

2mm 斑纹移动干涉仪的研制及其用于探测电子密度

刘秩群 李唯强 杨宜宗

(中国科学院物理研究所)

用毫米波斑纹移动干涉观测等离子体电子密度, 测量结果较准确, 受扰动小. 自 1979 年以来, 我们用研制的 8mm, 4mm 和 3mm 干涉仪系统对受控热核聚变装置 CT-6B 多次观测电子密度和有关现象, 取得了较满意的结果, 从观测结果得知, CT-6B 的电子密度可达 $4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$. 为了使得在诊断高电子密度时波不被截止, 避免非线性误差和减小对入射波的折射效应, 并为开展其他应用创造条件, 我们又研制了 2mm 系统与 4mm 系统构成的一个混合干涉仪系统, 并在 CT-6B 上进行实验, 其结果也是令人满意的.

一、基本原理概述

斑纹移动干涉测量电子密度的原理是利用电子与电磁波的相互作用, 当入射波穿透等离子体时, 会产生相移, 电子密度越高, 产生的相移越大, 相应地移动条纹数也越多, 根据移动的条纹数, 便可确定线平均电子密度值.

当忽略碰撞效应和磁场效应时, 发射-接收喇叭天线使波传播方向与装置环向场垂直, 其寻常波折射率为

$$\mu = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2}\right)^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{n_e}{n_{ec}},$$

其中 n_{ec} 为临界电子密度,

$$n_{ec} = \frac{\epsilon_0 m_e \omega_c^2}{e^2} \approx 1.24 \times 10^{-8} f_c^2 / \text{cm}^{-3},$$

当 $n_e \ll n_{ec}$ 时, 相移量为

$$\Delta\phi = \int_0^L \frac{2\pi(\mu - 1)}{\lambda_c} dl,$$

其中 L 为波穿透等离子体的路径. 经简化, 平均电子密度值为

$$\bar{n}_e \approx 118.4 \left(\frac{l_c \cdot \Delta\phi}{L}\right) / \text{cm}^{-3}$$

或

$$\bar{n}_e \approx n_{ec} \left(\frac{2 \cdot \lambda_c \cdot N}{L}\right) / \text{cm}^{-3},$$

其中 N 为移动的条纹数, 每移动一个条纹即为移动 2π 弧度.

二、系统方框图

系统方框图如图 1 所示. 在观测一般密度值时, 调两个静态条纹即可, 但细致观测不稳定密度涨落和快速变化等物理现象时, 静态条纹数多些为好. 波源输出功率为 20—40mW. 国外用示波器观测条纹时, 采用 Z 轴增辉, 这种方法因示波器的差异会带来一些限制和不便, 因而我们研制了增辉变换器, 将 Z 轴增辉改为 Y 轴接入显示.

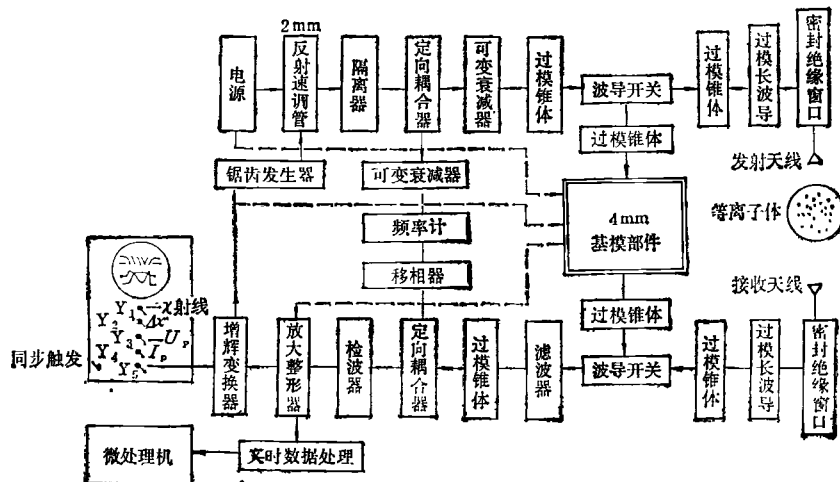


图 1 2—4mm 斑纹移动干涉仪混合系统方框图

三、实验初步结果

图2和图3分别为无和有脉冲补充送气时的实验照片。

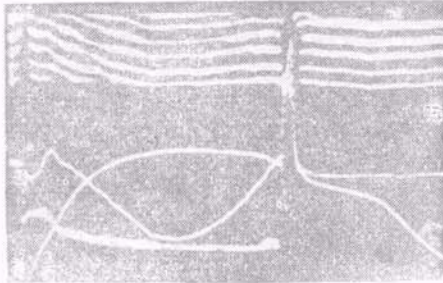


图2 没有脉冲补充送气时2mm(135GHz)斑纹波形
 $B_T = 9.35\text{kG}$; $P_0 = 3.3 \times 10^{-3}\text{Torr}$; $t = 5\text{ms/格}$;
 上一线为干涉条纹; 上二线为等离子体水平位移, $\Delta X = 8\text{mm/格}$;
 上三线为等离子体环电压, $U_p = 10\text{V/格}$; 上四线为等离子体环电流, $I_p = 10\text{kA/格}$

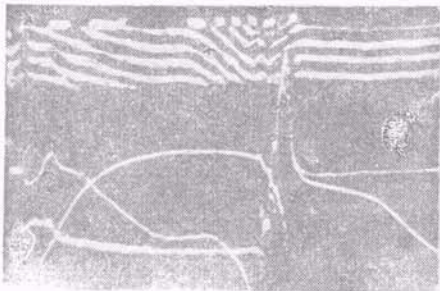


图3 有脉冲补充送气时2mm(135GHz)斑纹波形
 延迟12ms; $8\text{Torr} \cdot \text{l/s}$; 其他与图2同

有补充送气时,等离子体不易平衡稳定,一般情况下,等离子体电流,电压和约束时间无大变化,而电子密度可成倍地增加,相应地等离子体较快地水平外移,然后迅速内移而猝灭;没有补充送气时,等离子体的约束时间和密度平坦区可增大,但密度增加有一定的限度。

高密度实验图片略,后期电子密度已进入非线性范围,后期一段条纹较模糊,是严重的折射效应和等离子体不稳定快速位移所致。从图4可清楚地看到数据

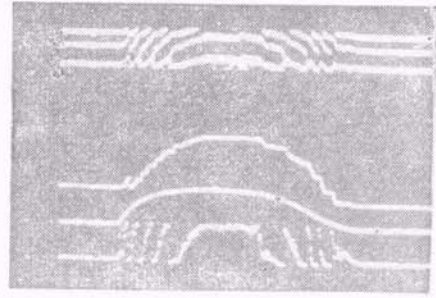


图4 4mm(71GHz)斑纹图 ($t = 5\text{ms/格}$)
 上一线:干涉斑纹图; 上二线:条纹实时处理后电子密度线; 上三线: I_p 为10kA/格; 上四线:条纹数据处理对应线

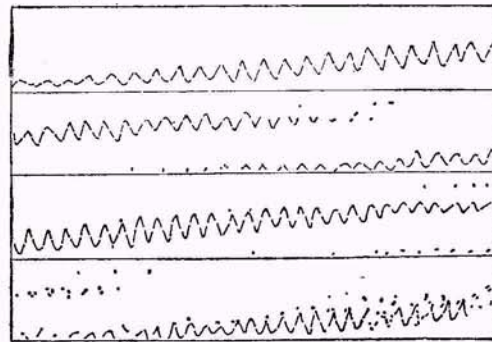


图5 电子密度涨落波形
 $f_0 = 93\text{GHz}$; $F = 20\text{kHz}$; $\bar{N}/N = 3-5\%$;
 $t = 0.25\text{ms/格}$

处理的相应情况。

图5为观测到的电子密度涨落,该现象在等离子体某一时刻存在,其规律尚待进一步研究。

在该混合系统中除2mm功率源采用进口管外,全部自行设计制造,初步实验证明,此系统稳定可靠,可用于受控热核聚变研究和空间等离子体模拟实验等研究。

参 考 文 献

- [1] 刘铁群,崔滨生,核聚变与等离子体物理,2-2(1982),114.
- [2] 刘铁群,崔滨生,等离子体通讯, No. 6(1983), 1.

更 正

1985年第11期第685页图1中的 E_i 和 E_v 的下标漏印;第689页图6中的 E_v 应为 E_i ,右边的 $q\phi_n$ 应为 $q\phi_p$ 。