低密度区域 ($n_e < 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$),用一般预电离方法难以达到。

电子迴旋频率的微波预电离已进行过一些理论和实验上的研究^[2-5]。

二、实 验 装 置

CT-6B 装置由 CT-6 装置^[6]改装而成,是一个无导电壳铁芯变压器托卡马克。主要参数为: 平均大半径 $R = 45 \text{cm}$; 真空室小半径 $b = 15 \text{cm}$; 孔栏半径 $a = 12.5 \text{cm}$; 变压器磁通 $\Delta\phi = 0.28 \text{Wb}$; 环向磁场 $B_t \leq 13 \text{kG}$ 。电子温度约为 200eV 。

在装置上采用电磁探针、闪烁探头、金硅面垒半导体探测器等分别测量环电压、等离子体电流、水平位移、硬 X 射线、软 X 射线等。一般采用装在真空室上方的超高真空计规管作预电离用。

整个实验安排如图 1 所示。微波源是中国科学院电子学研究所研制的 GY-18 型

1) 参加者: 姚鑫兹、罗耀全、栗达人、吴小文、刘轶群、崔滨生、杨思泽。

2) 参加者: 王龙、戚霞枝、杨宣宗、韩共和、沈立康。

3) 参加者: 张世昌、洪文洁、吴德顺、秦文珍、阮建华、何耀煌、苗咏环。

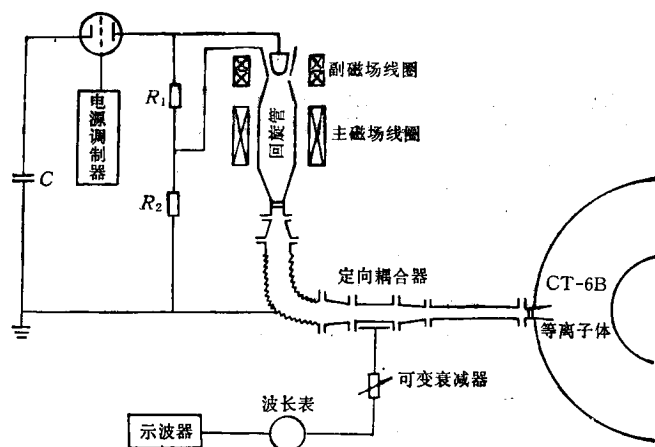


图 1

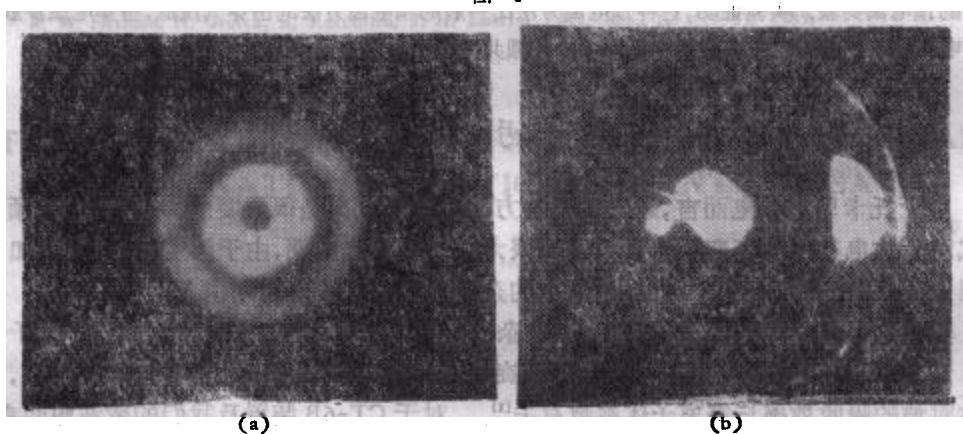


图 2 经过弯波导前 (a) 和后 (b) 的微波模式图

大功率二次电子回旋谐波回旋管。其工作频率为 36.5GHz, 束电压为 41—45kV, 磁场强度为 6.5kG, 电子注流强约 10A, 最大输出功率为 70kW, 最大脉冲宽度为 20ms。输出微波为 TE_{02} 圆偏振模。这一回旋管由中国科学院物理研究所研制的 MGD-1 型高压长脉冲电源提供束电压。MGD-1 型高压长脉冲电源性能为: 输出电压 $\leq 80\text{kV}$, 输出电流 $\leq 30\text{A}$, 脉冲宽度 $\leq 30\text{ms}$, 长脉冲顶部不平度 $\leq 1\%$ 。为了便于调整回旋管工作状态, 该电源还设有连续短脉冲工作方式, 其重复周期和脉冲宽度都可连续调节。长、短脉冲工作方式可以很方便地切换。

回旋管产生的微波由波导垂直向下输出, 在托卡马克真空室外侧水平方向输入。因此, 传输波导必须改变 90° 的传播方向。我们采用波纹软波导作为过渡来改变方向。

整个传输系统采用圆波导。微波自回旋管输出后, 经过 $\phi 22$ (单位为 mm, 下同) 至 $\phi 50$ 过渡波导, 弯成 90° 的 $\phi 50$ 波纹软波导, $\phi 50$ 至 $\phi 30$ 过渡波导, $\phi 30$ 的定向耦合器, $\phi 30$ 至 $\phi 22$ 过渡波导, $\phi 22$ 的直波导, 以及陶瓷窗口和喇叭天线, 进入真空室。整个传输系统全长约 6m。弯曲段曲率半径为 1—1.5m。

用水负载在波导最后一段测量微波输出功率。当回旋管的输出功率为 50kW 时, 波

导终端输出约为 35—40kW。更高的输出功率在波导内引起打火现象。在预电离实验中,注入真空室的微波功率 $\leq 30\text{kW}$ 。

把热敏纸贴在波导终端可以直接得到输出微波模式图,如图 2(b)所示。和用同一方法在回旋管输出端得到的模式图(图 2(a))比较,可以看到,经过弯波导传输后,微波模式发生了很大的变化。特别是图 2(a)所示的 TE_{02} 模式的外环蜕化成图 2(b)上靠近波导壁处的一点。这个强的电场峰值可能是在高功率时打火的主要原因。

大功率微波传输问题与波导的规格、形状有很大关系。曾先后采用 $\phi 22$ 的波纹软波导和曲率半径较小(约 50cm)的 $\phi 50$ 的波纹软波导作为改变传输方向的波导,都不能传输较大的功率。因此,高功率微波的传输问题非常重要。应予以重视。

三、实验结果

在进行微波预电离实验时,所用的微波脉冲宽度为 9ms,提前托卡马克放电约 4ms 注入微波。微波在真空室内与电子回旋运动共振的位置取决于所加环向场的值。改变环向场,就可以改变微波作为电子回旋运动的基频波或二次谐波在真空室内的共振面位置。与基频和二次谐波共振相应的磁场分别为 13kG 和 6.5kG。

在中心环向场 7kG,充气(氢气)气压为 $1 \times 10^{-4}\text{Torr}$ 的放电条件下,用微波预电离产生的等离子体电流 I_p ,环电压 V_L ,水平位移乘上等离子体电流 $\Delta x \cdot I_p$ (正值表示向内侧移动),积累的耗散磁通 $\Delta\phi$,软 X 射线信号 SX,硬 X 射线信号 HX 的典型示波图和用普通方法(电离规管)得到的结果相比较,表示于图 3。微波包络信号和 X 射线信号均为相对单位。

由图 3 可以看到,在用普通方法预电离时,击穿电压约为 20V,且于加电压后 0.7—0.8ms 时才能击穿。而微波预电离时,击穿电压明显降低,而且延迟时间很短,约几十微秒。因此,微波预电离节约了很多磁通。从图 3 看出,在放电初期可节约磁通 0.02—0.03 Vs。

击穿以后,用微波预电离时,等离子体温度增加较快,表现为等离子体较早向外移动。在这种情况下,硬 X 射线低,出现较迟,这是由于环电压降低等原因使得逃逸电子产额较低。两种情况的软 X 射线相差不大。这是因为微波预电离时虽然电子温度较高,但因杂质减少,使 Z_{eff} 值减小,对于软 X 射线来说两种作用抵消。

预电离方式也影响到平顶段等离子体行为。微波预电离所得到放电的环电压较低。

还研究了不同环向场,即不同共振位置时的微波预电离放电。击穿电压随中心环向场的关系如图 4 所示。图 4 中从 5kG 至 8.3kG 为二次谐波共振区域,9.2kG 以上为基频共振区域。在二次谐波共振区域,击穿电压降至 12—18V;在基频共振区域,则降至 9—12V。除去共振面很靠边缘情形外,击穿电压与共振面所在位置关系不大。但显然,基频区优于二次谐波区。另一值得注意的结果是,在以上两区以外的非共振区,特别是两共振区之间的区域,微波预电离也起作用,且击穿电压也有所降低。其原因是波场的直接作用还是在孔栏阴影区内共振的结果,尚有待于证明。

还在不同充气气压下进行了实验。微波预电离使最低击穿气压从 $5 \times 10^{-3}\text{Torr}$ 降至

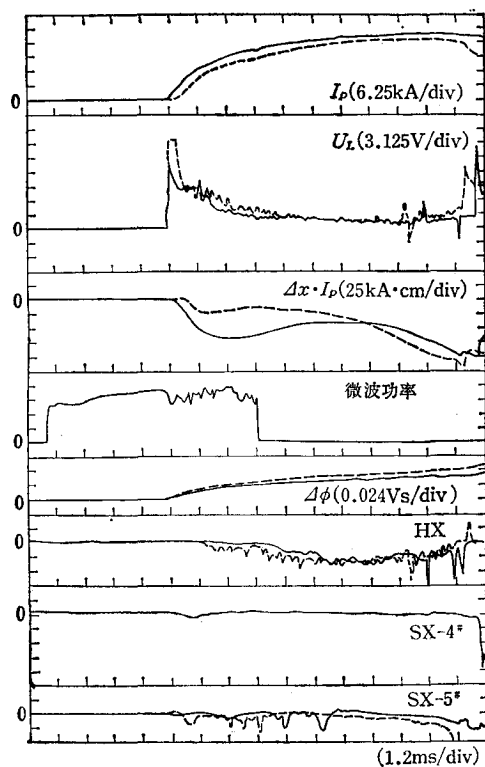


图3 微波预电离(实线)和普通预电离(虚线)得到的典型示波图

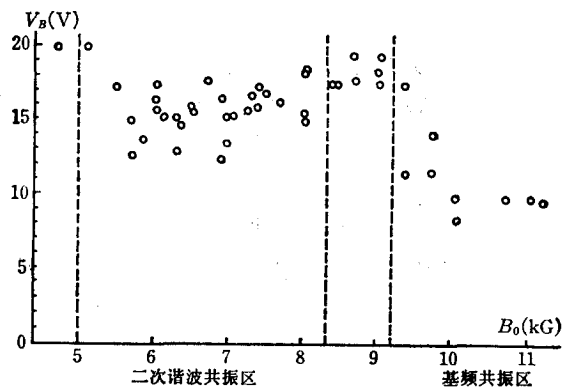


图4 微波预电离时,击穿电压和中心环向场的关系

2.5×10^{-3} Torr. 但在临界值附近, 击穿电压较高。

四、结 论

在CT-6托卡马克运转初期,曾使用分布作用腔振荡器进行了微波预电离实验^[7]。但这一微波源功率很低(<150 W)。和这一实验比较,本文所描述的使用迴旋管的预电离实验表明,大功率微波预电离不仅可以有效地电离气体,而且对形成的等离子体参数有很

大影响。但在降低击穿气压方面,增加微波功率并未起作用。

本工作在同一装置上使用基频和二次谐波共振进行了微波预电离实验。结果证实了预电离作用的共振性质,且比较了两个共振区域的作用。

参 考 文 献

- [1] K. R. Chu & B. Hui, NRL Memo Report 4C34.
- [2] Y-K. M. Peng *et al.*, *Nucl. Fusion*, **18**(1978), 1489.
- [3] T. Chu *et al.*, *Phys. Lett.*, **77A**(1980), 318.
- [4] R. M. Gilgenbach *et al.*, *Nucl. Fusion*, **21**(1981), 319.
- [5] D. C. Robinson *et al.*, 3rd Conf. on Heating in Toroidal Plasma, (1982) Part II, 647.
- [6] 中国科学院物理研究所一〇四组、中国科学院电工研究所四〇三组, 物理学报, **29**(1980), 577.
- [7] 康寿万等, 核聚变, **1**(1980), 147.

ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE PREIONIZATION EXPERIMENTS ON CT-6B TOKAMAK

GROUP 101, GROUP 102, INSTITUTE OF PHYSICS, DIVISION No. 4, INSTITUTE OF
ELECTRONICS, ACADEMIA SINICA

ABSTRACT

Injecting a high power microwave into the CT-6B tokamak plasma, we performed the experiments on the pre-ionization of the tokamak discharge at the fundamental and the second harmonic resonance of the electron cyclotron wave. The experiments verified that the microwave pre-ionization is very effective for the reduction of the loop voltage and the magnetic flux in the early stage and suppression of the production of runaway electrons in the quasi-steady stage. The effect of the microwave pre-ionization with the fundamental cyclotron resonance is better than that with the second one.

- 1) Participants: Yao Xin-zi, Luo Yao-quan, Su Da-ren, Wu Xiao-Wen, Liu Yi-qun, Cui Bin-Sheng, Yang Si-ze.
- 2) Participants: Wang Long, Qi Xia-zhi, Yang Xuan-zong, Han Gong-he, Shen Li-Kang.
- 3) Participants: Zhang Shi-chang, Hong Wen-jie, Wu De-shun, Qin Wen-zhen, Ruan Jian-hua, He Yao-huang, Miao Yong-huan.