

准光学接收系统隔离度的理论极限问题

王 兆 申 曹 永 君

(中国科学院等离子体物理研究所)

1982 年 11 月 22 日收到

提 要

本文探讨了准光学接收系统用于等离子体诊断时其隔离度的理论极限问题。推出了在真空室和接收系统之间存在弱耦合时隔离度的近似计算公式。

一、引 言

在聚变装置的等离子体辐射诊断中,辐射体常处在封闭空腔中(真空室),我们通过诊断窗口接收其电磁辐射。图 1 表示通常的接收方式,其中虚线表示天线的波束截面。尽管天线的增益很高,在波束以外的等离子体的辐射,以及在波束以内的等离子体朝天线以外方向的辐射,仍能通过封闭腔的多次反射而进入天线。这使接收系统丧失了原有的空间分辨力(或隔离度下降),且带来了所谓的“去偏振”效应,而使利用等离子体辐射(诸如电子回旋辐射、韧致辐射)诊断等离子体参量变得十分困难。

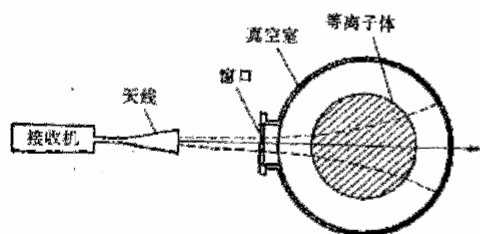


图 1

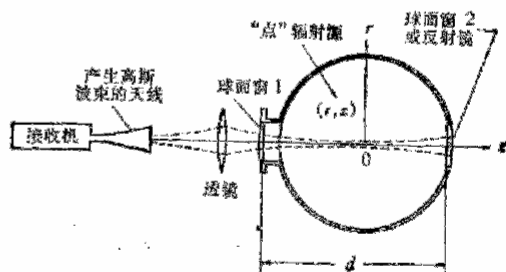


图 2

图 2 表示一准光学接收系统,其特点是用两个球面窗构成共焦腔结构,虚线表示天线辐射的高斯型波束。采用这种准光学接收系统后,隔离度可大大提高^[1]。本文探讨对一个给定系统,隔离度的理论值可达多少。这对我们设计这种系统以及在诊断实验中采取什么措施以改善隔离度均有指导意义。

为了讨论方便,我们在图 2 的系统中引入一“点”辐射源,它辐射各向同性非相干波或相干长度远小于空腔尺寸的波。当点源位置在 (r, z) 时进入天线的功率是 P_{rs} ,我们定义隔离度 ID 为

$$ID = P_{0z}/P_{rs}, \quad (1)$$

其中 P_{0z} 即表示 $P(0, z)$, 以下 r 均取在波束半径之外。我们的问题即求解给定系统的

ID 的理论值.

二、激励度和激励场

我们用电磁互易原理来处理这个问题. 如果把图 2 中的接收天线用作为发送天线, 而发射源辐射与“点”源类似的电磁波(非相干波), 则在空腔中 (r, z) 点激励电磁场, 其电场强度的平方的时间平均值表为 E_{rz}^2 , 根据互易原理可以证明:

$$P_{rz} = kE_{rz}^2, \quad (2)$$

其中 k 对一给定系统而言为一常数. 将(2)式代入(1)式, 则定义(1)式可表示为

$$ID = E_{0z}^2/E_{rz}^2. \quad (3)$$

实际上 E_{rz} 和 P_{rz} 都是由两部分组成的:

$$\begin{aligned} E_{0z}^2 &= E_{0z}'^2 + E_{0z}''^2, & E_{rz}^2 &= E_{rz}'^2 + E_{rz}''^2, \\ P_{0z} &= P_{0z}' + P_{0z}'' = kE_{0z}'^2 + kE_{0z}''^2, \\ P_{rz} &= P_{rz}' + P_{rz}'' = kE_{rz}'^2 + kE_{rz}''^2. \end{aligned}$$

这里“'”表示直接辐射的电场或直接接收到的功率, “''”表示经由封闭腔反射的. 显然 E_{0z}'' 和 E_{rz}'' 的大小取决于两个因素: 1) 空腔和波束之间的耦合. 这里耦合是由波束在窗口处的衍射引起的; 2) 空腔的形状及腔壁的反射率. 对于高斯型波束, E_{rz}' 随 r 按指数衰减. 若窗口处的衍射很小但仍不能忽略时, 对 $r > 1.5w(z)$, ($w(z)$ 是 z 平面处的波束半径), 下列关系式近似成立:

$$\begin{aligned} E_{rz}'^2 &\ll E_{rz}''^2 \rightarrow E_{rz}^2 \approx E_{rz}''^2, \\ E_{0z}'^2 &\gg E_{0z}''^2 \rightarrow E_{0z}^2 \approx E_{0z}'^2. \end{aligned} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得

$$ID \approx E_{0z}'^2/E_{rz}''^2. \quad (5)$$

以下就只讨论这种实际上常遇到的(例如在毫米波段或远红外波段的诊断接收系统中)弱耦合情况.

由于实际的封闭腔很复杂, 要严格计算出 E_{rz}'' 的值是困难的, 对我们来说也没有必要. 注意到空腔尺寸远大于波长, 所以其中存在大量共振模, 只要空腔可看成是接近封闭的, 腔壁反射率足够高, 那么波束耦合到空腔的辐射会受到腔壁多次反射, 各共振模会受到均匀的激励. 同时因为 E_{rz}'' 是各模式电场的叠加, 结果使 E_{rz}'' 在空腔中接近均匀分布, 而其偏振态接近随机态, 这一事实已在我们的实验中得到证明. 下面的计算即以此为基础.

三、激励电场和隔离度的计算

1. 激励功率

当空腔尺寸远大于波束尺寸和波长时, 可认为波束激励空腔的功率等于波束在两窗口处的衍射损耗功率. 按共焦腔理论, 对 TEM_{00} 模高斯波束由有限口径的透镜或反射镜引起的衍射损耗为^[2]

$$\alpha_D \approx 2\pi(8\pi N)e^{-4\pi N} \left[1 + \frac{1}{2\pi N} \right], \quad (6)$$

其中 $N = a^2/(\lambda d)$ 称菲涅耳数, a 为反射镜半径, d 为共焦腔腔长, λ 为波长. α_D 的定义为损耗功率与波束入射功率之比.

TEM_{00} 模高斯波束的电场强度与 r 的关系为^[3]

$$E'(r, z) = E'_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right), \quad (7)$$

其中 E'_0 即 $E'(0, 0)$, w_0 为波腰半径, $w(z)$ 为 z 处的波束半径 (见图 2).

当波束发散角很小时, 波束波阵面可近似地处理为平行平面, 则波束入射功率可表为

$$P_T = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^a \frac{c}{4\pi} E'^2(r, z) r dr d\phi. \quad (8)$$

这里及以下各有关公式中均采用高斯单位制, 当 $a \geq 2w(d/2)$ 时, 上式积分中 r 的上限可近似认为是 $r = \infty$. 将(8)式积出得

$$P_T \approx \frac{\pi w_0^2}{2} \frac{c}{4\pi} E_0'^2. \quad (9)$$

于是对图 2 中两个球面窗的情况, 空腔激励功率 (按前假定等于衍射损耗功率 P_D) 为

$$P_C = P_D = \alpha_D P_T \approx \frac{\pi w_0^2}{2} \frac{c}{4\pi} E_0'^2 2\pi(8\pi N)e^{-4\pi N} \left[1 + \frac{1}{2\pi N} \right]. \quad (10)$$

2. 空腔储能与空腔损耗之比 W/P_{loss}

按前分析, 空腔中的电场接近均匀分布, 则空腔中储存的总电磁能 W 为

$$W = \int u dv = uv = \frac{1}{4\pi} E_{rs}''^2 v, \quad (11)$$

其中 u 为电场能量密度, 而空腔中空壁电导引起的单位面积损耗为^[4]

$$\frac{dP_{\text{loss}}}{dS} = \frac{J^2}{2\sigma\delta} = \left(\frac{c}{4\pi} H_{rs}'\right)^2 \frac{1}{2\sigma\delta} = \left(\frac{c}{4\pi}\right)^2 E_{rs}''^2 \frac{1}{2\sigma\delta}, \quad (12)$$

其中 J 为腔壁面电流密度, σ 为腔壁电导, δ 为趋肤深度, H_{rs}' 为腔中激励的磁场强度, c 为光速, 腔体的总损耗

$$P_{\text{loss}} = S \frac{dP_{\text{loss}}}{dS} = S \frac{1}{2\sigma\delta} \left(\frac{c}{4\pi}\right)^2 E_{rs}''^2, \quad (13)$$

其中 S 为空腔的总内表面积. 将(11)式除以(13)式得

$$\frac{W}{P_{\text{loss}}} = \frac{1}{c} \frac{V}{S} \left(\frac{32\pi\sigma}{\mu_c \omega}\right)^{1/2}. \quad (14)$$

其中 μ_c 为腔壁材料的导磁率, 而

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{4\pi}} \left(\frac{2}{\mu_c \omega \sigma}\right)^{1/2}. \quad (15)$$

3. 空腔中电场强度 E_{rs}'' 的计算

由于假设空腔是接近封闭的, 则可近似认为波束激励空腔的功率 P_C 最后全部耗散在

空腔腔壁上, 可将(11)式改写如下:

$$E''_{rs} = 4\pi \left(\frac{W}{P_{\text{loss}}} \right) \cdot P_{\text{loss}} \cdot \frac{1}{V} = 4\pi \left(\frac{W}{P_{\text{loss}}} \right) \cdot P_c \cdot \frac{1}{V}. \quad (16)$$

将(14), (10)式代入上式可得

$$E''_{rs} = \left(\frac{32\pi\sigma}{\mu_c\omega} \right)^{1/2} \frac{\pi w^2(z)}{2S} \left\{ 2\pi(8\pi N) e^{-4\pi N} \left[1 + \frac{1}{2\pi N} \right] \right\} E''(0, Z), \quad (17)$$

其中利用了由(7)式推得的关系式 $E'_0 w_0 = E'(0, z) w(z)$. 将(17)式代入(5)式并取对数可得

$$\begin{aligned} 10 \lg ID = 10 \lg \left(\frac{S}{\pi w^2(z)/2} \right) + 10 \lg \left(\frac{\mu_c\omega}{32\pi\sigma} \right)^{1/2} \\ + 10 \lg \left(\frac{\exp(4\pi N)}{2\pi(8\pi N) \left(1 + \frac{1}{2\pi N} \right)} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

四、讨 论

(18)式中第一项代表了面积比, 第二项反映腔体材料的影响, 第三项反映衍射效应的影响, 它的值随反射镜半径 a 的增大而急剧增大, 是提高隔离度的关键因素. 上述三项均是频率的函数.

为得到一些数值上的概念, 现以两种类型空腔为例进行计算, 并取 $a = 2w(d/2)$ (对共焦腔 $w(d/2) = (\lambda d/\pi)^{1/2}$), $f = 80 \text{ GHz}$.

对 EBT 的一段构成的封闭腔 (将 EBT 的一段的两端用金属板封闭), 小半径 $r = 25 \text{ cm}$, 长度 $l = 25 \text{ cm}$, 总内表面积 $S \approx 2\pi r^2 + 2\pi r l \approx 7854 \text{ cm}^2$, 腔壁材料为铝, 取 $\sigma = 3.54 \times 10^5 \text{ mho/cm}$, 代入(18)式得 $10 \lg ID = 27.49 - 18.76 + 45.94 = 54.67 \text{ dB}$.

对一 Tokamak 空腔, 小半径 $r = 15 \text{ cm}$, 大半径 $R = 45 \text{ cm}$, 腔体内表面面积 $S \approx 2\pi R \cdot 2\pi r \approx 26648 \text{ cm}^2$, 腔壁材料为不锈钢, 取 $\sigma = 4.88 \times 10^4 \text{ mho/cm}$, 代入(18)式得 $10 \lg ID = 39.77 - 14.39 + 45.94 = 71.3 \text{ dB}$.

对一个已设计和安装好的系统若仍希望隔离度有所提高, 由(18)式可见, 唯一的办法是增加空腔的损耗, 这可用放入吸收材料或开附加窗口的办法来实现.

一个实际接收系统的隔离度还取决于许多其它因素, 如系统的准直, 透镜的反射等. 当窗口半径 a 已足够大, 这些因素就会成为主要因素.

五、结 束 语

磁约束等离子体的电子回旋辐射理论预言了利用电子的回旋辐射诊断多种等离子体参量的可能性. 例如, 在 Tokamak 中, 可以诊断电子温度分布、电子密度分布和角向磁场分布等^[5]. 但在实际上, 由于聚变装置真空室壁对辐射的多次反射以及因此而导致的“去偏振”效应, 一般接收系统丧失了原先在自由空间中所具有的空间分辨力, 接收到的辐射

也失去了磁化等离子体辐射原有的偏振性,使诊断工作十分困难。就是在世界各国的
大型 Tokamak 中,等离子体柱中心电子回旋共振层虽然满足光厚条件,但用通常的接收系
统仍观察到严重的“去偏振”效应。这可能是因为光厚的等离子体层只限制了来自天线对
面的器壁反射,而来自其余方向的辐射和器壁反射仍能进入通常的接收系统。所以迄今
为止,理论预期的诸项诊断目标,除第一项取得相当进展外,其余各项均未能实现。能否
找到一个接收系统,它在金属空腔包围的装置中仍具有足够好的空间分辨率? 准光学系
统的研制就是在这种情况下开始的。

在系统的实验研制过程中,尽管采取了多方面措施,但系统的隔离度长期停留在一个
低水平上,这使我们产生了一个问题: 这种系统隔离度的理论极限到底是多少? 本文就
是对这一问题进行分析的结果,它将特别有助于微波和远红外等离子体诊断工作者正确
设计准光学接收系统,而不论系统是用于电子回旋辐射接收,散射仪还是干涉仪中。

参 考 文 献

- [1] 王兆申,科学通报,待发表.
- [2] T. Li, *The Bell System Technical Journal*, 5(1965), 917.
- [3] H. Kogelnik and T. Li, *Proceedings of the IEEE*, 54(1966), 1312.
- [4] John, D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, (1975), p. 339.
- [5] F. Engelman and M. Curatolo, *Nuclear Fusion*, 13(1973), 479.

THE THEORETICAL LIMIT OF ISOLATION DEGREE OF A QUASI-OPTICAL RECEIVING SYSTEM

WANG ZHAO-SHEN CAO YONG-JUN

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

ABSTRACT

In this paper, we discussed the problem on the theoretical limit of isolation degree of
a quasi-optical receiving system used for plasma diagnostics. We deduced a formula which
predicts the approximate value of the isolation degree for a receiving system which is weakly
coupled with a vacuum chamber.