

HT-6M 外差式毫米波反射仪的研制*

张劲松 范叔平 罗家融 曹永军

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽, 合肥, 230031)

TL82
0536

摘要 报道了用于测量核聚变等离子体密度的毫米波反射仪, 实验表明其空间分辨能力: 横向绝对分辨率 $\Delta R_p = 0.7\text{cm}$, 相对分辨率 $\delta R_p = 1.08\%$, 纵向绝对分辨率 $\Delta L_t = 0.832\text{cm}$, 相对分辨率 $\delta L_t = 0.943\%$, 时间分辨率 $\sim 10\mu\text{s}$, 测量灵敏度为 $\Delta\gamma = 0.79\text{cm}$, 相对测量灵敏度 $\delta\gamma = 1.22\%$, 能满足实验要求。

关键词 调制外差技术, 毫米波, 反射仪。

聚变等离子体
HT-6M

DEVELOPMENT OF HT-6M HETERODYNE MILLIMETER WAVE REFLECTOMETER*

ZHANG Jin-Song FAN Shu-Ping LUO Jia-Rong CAO Yong-Jun

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The development of a characteristic heterodyne millimeter wave reflectometer used for density measurement on nuclear fusion plasma was reported. The instrument has high measuring sensitivity and good spatial resolution and interference resistance by adopting modulation and heterodyne techniques. It offers a new and high precision plasma diagnostic tool for nuclear fusion devices. The experiments show that the spatial resolution of this reflectometer is as follows: the poloidal absolute resolution $\Delta R_p = 0.7\text{cm}$, the poloidal relative resolution $\delta R_p = \Delta R_p/R_0 = 1.08\%$, the toroidal absolute resolution $\Delta L_t = 0.832\text{cm}$, the toroidal relative resolution $\delta L_t = \Delta L_t/L_0 = 0.943\%$ (L_0 is the circumference length of the reflecting layer), the time resolution is about $10\mu\text{s}$, the measuring sensitivity $\Delta\gamma = 0.79\text{cm}$, the relative measuring sensitivity $\delta\gamma = \Delta\gamma/R_0 = 1.22\%$. The above properties of this reflectometer can meet all needs required by experiments on HT-6M nuclear fusion device.

Key words modulation heterodyne technique, millimeter wave, reflectometer.

引言

在核聚变研究中, 电子密度是反映聚变等离子体(plasma)特性的一个重要参数, 它对于研究密度输运和等离子体不稳定性, 最终实现磁约束受控聚变具有十分重要的作用^[1]。

通常用于测量 Plasma 电子密度的方法有两种, 即微波和远红外干涉测量, 但它们存在着测量条件苛刻或空间分辨率差的不足, 并且可测的参数范围也很有限. 毫米波反射测量技术以其极易满足 Plasma 可近性条件、无需对称性假设及空间分辨率极佳等独特的优越性, 在诸多核聚变装置上获得了广泛应用^[2]. 然而, 国内还未能有一个十分有效的反射仪应用于聚变装置, 因此, 研制和发展毫米波反射仪, 使之尽快成为国内研究聚变等离子体的一种十分有用的诊断手段具

有重要意义。

本文报道了单道外差式毫米波反射仪的研制工作, 并对实验结果进行了分析和总结。

1 基本原理

当一束频率为 ω 的电磁波沿平行于密度梯度的方向在等离子体中传播时, 会遇到密度等于临界值 n_c 的截止层, 波在截止层 x_c 处发生反射, 并沿原入射方向的反向出射^[3]:

$$n_c = n_{ce} = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2} \quad (1)$$

根据这一电磁波在 Plasma 中被截止的现象, 可以用毫米波源向等离子体辐射电磁波, 反射回来的电磁波可以把截止层处的信息带出来, 用来诊断等离子

* 国家自然科学基金(编号 19789501)资助项目
稿件收到日期 1999-03-15, 修改稿收到日期 1999-10-08

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19789501)
Received 1999-03-15, revised 1999-10-08

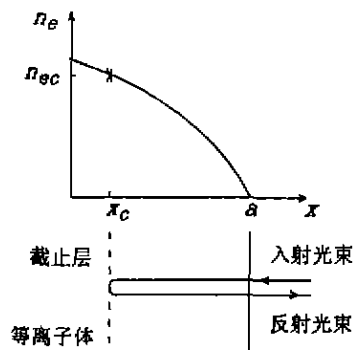


图 1 反射仪测量原理图
Fig. 1 The principle of reflectometer

体的特性,这就是毫米波反射仪测量电子密度的基本原理.

毫米波反射仪测量原理图见图 1,一束波发射进入等离子体,从截止层处反射,在反射点的附近对反射波进行探测,测量入射波和反射波之间的相对相位,便可知等离子体中反射层的位置、可见,毫米波反射仪必须能够对相位延迟进行合理而精确的测量.

2 设计与建立

HT-6M 外差式毫米波反射仪的结构示意图如图 2 所示.反射仪采用 O-mode 辐射传播模式,毫米波源是耿氏(Gunn)固体振荡器,频率设计在 29GHz~34GHz 范围内、能够测量的电子密度范围为 $1.04 \times 10^{13} \sim 1.43 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$. AM 为 8mm 波段的幅度调制器^[4],用以对毫米波信号进行调幅,经过调幅后的载波向聚变装置中的等离子体发射.调幅信号频率为 256MHz(速度~4ns),由锁相环 PLL1 提供.喇叭天线的电压驻波比为 1.15,增益为 20dB,实验中采用两个天线,一个用于发射,一个用于接收,两臂所用的耦合器均为 3dB 多孔定向耦合器,方向性大于 30dB.接收的微波信号经晶体检波器而被解调,这样便得到了 256MHz 的高频信号.但是这里的 256MHz 信号与前面发射系统中的 256MHz 信号是不同的,因为这一 256MHz 信号经过了等离子体的延时,从而携带了等离子体反射层的信息,将这一经过延时的 256MHz 信号与锁相环 PLL2 中产生的 256.5MHz 振荡信号进行混频,滤去高频分量,取其差频信号,便得到了载有等离子体信息的 500kHz 的中频信号,即反射信号.而前面未经延时的 256MHz 信号也与 PLL2 中 256.5MHz 进行混频、经过同样的处理,又得到了一个 500Hz 的中频信号,不同的是这一 500kHz 信号是由两个本机

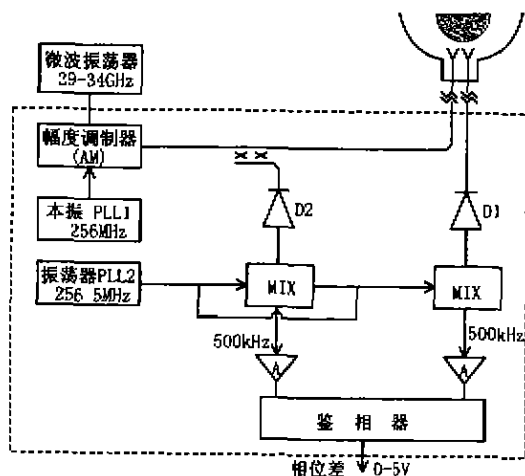


图 2 8mm 外差式微波反射系统方案图示
Fig. 2 Schematic diagram of 8mm heterodyne microwave reflecting measurement system

振荡器 PLL1 和 PLL2 直接差频而获得的,根本没有与等离子体发生作用,因此并不携带任何等离子体信息,我们称之为参考信号.将参考信号与反射信号同时送入鉴相器进行鉴相,并经过放大、滤波处理后,最终输出与延时(或延相)成比例的直流电压,这样便完成了相位-电压的转换过程.

3 实验结果与分析讨论

经过反复仔细调试,我们获得了如图 3 所示的实验结果.当我们关闭微波源时,探测到的反射信号立即消失(见图 4).当调节可变衰减器时,源功率受到衰减而降低,使得发射波的幅度随之而变化,但反射仪的输出并不发生改变,说明了该反射仪的输出不受幅度变化的影响,这一特点使它比干涉仪及零差干涉技术反射仪具有明显的优越性.当我们调节衰减器的可调活塞临近关闭状态时,此时的衰减系数很大,波功率小到检波器无法将其微弱信号检测出来,反射仪的输出随之消失,如图 4 关闭微波源时的情形.以上这些现象均有力地证明了图 3 的实验结果是完全真实的反射信号、而不是串扰、泄漏造成的假现象.

在此背景下,我们对反射系统又进行了进一步的精确定量测量,通过移动反射靶位置,观测记录鉴相器的直流输出电压值,获得了鉴相器输出电压 V 与靶位置坐标 x 的函数关系(见图 5).从图 5 中我们可看到,鉴相器的输出与靶位置呈良好的线性关系,与我们的设计目标完全符合.因此 HT-6M 微波反射仪在反射靶实验中获得了成功,通过测试及计算,得出反射仪的空间分辨率分别为 0.7cm 和 0.832cm,时间分辨可达

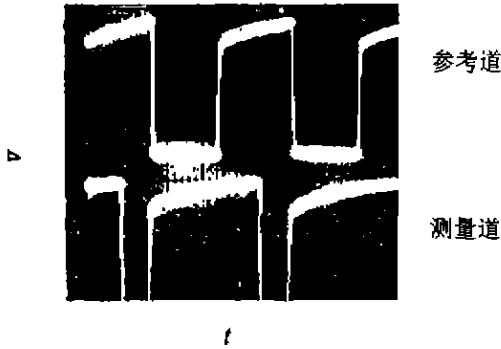


图 3 反射仪输出 500kHz 信号
Fig. 3 Output of reflectometer at 500kHz
(microwave is on)

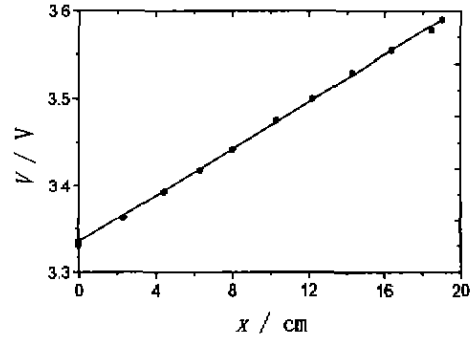


图 4 关闭微波源时的反射仪输出
Fig. 4 Output of reflectometer
(microwave is off)

10μs, 测量灵敏度为 0.79cm.

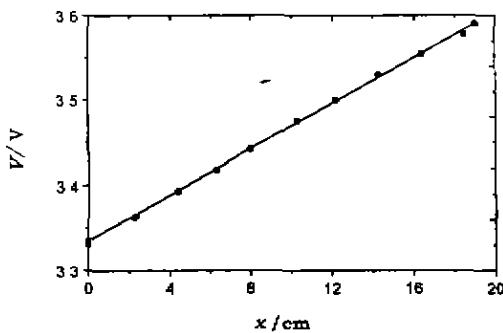


图 5 反射仪输出与反射靶位置的实验曲线
Fig. 5 Dependence of reflectometer's
output on target's position

4 应用和发展前景

HT-6M 毫米波反射仪在核聚变装置中的应用可分为固定频率测量和扫频测量两种主要应用方式。

4.1 固定频率测量

固定频率诊断中, 反射仪测量由临界密度层运动而造成的相位变化. 实质上, 微波反射法中的临界密度反射层即构成了简单干涉仪的另一镜面, 相对于入射波的相位移是由经历了在波导及等离子体中传播和反射的波束贡献的. 反射波与沿固定路程长的参考束相混合, 由 φ 的变化产生干涉条纹:

$$\Delta F = \Delta\varphi/2\pi = \frac{\bar{N}\omega}{\pi c} \Delta x_c \quad (2)$$

式(2)中 \bar{N} 为沿射线路径方向的平行折射系数, Δx_c 为反射点位置的变化量.

固定频率反射仪主要用于研究等离子体的宏观运动和电子密度的涨落, 而测量电子密度的分布, 必须采用下面介绍的扫频反射仪.

4.2 宽带扫频测量

在宽带扫频技术中, 源频率要求在较宽 ($\omega_1 - \omega_2$) 的频带内进行扫描, 以保证大部分密度剖面被探测到, 相位随频率的变化率为 $d\varphi/d\omega$, 即群延迟, 可通过实验获得. 对 $\varphi(\omega)$ 方程进行 Abel 变换, 便得到在 $x_c(\omega_1)$ 和 $x_c(\omega_2)$ 之间的密度剖面:

$$\varphi(\omega) = \frac{2}{c} \int_{x_c}^{\alpha} (\omega^2 - \omega_p^2)^{1/2} dx - \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

式(3)中, ω_p 是等离子体频率.

宽带扫频技术是最好的测定电子密度剖面的反射法测量手段, 然而, 它不能很好地适用于大型聚变装置上, 在这种情况下, 多频窄带扫描技术更适用.

4.3 窄带扫频测量

在窄带扫频技术中, 多个相互独立的源(具有不同的频率 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$) 沿相同的方向探测等离子体. 每个源都进行窄带扫频 $\Delta\omega/\omega = 10\%$, 利用内插法拟合获得在 $\omega_1 < \omega < \omega_2$ 范围内的全部变化率 $d\varphi/d\omega$, 最后, 通过与宽带扫描相同的反演变换便可得到电子密度的分布剖面.

5 结语

我们成功地设计并建立了 HT-6M 外差式毫米波反射测量系统, 系统的设计通过实验验证, 与设计指标相符合, 能满足实验要求.

(1) 所研制反射仪的空间分辨率为: 横向绝对分辨率 $\Delta R_p = 0.7\text{cm}$, 相对分辨率 $\delta R_p = 1.08\%$, 纵向绝对分辨率 $\Delta L_c = 0.832\text{cm}$, 相对分辨率 $\delta L_c = 0.943\%$, 时间分辨率 $\sim 10\mu\text{s}$, 测量灵敏度为 $\Delta\gamma_c = 0.79\text{cm}$, 相对测量灵敏度 $\delta\gamma_c = 1.22\%$.

(2) 反射仪输出与反射靶位置之间具有良好的线性关系, 这一重要结果为研究等离子体密度分布和与

等离子体不稳定性有关的密度涨落提供了可靠的测量基础.

(3) 该系统采用幅度调制、外差接收技术,提高了诊断灵敏度及分辨率,是目前国内较为新颖的一种调幅外差式毫米波反射仪,其性能与国内外其它反射系统相比具有一定的优势.

REFERENCES

- [1]Mazzucato E, Nazikian R. Microwave reflectometry for the study of density fluctuation in Tokamak plasmas, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1991, **33**(10): 261-274
- [2]Simonet F. Measurement of electron density profile by microwave reflectometry on Tokamaks, *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**: 664
- [3]Anabitarte E, Bustamante E G, Calderon M A G, *et al.* Electron density fluctuation measurements in the TJ-I Tokamak by microwave reflectometry, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1987, **32**: 1938
- [4]WU Ming-Yin, MAO Xiu-Hua. *Microwave Technology*, Xi'an; Northwestern University of Telecommunication Engineering Press (吴明英,毛秀华.微波技术,西安:西北电讯工程学院出版社), 1987, 57