

等离子体诊断用的毫米波准光学系统的设计和测量

沈学民 王兆申

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥)

摘要 准光学方法有效地提高了毫米波接收系统在等离子体诊断中的空间分辨率。本文给出了准光学系统的设计公式, 设计步骤以及测量的实验结果。

关键词 毫米波; 准光学; 等离子体诊断。

一、引言

毫米波诊断在受控核聚变的研究中有着重要的作用。利用毫米波干涉仪、辐射计以及散射仪能诊断等离子体的电子密度、电子温度和等离子体波等许多物理参数, 所以发展毫米波技术得到了各国聚变实验室的重视。毫米波诊断仪最主要部分为毫米波的接收系统。与通常用于通讯和雷达中的毫米波接收系统不同, 在等离子体诊断中, 要接收的电磁信号都是来自聚变装置(托卡马克、磁镜、仿星器等)的金属空腔, 并通过器壁上有限孔径的诊断窗口到达毫米波接收系统。这样金属器壁引起的反射和有限窗口引起的衍射效应给毫米波诊断带来困难。例如, 测量等离子体电子回旋辐射(ECE)的诊断, 由于器壁的反射使得测量辐射信号的偏振度无法实现。为了克服这些困难, 近年来毫米波准光学系统已逐步应用于等离子体诊断中^[1]。毫米波准光学系统是根据高斯光学原理设计的, 在这样的系统中传播的电磁波束接近高斯波束, 有可能控制波束参量和空腔参量, 使波束与空腔的耦合大大减弱^[2], 从而有效地抑制装置诊断窗口的衍射和器壁的反射对诊断的影响。这类系统近年来在多项实验中发挥了作用^[3-5]。本文以我们为 HT-6B 托卡马克研制的准光学系统为例, 给出了系统的设计步骤, 推导了工程应用的设计公式以及系统实际测量的结果。可供其他类似毫米波准光接收系统的设计作参考。

二、系统简介

我们为 HT-6B 托卡马克设计的 Ka 波段, V 波段接收系统是用于测量等离子体的电子回旋辐射, 以诊断电子温度和环电流密度为目标的^[6]。中心工作频率分别为 35GHz 和 62.5GHz。接收系统框图如图 1 所示。它是由外差接收机和准光学接收系统组成。准

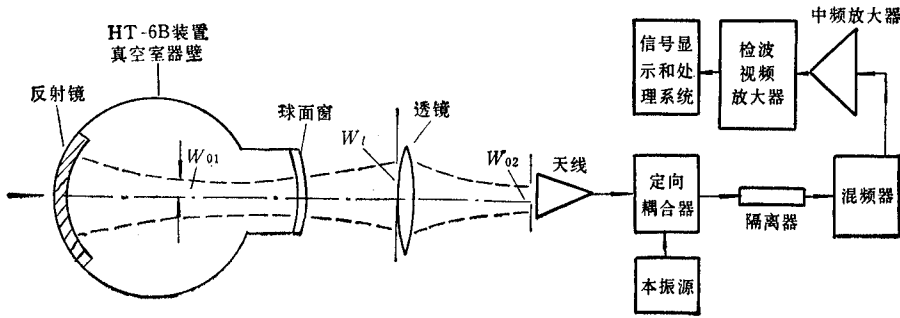


图1 接收系统框图

光学部分详见图2。它是由共焦腔，介质透镜和圆锥波纹壁天线组成。图中虚线表示天线辐射的波束和共焦腔中 TEM_{00} 模波束。 W_{01} , W_{02} 分别表示在共焦腔和天线中的波束波腰半径。

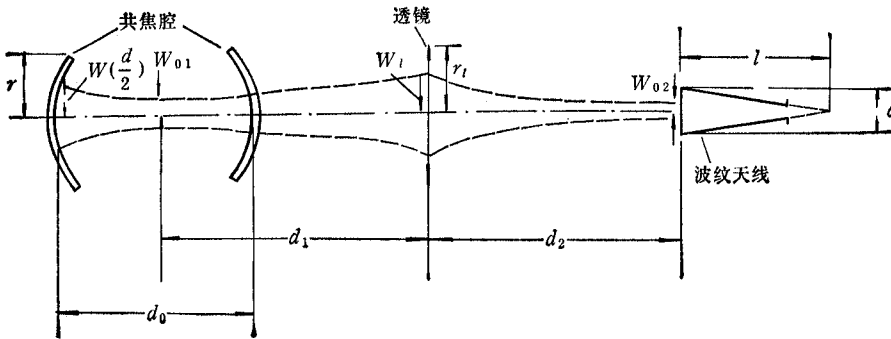


图2 准光学系统框图

1. 共焦腔

由玻璃球面窗和球面反射镜组成的共焦腔结构有以下两个特点。第一，对一定半径的球面窗和反射镜，采用共焦腔结构时，腔体的 TEM_{00} 模的波束在窗口和反射镜处的波束截面最小，因而具有最小衍射损耗。对于与该模匹配的接收天线而言，这时腔中波束以外的电磁辐射源经器壁多次反射或窗口衍射而进入天线的信号均减少到最低程度，即这时接收系统具有最佳的空间分辨率或隔离度^[2]。第二，对一定的衍射损耗，共焦腔结构要求的反射镜和窗口半径最小，这有利于系统在小装置中的应用。

2. 号角和透镜

由号角和透镜组成的接收天线具有下列特点，(1) 天线辐射的波束与共焦腔 TEM_{00} 模波束匹配。以下称满足这一要求的号角和透镜为匹配系统。(2) 匹配系统要有足够的带宽，使整个波段内上述匹配条件基本满足。(3) 匹配系统要有足够的稳定性——指匹配条件对图2中的距离 d_1 , d_2 的变化不敏感。这一点一般是容易满足的，在此不作详细讨论。

三、准光学系统的设计

1. 共焦腔的设计

共焦腔长 d_0 是由装置的尺寸给定。根据共焦腔理论^[7], 反射镜和球面窗的曲率半径 $R_r = d_0$, 其 TEM_{00} 模各波束参数和腔长的关系分别是:

$$W_{01} = \left(\frac{\lambda d_0}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$W\left(\frac{d}{2}\right) = W_{01} \left[1 + \left(\frac{\lambda d/2}{\pi W_{01}^2} \right)^2 \right]^{1/2} = \sqrt{2} W_{01} \quad (2)$$

$$R\left(\frac{d}{2}\right) = \frac{d}{2} \left[1 + \left(\frac{\pi W_{01}^2}{\lambda d/2} \right)^2 \right] = d = R_r \quad (3)$$

其中 λ 是工作波长, W_{01} 为共焦腔中心处波腰半径, $W\left(\frac{d}{2}\right)$ 是反射镜和球面窗处波束半径, $R\left(\frac{d}{2}\right)$ 是反射镜和球面窗处波束波阵面的曲率半径。取反射镜和球面窗的半径:

$$r \geq 2W\left(\frac{d}{2}\right) \quad (4)$$

这时衍射损耗对接收系统隔离度的影响与其余因素相比已可忽略^[2], 至此, 共焦腔的几何尺寸 d , R_r , r 均确定。

2. 匹配系统的参数

匹配系统的设计不是唯一的, 须根据实际情况来确定设计程序, 然后选择切合实际的参数。这里我们以透镜厚度 d_1 和透镜焦距 F 为出发点, 依次列出匹配系统中 r_1 , d_1 , d_2 , W_{02} 等各参数(见图 2)的设计公式:

(1) 根据光学中双凸球面薄透镜的公式, 给定透镜焦距 F 和透镜厚度 d_1 可得到透镜半径 r_1 。

$$r_1^2 = [2F(n-1)]^2 - \left[2F(n-1) - \frac{d_1}{2} \right]^2 \quad (5)$$

其中 n 是透镜材料的折射系数。

(2) 要使高斯波束在透镜处引入尽可能小的畸变, 取波束在透镜处半径 W_1 为:

$$W_1 \leq \frac{1}{2} r_1 \quad (6)$$

(3) 当 W_1 和 W_{01} 已知, 根据高斯波束传播公式^[7], 可确定距离 d_1

$$d_1 = \frac{\pi W_{01}^2}{\lambda} \left(\frac{W_1^2}{W_{01}^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (7)$$

(4) 如用单透镜来匹配两个波腰分别为 W_{01} 和 W_{02} 的高斯波束时, 若 F 选定, 则 d_1 和 d_2 须满足下式:

$$d_1 = F + \frac{W_{01}}{W_{02}} \sqrt{F - F_0^2} \quad (8)$$

$$d_2 = F + \frac{W_{02}}{W_{01}} \sqrt{F - F_0^2} \quad (9)$$

其中 $F_0 = \pi W_{01} W_{02} / \lambda$.

由(7),(8)式可得:

$$W_{02} = W_{01} F / \left[(d_1 - F)^2 + \left(\frac{\pi W_{01}^2}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

3. 天线的设计

前面已提到,天线的辐射场应接近 TEM_{00} 模高斯型波束,其波束波腰位置 d_2 和波腰半径 W_{02} 则应分别满足(9),(10)式要求. 将(1)式代入(10)式:

$$W_{02} \propto \lambda^{3/2}$$

因而一个理想的匹配天线在给定工作波长范围内除了辐射场应是高斯波束外,波束的波腰半径还应正比于波长的平方根. 这样的匹配天线的设计还有待于进一步探讨. 我们设计的天线具有下列特点: (1) 利用波纹壁圆锥号角天线来获得波束截面电场强度分布接近高斯型分布的波束. (2) 使天线在中心工作波长满足匹配条件. (3) 利用“最佳号角”的结构形态. 这类号角天线的形态和性能已有较透彻的研究. (4) 利用现有的诺模图^[8]来确定号角波束的相位中心,借助辅助透镜来修正实际波束的波阵面曲率半径,使之接近高斯波束波阵面的特点.

对于最佳号角天线有下列近似关系:^[9]

$$a \approx (2.8\lambda l)^{2/3} \quad (11)$$

$$\theta_{3dB}(H) \approx 70\lambda/a(^\circ) \quad (12)$$

a 是天线的口径直径, l 是天线长度, $\theta_{3dB}(H)$ 为对应H面上辐射场电场强度下降到3dB时的波束发散角. 对应于波纹壁“最佳号角”,E面和H面波束形状接近对称,波束电场强度横向分布接近高斯型分布:

$$E(r, z) \approx \exp\left(-\frac{r^2(z)}{W^2(z)}\right)$$

z 是波束轴上一点到波腰的距离, r 是 z 平面上径向坐标. 取对应于发散角 θ_{3dB} 的位置座标为 $(r_{3dB}(z), z)$, 则:

$$\frac{E(r_{3dB}(z), z)}{E(r=0, z)} = \exp\left(-\frac{r_{3dB}^2(z)}{W^2(z)}\right) = 0.707$$

$$r_{3dB}(z) = 0.588W(z) \quad (13)$$

同样,若对应于波束发散角 θ_b 的位置座标为 $(r_b(z), z)$, 则按高斯型波束定义:

$$\frac{E(r_b(z), z)}{E(r=0, z)} \approx \exp\left(-\frac{r_b^2(z)}{W^2(z)}\right) = e^{-1}$$

$$r_b(z) = W(z) \quad (14)$$

在远区场,由(13),(14)式可得到:

$$\theta_b/\theta_{3dB} \approx \frac{r_b(z)}{r_{3dB}(z)} = \frac{1}{0.588} \quad (15)$$

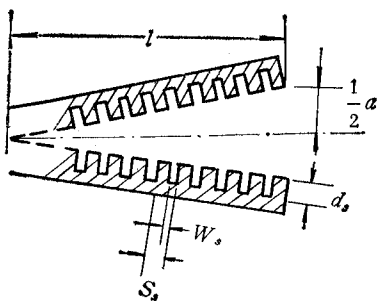


图3 波纹壁圆锥号角天线

根据高斯光束理论, 波束发散角和波腰半径 W_0 之间的关系是:

$$\theta_0(\text{rad}) = \lambda/\pi W_0 \quad (16)$$

将(12),(15)式代入(16)式:

$$W_0 = 0.153a \quad (17)$$

取天线口径 a 使 W_0 满足(10)式的要求。参见图 3, 波纹壁的槽缝尺寸可按下列关系确定^[10]:

$$\frac{\lambda_{\max}}{4} < d_s < \frac{\lambda_{\min}}{4}$$

$$W_s \leq \frac{\lambda_{\max}}{4}$$

$$S_s \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}$$

λ_{\max} , λ_{\min} 分别是工作波长的上下限值。至此天线的几何尺寸均已确定。

四、准光学系统的测量

根据上述设计原则完成的部件, 在用于等离子体诊断实验前, 必须对系统进行测量, 以确定系统是否满足高斯光学所确定的传播规律。根据互易原理, 将接收系统作为发射系统测量应是等价的。图 4 是 K_a 波段准光学系统测量的实验安排。将被测系统放置在光学导轨上, 天线的高度, 方位角以及透镜的高度均可调节。由脉冲调制的耿氏振荡器作发射源。脉冲发生器同时将调制脉冲送至锁相放大器的参考信号通路。接收天线为 K_a 波段的标准开口波导。信号经肖特基势垒二极管平方律检波后输入锁相放大器。锁相放大器的输出信号被 $x-y$ 函数记录仪记录。接收天线由能在轴向和横向移动的精密机械传动装置驱动。可沿波束截面和波束轴向移动。移动速度和范围由微型计算机控制。这样避免了手动机械装置因驱动接收天线移动速度不均匀带来的测量误差。

1. 波腰 W_{01} 位置的测定

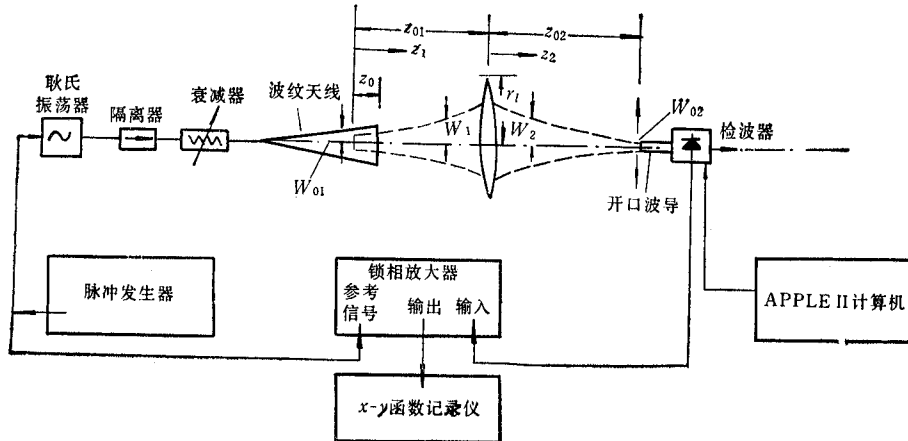


图 4 准光学系统测量的实验安排

测定 W_{01} 位置实际是测定波纹天线的相位中心. 一般情况相位中心不是在天线的口径面上. 直接测量天线相位中心需要较复杂的设备. 在此, 我们采用了非直接测量方法, 即改变 z_{01} , 测出不同的 z_{02} (z_{01}, z_{02} 分别为 W_{01}, W_{02} 的位置, 参见图 4). 将测量数据代入(8),(9)式, 可以求得 z_0 (相位中心相对口径面的距离). 测量结果表明, 当

$$z_{01} + z_{02} \geq \frac{(2W_{01})^2}{\lambda}$$

时, z_0 的变化小于 10%. 取平均值可得到 $z_0 \approx 6.1\text{cm}$. 这与文献[8]的诺模图提供的工程计算相位中心的数值接近.

2. 波束 $W_2(z_2)$ 的测量:

当 z_{01} 不变, 在不同的 z_2 位置上可以测量波束宽度 $W_2(z_2)$, 图 5 是当 $z_{01} = 35\text{cm}$ 时, 理论计算与实际测量的 $W_2(z_2)$. 实际测得的 $W_{02} = 2.5\text{cm}$, $z_{02} = 47\text{cm}$ 与理论值相接近.

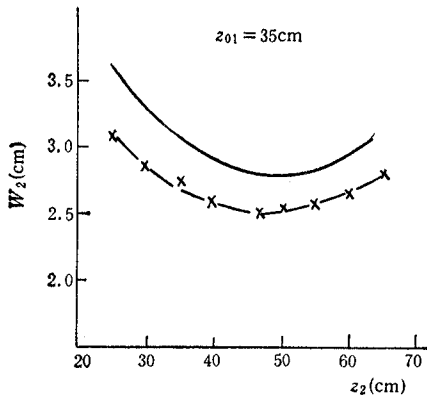


图 5 理论计算(实线)和实际测量(—×—)的 $W_2(z_2)$

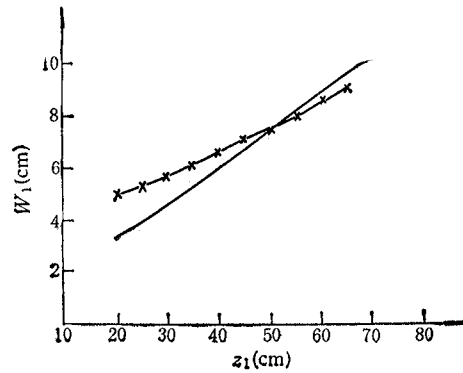


图 6 理论计算(实线)和实际测量(—×—)的 $W_1(z_1)$

3. 波束 $W_1(z_1)$ 的测量

测量 $W_1(z_1)$ 是为确定在满足 $W_1(z_1) < \frac{1}{2} r_1$ 时, 透镜的位置 z_1 的可变范围. 测量表明, 为满足上述关系式, $z_1 \leq 40\text{cm}$. 从图 6 可以看出, 当 $z_1 < 25\text{cm}$ 时, $W_1(z_1)$ 的测量值与理论计算值偏差较大. 这主要是在天线附近波阵面的相位不均匀引起的.

当波腰 W_{02} 的位置 z_{02} 确定后, 共焦腔的焦点位置应与波腰位置重合. 有关波纹壁圆锥号角天线的其他特性例如 E 面、H 面的方向图, 增益, 带宽的测量是必要的, 但在此不作介绍. 透镜焦距的测量可以用测 $W_2(z_2)$ 的办法或光学方法来进行, 结果与计算值很接近. 我们采用 TPX 材料做透镜, 折射系数为 1.44, 厚度 4.80cm, 直径 20cm, 计算焦距为 25cm.

五、结束语

将 K_a 波段准光学系统用于 HT-6B 托卡马克中, 可得到空间分辨尺度为 5.0cm (即

波腰的直径)。在诊断窗口的波束直径为 5.9cm。如采用一般的矩形角喇叭天线(口径尺寸: $5 \times 6\text{cm}$),在诊断窗口的波束宽度为 6.8cm,而在真空室中心的分辨尺度由于电磁波在环形真空器壁多次反射已失去意义。关于采用此类系统后,隔离度的提高可参阅文献 [1,2]。

本系统的加工得到了刘玉坤,孙燕同志的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王兆申, 科学通报, **19**(1983), 1166.
- [2] 王兆申, 物理学报, **32**(1983), 1323.
- [3] C. X. Yu, et al., *Plasma Physics and Controlled Fusion*, (to be published).
- [4] Z. S. Wang, et al., *Bulletin of the American Physical Society*, **26-8**(1981), 6022.
- [5] J. B. Wilgen, et al., *Bulletin of the American Physical Society*, **28-8**(1983),
- [6] 王兆申、沈学民, 第二届全国毫米波亚毫米波会议论文集, (1983), 443.
- [7] H. Kogelnik, T. Li, *Proc. IEEE*, **10**(1966), 1312.
- [8] I. Ohtera, H. Ujiie, *IEEE Trans. on AP*, **AP-23**(1975), 858.
- [9] S. K. Heald, C. B. Wharton, *Plasma Diagnostics with Microwave*, New York, 1966, 330.
- [10] J. C. Mather, *IEEE Trans. on AP*, **AP-29**(1981), 967.

DESIGN AND MEASUREMENT OF QUASI-OPTICAL MILLIMETER WAVE SYSTEM FOR PLASMA DIAGNOSTICS

Shen Xuemin Wang Zhaoshen

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei*)

ABSTRACT By means of quasi-optical method, the spatial resolving power of millimeter wave receiving system which is used in plasma diagnostics has been greatly improved. In this paper the formulas and procedures for designing a millimeter wave quasi-optical receiving system are presented and some measured results are given.

KEY WORDS Millimeter wave; Quasi-optics; Plasma diagnostics