

# 用于等离子体诊断的毫米波散射系统

崔滨生 吴小文<sup>1)</sup> 俞雪华 袁定朴

(中国科学院物理研究所)

匡龙海

(中国科学院电子学研究所)

毫米波散射实验是研究等离子体集体效应的重要诊断方法之一。因为它有散射功率大, 散射角大的特点, 所以对于了解与密度涨落有关的等离子体低频波的不稳定性及其湍流谱<sup>[1-3]</sup>较其它方法具有独到之处。当然散射系统的研制是散射实验的重要环节, 它直接关系到实验的成败。国内目前还未见有关毫米波段散射系统和散射实验结果的报道。本文着重讨论散射系统。

## 一、散射系统

### 1. 散射系统工作原理

如图 1 所示, 散射系统由发射器和接收器组成, 它们包括发射源、稳频系统和发射喇叭天线。发射器发射的毫米波进入具有低频振荡的等离子体中, 出现相干散射现象。散射总功率<sup>[4]</sup>为

$$P_s = P_i \lambda_i^2 L^2 \bar{n}_e \sigma_T, \quad (1)$$

式中  $P_i$  和  $\lambda_i$  是入射波的功率和波长,  $l$  是散射体积长度,  $\bar{n}_e$  是电子密度涨落幅度,  $\sigma_T$  是汤姆孙散射截面。接收器沿着与入射波构成的夹角  $\theta_s$  方向, 通过接收天线接收到散射波, 经混频和放大输出低频信号。 $\theta_s$  角称为散射角。当  $\lambda_i$  小于低频波波长  $\lambda$  时,

$$\theta_s = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\lambda_i}{2\lambda} \right),$$

即满足布喇格条件。

### 2. 散射系统适用的条件

散射系统发射源发射波的波长为 8mm。为了得到相干散射的条件

$$4\pi\lambda_D \sin \frac{\theta_s}{2} \leq \lambda_i \leq 2\lambda,$$

( $\lambda_D$  是等离子体德拜长度)以及减少折射效应, 被测等离子体要具备以下条件: 电子温度  $T_e \cong 1 \sim 100\text{eV}$ , 电子密度  $n_e \cong 10^9 \sim 10^{12}\text{cm}^{-3}$ , 电子密度涨落大于 1%。

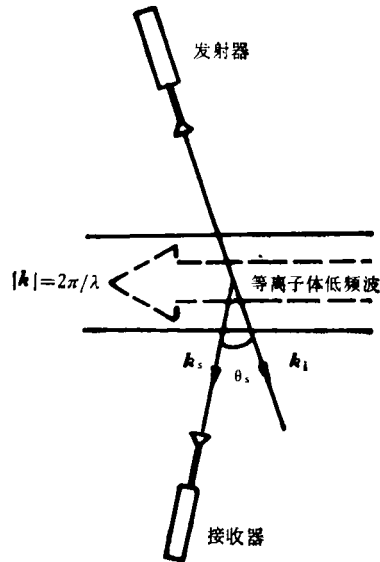


图 1 散射系统工作原理

### 3. 外差混频散射系统

外差混频是接收器内有本振源的波与散射波混频, 原理见图 2(a)。假设  $P_s \cong 10^{-12}\text{W}$ ,  $l = 2\text{cm}$ ,  $\lambda_i = 8\text{mm}$ ,  $\bar{n}_e = 10^7\text{cm}^{-3}$ ,  $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25}\text{cm}^2$ , 利用 (1) 式计算, 得出  $P_i \cong 5.9\text{mW}$ 。因为发射波在传输中损耗约 10dB, 所以发射源功率必须大于 60mW。接收器最小可探测功率约为  $10^{-13}\text{W}$ , 散射信号的信噪比  $\leq 10$ 。中频放大器频带宽为 50 MHz, 总增益约 110dB。混频器输出电流为<sup>[5]</sup>

$$i \cong a \left\{ \frac{E_s^2}{2} + \frac{E_1^2}{2} + E_s E_1 \cos(\Delta f + f) 2\pi t \right\}, \quad (2)$$

$a$  为常数,  $E_s$  和  $E_1$  是散射波和本振源波的振幅,  $\Delta f =$

1) 中国科学技术大学研究生院研究生。

$f_1 - f_0$  是入射波与本振源波的频差。本振源采用耿氏振荡器，其输出功率小于 30mW，频率稳定度约为  $10^{-6}/24h$ 。发射源采用反射速调管，输出功率大于 60mW，频率稳定度受电源影响约为  $10^{-3}/24h$ ，因此需要稳频。稳频系统由稳频器、谐振腔和检波器组成，谐振腔  $Q > 5000$ 。经稳频的反射速调管频率稳定度与耿氏振荡器的频率稳定度同量级。实测入射波频率可稳定到 50kHz，与估算的一致。(2)式表明，如果被测的低频波频率  $f < 50kHz$ ，则该系统是不适用的。该系统最大优点是发射器与接收器之间没有波导连接，因而可随意改变  $\theta$  角，这给测量带来方便。

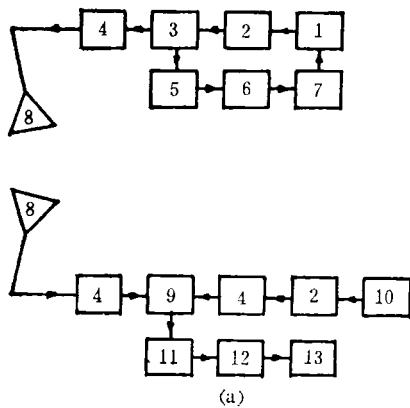


图 2 (a) 外差混频散射系统

1. 反射速调管； 2. 隔离器； 3. 定向耦合器； 4. 可变衰减器； 5. 谐振腔； 6. 检波器； 7. 稳频器； 8. 喇叭天线； 9. 正交场平衡混频器； 10. 耿氏振荡器； 11. 前置中频放大器； 12. 主中频放大器； 13. 频谱仪

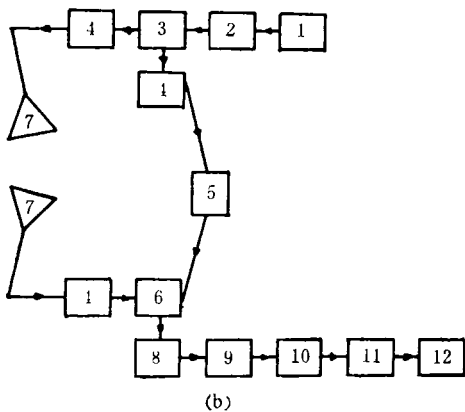


图 2 (b) 零差(零拍)混频散射系统

1. 耿氏振荡器； 2. 隔离器； 3. 单T接头； 4. 可变衰减器； 5. 弯波导； 6. 正交场平衡混频器； 7. 喇叭天线； 8. 前置放大器； 9. 滤波器； 10. 锁相放大器(放大单元)； 11. 数据采集器； 12. 微型计算机 (APPLE-II)

#### 4. 零差混频散射系统

零差混频是从发射源引出部分发射波到接收器内与散射波直接混频，混频器输出电流为

$$i \cong a \left\{ \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + E_1 E_2 \cos 2\pi f t \right\}. \quad (3)$$

(3)式表明了零差混频 ( $\Delta f = 0$ ) 的特点，故不存在需要频率稳定问题。另外还可以省去中频放大器，只需选择满足被测低频波频率带宽的放大器即可。我们实际使用的放大器带宽约为 1MHz，所以该系统适于测  $f < 1MHz$  的信号。图 2(b)表明发射器和接收器有波导连接，这给  $\theta$  角的改变带来很大的困难。解决的方法是，使用若干不同角度的弯波导分别连接发射器和接收器。该方法只能测量相应弯波导的若干角度的散射信号。

#### 二、实际测量结果

我们首先在小热阴极(钨丝)放电装置上进行了散射实验。该装置中的等离子体的低频波是离子声波，它可以被栅网激励或电流驱动产生，其频率范围为 1~100kHz。使用外差混频散射系统进行散射实验没有得到预期的结果，其原因是当  $\theta \leq 10^\circ$  时，发射天线旁瓣的透射功率直接干扰了中频放大器的正常工作。如果减少透射功率(衰减入射功率)，则很难探测到散射信号。若使用零差混频散射系统做散射实验，即获得成功。该系统的发射源为耿氏振荡器，其输出功率

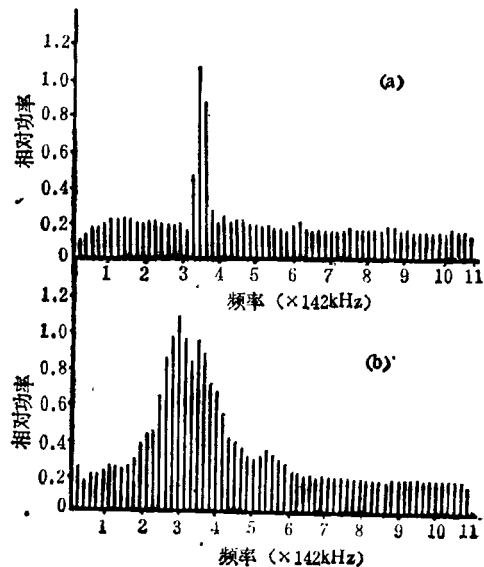


图 3

(a) 由栅网激励的离子声波；  
(b) 电流驱动产生的离子声波

(下转第 384 页)