



物理前沿

◆ 学部委员钱临照教授主持

受控核聚变

| 现代物理学的一个重要前沿领域(之一)

◎ 朱士尧



## 六、各种形式的等离子体诊断技术

要想真实地了解聚变装置中的高温等离子体的运动规律,的确是一件相当复杂的事情。发展等离子体诊断技术的目的就是设法利用一切可能利用的技术手段来了解等离子体的内部状态,例如离子温度、电子温度、等离子体电流和磁场的大小及空间分布;了解各种输运过程的特点,各种波动过程和不稳定性的模式及其增长率,以及等离子体的约束时间等。

在受控核聚变研究的发展过程中,研制新的诊断技术一直占有相当重要的地位。有些刚出现的新技术很快就被应用到等离子体诊断方面。激光技术便是一个例子。由于激光可以在时间和空间上都达到十

分集中的巨大的能量流密度,而且具有高度的单色性和相干性,它的频率范围可以包括从紫外到远红外的宽广频区。这些特点使得激光成为十分理想的等离子体诊断工具。利用激光可以测量等离子体的各种参数,不仅具有非常好的空间分辨率和时间分辨率,而且对所研究的等离子体不会造成严重的干扰。

在40年的核聚变研究进程中已经发展了一系列相当成熟的十分有效的等离子体诊断技术。随着核聚变研究的不断进展,尤其是热核点火的目标即将实现,一些适用于聚变点火等离子体的新的诊断技术正在研制过程中。

### 1. 电磁诊断

通过对等离子体进行电磁测量,可以推断出等离子体的许多重要性质,尤其是等离子体的宏观特性,例如等离子体电流,闭合形中的等离子体环电压,等离子体柱的边界位置,截面形状以及等离子体中磁流体扰动的模式和各种波动过程等。因此,尽管电磁诊断所需的仪器设备和技术相对来说都比较简单,但是它却是各种核聚变装置上必不可少的重要常规诊断手段之一。图13是托卡马克装置上电磁诊断的示意图,它包括了测量等离子体电流的罗柯夫斯基线圈;通过测量极向磁场来研究磁流体特性的一组磁探针;通过测量等离子体道磁特性来推断平均磁压强以及极向比压 $\beta_p$ 的逆磁线圈和补偿线圈。

用来测量等离子体总电流的罗柯夫斯基线圈的实质是一个弯成环形的密绕螺旋管线圈。将此线圈套在待测电流柱上,该电流在线圈周围空间产生瞬变的角向磁场,使穿过线圈

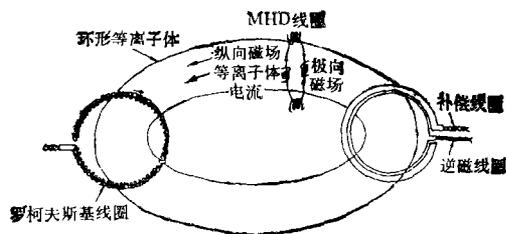


图13 托卡马克等离子体电磁诊断示意图

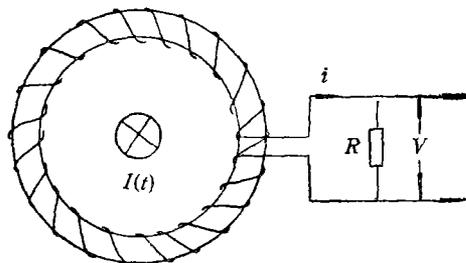


图14 罗柯夫斯基线圈示意图

的磁通量发生变化,从而在线圈两端产生感应电动势。图14是罗柯夫斯基线圈的结构示意图。从罗柯夫斯基线圈测量到的等离子体电流波形可以大致判断等离子体中发生的一些基本过程,例如等离子体是否稳定等。如果再跟环电压波形结合起来还可以推算出电子温度和欧姆加热功率等重要的等离子体参数。

磁探针实际上是一个微型的螺旋管线圈,它的工作原理很简单,当线圈所在的空间中磁场发生变化时,线圈两端便会感应出电动势。它与罗柯夫斯基线圈的差别除了它的几何尺寸要小得多(只有几毫米)之外,它并不套在等离子体柱上,它要么置于等离子体边界外部,要么插入到等离子体内部,后者称作内部磁探针。为了避免静电干扰,内部磁探针必须用薄壁金属细管作成屏蔽套,壁上开有窄缝作为信号的通道。为了减少对等离子体的干扰,在金属屏蔽套外面涂一层耐腐蚀的高熔点低Z(原子序数)材料。这种内部磁探针已被广泛应用于测量等离子体内部的磁场分布,波的结构和传播特性。分布在等离子体柱边界外部的磁探针组可以通过测量极向磁场的分布来研究等离子体的磁流体扰动的特性。正弦线圈、余弦线圈以及鞍型线圈等都是磁探针的变种,可以用来测量等离子体柱的位移以及等离子体逆磁性质等。

静电探针是在密度和温度比较低的情况下等离子体基本诊断方法之一。因为它是由朗缪尔首先发展起来的,因此也叫朗缪尔探针。静电探针的结构很简单,往往就是一根很细的金属丝,除了端点的工作部分之外,其余部分都套在玻璃或陶瓷等绝缘套内。如果探针是绝缘的,则由于电子的平均热运动速度远大于离子的速度,因而在开始时单位时间内打到探针表面的电子数目远远超过离子数目,使探针表面较快地积累起负电荷,从而探针的电位相对于附近未被扰动的等离子体空间电位来说是个负值,该负电位将吸引离子而排斥电

子,因此在探针表面附近空间便形成一个正的空间电荷层,称为离子鞘。鞘层逐渐增厚,最后在单位时间内进入探针表面的电子和离子数目相等,达到平衡。这时探针表面的总电流为零,而且探针的负电位不再改变了,此时的负电位叫做悬浮电位。当探针接上外部电源时探针中就有电流流过。改变外接电源的电压值便可以得到不同的探针电流。据此可以画出探针电压与电流关系的曲线,这就是相当有用的静电探针伏安特性。根据外加电压的正负,可以得到电子饱和电流的伏安特性曲线和离子饱和电流的伏安特性曲线。根据伏安特性曲线可以得到电子温度与离子温度。在实际应用中,经常使用双探针,它是由两个表面积相近的探针组成,工作电压加在两个探针之间,但是它们作为整体是悬浮的。测量两个探针之间的工作电流和电压变化就可以得到双探针伏安特性。求出特性曲线在电流为零处的斜率就可以得到电子温度。利用双探针测电子温度可以避免空间电位变化的影响,这是双探针的主要优点。

### 2. 激光干涉诊断技术

激光单色性好,相干长度长,而且光强大,发散角小,是一种非常理想的相干光源。激光干涉技术的发展为高温等离子体的干涉诊断技术的发展提供了崭新的前景。因为微波干涉仪只能测定低密度等离子体的电子密度,一般  $n_e \leq 10^{19} m^{-3}$ 。随着聚变装置向高密度运行状态的发展,必须采用激光干涉技术。

利用干涉技术测量等离子体电子密度,实质上是探测等离子体所引起的探测光束的相位移动:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_0^l (1 - n) dz,$$

式中  $\lambda_0$  是入射激光的波长,  $n$  是等离子体的折射率,  $l$  是探测光束在等离子体中的光程长度。等离子体折射率  $n$  可以表示为:

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2},$$

式中  $\omega_{pe}$  是等离子体频率,  $\omega_0$  是入射激光频率,通常  $\omega_0 \gg \omega_{pe}$ 。

为了便于用外差方法线性地探测激光通过等离子体时产生的相移,采用圆柱形旋转光栅产生多普勒频移。圆柱形光栅是个闪耀式光栅,其光栅刻槽平行于转轴。只要改变光栅转速便可以方便地改变频移  $\omega_m$ 。从图 15 中可以看出,激光

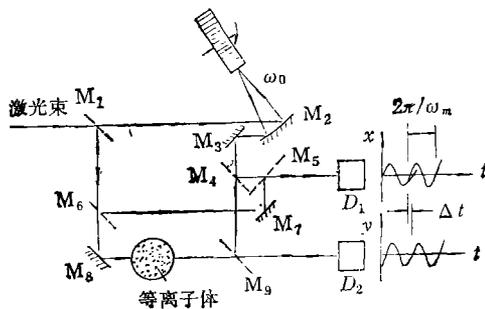


图 15 远红外激光干涉仪示意图

器输出的光束先经过半反射镜  $M_1$  分为两束,其中一束经凹面镜  $M_2$  反射后射入光栅,产生平移后的反射光束经过  $M_3$ 、

$M_4$  反射后在半反射镜  $M_5$  上再分为两路,分别到达探测器  $D_1$  和  $D_2$  上。另一束没有发生频移的激光束经  $M_6$  半反射镜分光后,一路不经过等离子体,另一路经过等离子体,它们也分别射到探测器  $D_1$  和  $D_2$  上,在探测器上分别与经过频移的两路参考光束混频。在  $D_1$  和  $D_2$  上的输出中分别产生  $x \sim \cos \omega_m t$  和  $y \sim \cos(\omega_m + \Delta\phi)t$  的差拍信号。将这两个差拍信号进行比较,由它们的相位差就可以求出由等离子体引起的相移  $\Delta\phi$ 。这种干涉仪的时间分辨率等于差拍信号的周期,一般在  $100-2\mu s$  范围内可调。如果用于研究快过程等离子体,就需要产生频率高达几十兆的差拍信号,以便足够快地跟踪等离子体密度的快速变化。

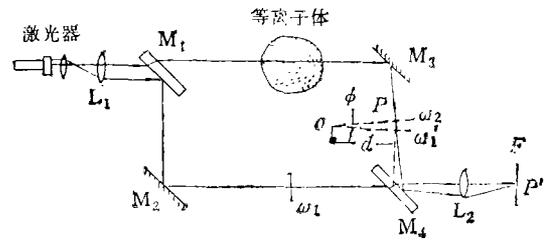


图 16 马赫-泽德干涉仪示意图

对于密度  $n_e > 10^{22} m^{-3}$  的高密度等离子体,必须用可见光和近红外波段的激光器作光源的干涉仪进行密度测量。在可见光和近红外区,最广泛用于等离子体诊断的是双光速马赫-泽德干涉仪。这种干涉仪具有干涉条纹可以任意地定域的优点。这样便可以根据需要把干涉条纹定域于等离子体内的平面上,可以将干涉条纹和等离子体一起拍摄下来(图16)。激光束只通过等离子体一次,它与参考光束在空间分开比较大的距离,便于实验设备的安装和使用。从图中可以看出,激光光源发出的相干光首先经过一组透镜  $L_1$ ,以扩展其光斑面积,使其充满等离子体的整个截面,并且能进一步减少光束的发散角。然后在平行平面玻璃  $M_1$  的半反射面上分成两束,一束作为探测光束,经过待测的等离子体;另一束作为参考光束,经过补偿器作光程补偿(图中未画出)。它们经过反射镜  $M_2$ 、 $M_3$  反射后在另一块与  $M_1$  完全相同的平行平面玻璃  $M_4$  的半反射面上重新会合,然后被透镜  $L_2$  聚焦成像到像平面  $F$  上。通常把 4 个反射面调节成近乎平行,它们的中心分别位于一个平行四边形的顶角上。当光程差  $\Delta = m\lambda_0$ ,且  $m$  为零或整数时在像平面上便得到一组亮条纹;当  $m$  为半整数时得到的是一组暗条纹。在像平面上由此形成的明暗相间的干涉条纹就是干涉仪的背景条纹。如果其中的一束光通过等离子体,光程差发生变化,因而使干涉条纹发生变动。把它与背景条纹进行比较就能知道等离子体截面上各点条纹移动的数目。条纹移动数目跟等离子体密度之间存在确定的关系,因此用这种方法就能测定等离子体的密度。

### 3. 激光散射诊断技术

激光散射是目前测量等离子体电子温度及其空间分布的最精确可靠的方法,在许多聚变等离子体实验装置上得到了广泛应用。

众所周知,光在通过非均匀介质时会发生散射现象。散

射光的特性包括散射光的强度, 偏振与光谱成份等都反映了散射介质的某些性质, 散射光的强度跟波长的四次方成反比, 因而大气对太阳光中波长短的蓝光散射比较厉害, 也就是说蓝光的散射光强度大. 就因为这个缘故使得天穹在我们看来是蔚蓝色的. 光的这种散射现象可以作为等离子体的一个诊断方法. 当然, 散射光是很微弱的, 普通光不能用作散射光源. 方向性好, 功率大的激光提供了很好的散射光源. 当然, 激光束入射到等离子体中之后引起散射的是电子. 电子在入射激光电场矢量的作用下获得加速度, 因此它可以产生次级电磁辐射, 形成辐射光波. 理论分析表明, 这种散射波是多普勒频移的电磁波, 而且散射截面是非常小的,  $\sigma = 6.65 \times 10^{-29} \text{m}^2$ . 即使等离子体中的电子密度高达  $10^{23} \text{m}^{-3}$  时, 其散射的平均自由程仍长达  $1 \text{km}$  的量级. 这说明激光散射要求光源有强大的功率, 否则散射光是难以探测到的.

激光散射实验除了要求光源有很强的功率之外, 对于散射角的选择、信噪比问题和杂散光问题都需要认真考虑. 激光波长的选择以及散射角的选择主要取决于待测的等离子体参数及其范围. 消除杂散光问题相当重要, 因为等离子体的散射截面很小, 散射光强与入射光强相差十分悬殊, 入射光在各个窗口或光学元件上的反射、散射以及等离子体本身的折射产生的杂散光会对散射信号产生严重的干扰. 因此, 散射实验中必须尽量减少杂散光. 在入射光穿过散射体积之后, 尽可能用光吞食器将入射光完全吸收. 此外, 信噪比问题也是激光散射实验中十分重要的问题. 我们知道, 高温等离子体本身是个十分强的光源, 而散射光一般是十分微弱的. 在等离子体本底辐射的统计涨落噪声占优势的情况下, 不仅要求激光脉冲具有较高的能量, 而且还要求激光脉冲宽度越窄越好, 相应地也要求探测系统的频带宽度与之相匹配. 激光束聚焦得越细, 对于提高信噪比也是有利的.

图 17 是激光散射实验的示意图. 激光束首先经过焦点光阑, 限制光束的发散角, 然后再将光束聚焦于等离子体中心部位. 透过等离子体的那部分光被光吞食器全部吸收. 在跟入射光成  $90^\circ$  的位置上安放光栅光谱仪, 将散射光分成若干道 (比如说 8 道), 由光导纤维分别引导到 8 个光电倍增管上进

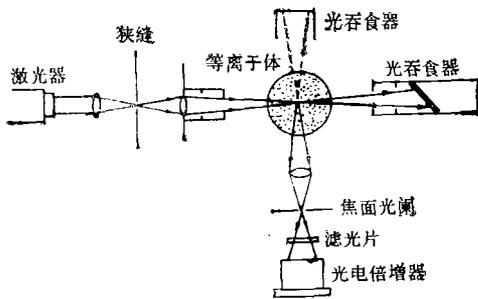


图 17 用于测量电子温度的激光散射实验示意图

行测量记录. 图 20 是一个高温等离子体散射实验中测量到的典型散射谱. 这是一个高斯型分布的谱, 由谱的半高宽便可得到高温等离子体中某个位置的电子温度. 重复频率足够高的激光系统可以用来观察电子温度随时间的演化. 通过多点 (或多道) 测量可以得到电子温度的空间分布.

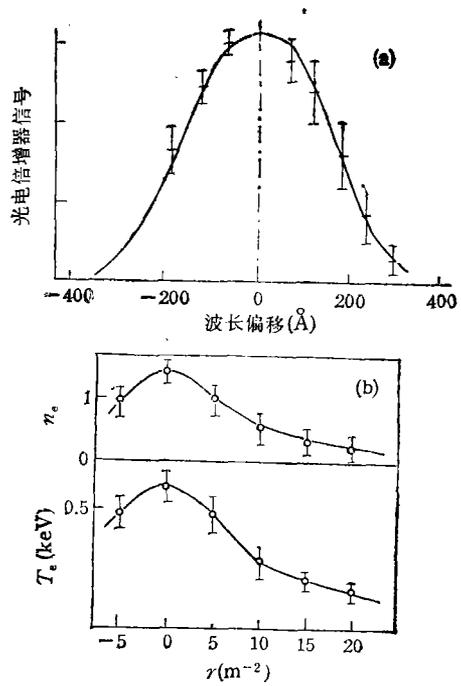


图 18 典型的高温等离子体散射谱以及同时测量到的  $n_e$  和  $T_e$

#### 4. 光谱诊断技术

光谱测量是高温等离子体诊断技术中的一个重要组成部分. 高温等离子体中存在多种多样的辐射过程. 这些辐射具有广阔的频率范围: 既有连续谱也有线谱. 等离子体的连续谱辐射包括韧致辐射和复合辐射. 韧致辐射是自由电子在和离子的碰撞过程中运动速度发生变化时发射的. 在这个过程中可以把离子看作静止的点电荷, 电子在这个以离子为中心的库仑场中将受到向心力而使轨道发生弯曲. 等离子体中电子和离子碰撞时, 除了上述韧致辐射这种自由-自由过程之外, 还可能发生电子被离子俘获而形成束缚态. 这种自由-束缚过程产生的复合辐射也形成连续谱. 实验中测量到的连续谱是韧致辐射与复合辐射之和. 电子温度越高, 复合辐射的成份越小, 因为电子能量越大, 越不容易被俘获.

等离子体的线光谱辐射包括迴旋辐射和原子特征线辐射. 电子绕磁力线作迴旋运动时产生的辐射称迴旋辐射, 其频率处于微波波段. 原子特征线辐射是原子中的电子在束缚态之间跃迁时产生的, 发射的光子能量是单一的. 在高温等离子体中, 重元素的最内层电子也有可能被直接电离掉. 这样较外层的电子就可能跃迁进入该内层轨道而伴随发生光子, 称为荧光光子, 其谱线称为荧光光谱.

关于光谱分析技术, 在可见光到近紫外光谱区 (波长范围从  $7000 \text{Å}$  至  $2000 \text{Å}$ ), 基本都采用技术上比较成熟的棱镜光谱仪、衍射光栅光谱仪和干涉光谱仪. 真空紫外光谱区的辐射测量比较复杂, 因为波长为  $2000 \text{Å}$  至  $3000 \text{Å}$  的紫外光在空气中被强烈地吸收, 整个光路必须置于真空中, 或充氦气等.

(待续)