

用于高功率微波测量的电磁探针研究*

李永忠 张亚洲 赫崇峻

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 叙述了一种用于高功率微波峰值功率测量的电磁探针的基本原理及结构设计,给出了电磁探针设计的理论数据以及标定方法和标定结果。该探针具有承受微波功率高,密封好,结构简单,使用方便等优点。为高功率微波峰值功率测量提供了一种有效实用的技术手段。

关键词 电磁探针, 高功率微波

分类号 O441.5

Investigation of Electromagnetic Probe for Measurement of HPM

Li Yongzhong Zhang Yazhou He Chongjun

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The fundamentals and structure of an electromagnetic probe for measurement of HPM is described in this paper. The design's theoretical data and calibration procedure and the results of this kind of probe are given. It is characterized by its capability of carrying much higher power of microwave, good airtightness, simple structure and easy operation. It is an effective and practical way to measure the peak power of HPM.

Key words electromagnetic probe, HPM

由于高功率微波(HPM)源具有峰值功率大(GW量级)、脉冲持续时间短(一般为几十ns)、多数工作在单次状态及测量环境电磁干扰强等特点,国内外高功率微波峰值功率测量一直存在测量不准的问题(一般认为,在量级内准确),其主要原因是必须对微波功率进行近百dB的衰减,以达到测量仪器的可测范围之内,这样,准确地测定其衰减分贝数显得十分重要。一般地可通过喇叭天线接收微波源的辐射场来测定微波功率。但是由于微波功率须通过一定距离的空间辐射,不能被喇叭接收,而空间场易受环境影响,以及空间衰减的不稳定,使最终测量结果受到影响。为此我们在用于传输高功率微波的波导上(一般为圆波导),设计安装了一组电磁探针,从波导里的高功率微波能量中耦合出一小部分,通过确定其耦合度来测定微波功率,避免了微波场的空间传输。

1 电磁探针的工作原理及构成

1.1 圆波导内的场分布

选用虚阴极二极管作为微波激励装置,产生的高功率微波通过圆波导传输。由于电子和虚阴极在圆波导的轴向反射和振荡,产生的微波为 TM_{0n} 模,故波导横截面上的场分布为

$$\begin{cases} E_z(r, \varphi, z) = E_0 J_0\left(\frac{x_{0n}}{R} r\right) \\ E_r(r, \varphi, z) = -\frac{j\beta R}{x_{0n}} E_0 J_0\left(\frac{x_{0n}}{R} r\right) \\ H_\varphi(r, \varphi, z) = -\frac{j\omega\epsilon R}{x_{0n}} E_0 J_0\left(\frac{x_{0n}}{R} r\right) \\ E_\varphi = H_r = H_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

* 1999年3月3日收稿

第一作者:李永忠,男,1968年生,讲师

式中 R 为圆波导的截面半径。在波导壁上, 电场切向分量应为零, 即 $E_z|_{r=R} = 0$, 故电场只有半径 r 方向分量, 磁场只有圆周 φ 方向分量。

1.2 电磁探针测量高功率微波的原理

电探针内导体表面感应电荷为

$$Q = A_E \epsilon E_r \quad (2)$$

感应电流为

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = j\omega \epsilon A_E E_r(t) \quad (3)$$

则电探针上耦合出的功率为

$$P_E = \frac{1}{2} |I|^2 Z_0 = \frac{Z_0}{2} (\omega \epsilon A_E E_r)^2 \quad (4)$$

对于磁探针, 由于穿过探针线圈横截面的磁通 Φ 发生变化, 在探针两端将产生一个感应电动势

$$V_H = - \frac{d\Phi}{dt} = - A_H \mu \frac{dH_\varphi}{dt} = \omega \mu A_H H_\varphi \quad (5)$$

式中 A_E 、 A_H 分别为电探针和磁探针的有效面积, ω 为微波频率, Z_0 为探针端接阻抗。如果 A_E 、 A_H ^[1] 为已知, 就可由测得的耦合功率 P_E 和感应电动势 V_H , 算出波导中电磁场的分布 E_r 和 H_φ , 进而由 E_r 和 H_φ 算出波导中传播的微波功率。

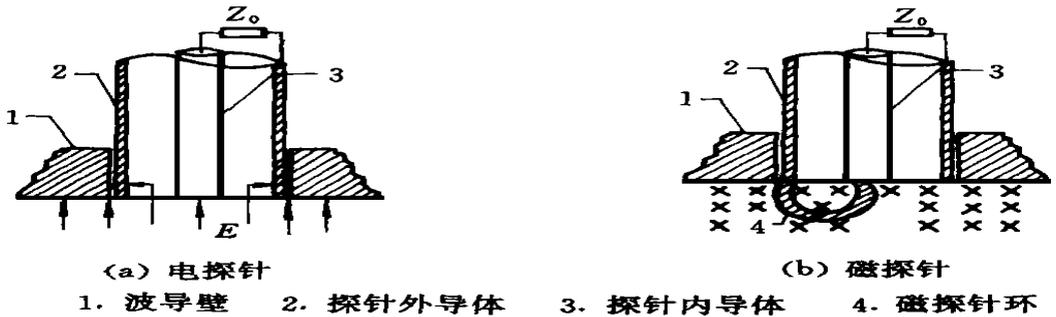


图1 电磁探针结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electromagnetic probes

1.3 电磁探针的实验布置及结构设计

见图 1, 为了便于与探针测量线相连, 把探针设计成同轴结构。同时为了减少探针对波导中场结构的扰动, 应尽量使探针的尺寸小, 可把电探针做成平探针结构。即其内导体端面与波导壁平行, 磁探针端面则以一金属小环相连, 其截面与波导轴向平行。另外探针的尺寸设计还遵循下列原则^[2]: (1) 在给定工作频带内只传输 TEM 模; (2) 满足功率容量要求; (3) 损耗最小。依照此要求, 可选择探针内导体半径 a 为 2.2mm, 外导体半径 b 为 5mm, 圆环半径为 1.5mm, 特性阻抗为 $Z_c = 50\Omega$ 。

在实验中, 电磁探针获取微波信号的位置如图 2 所示, 即在圆波导口面附近的波导壁上对称地安装两组电探针和磁探针。探针与波导的连接处, 采用了高压密封接头设计^[3]。这样电磁探针从圆波导中耦合出一小部分微波能量, 经过衰减器, 衰减到一定的范围, 再经过检波器检波, 输入到示波器中, 就可得到一定的峰值电压值。依照前面的推导, 由峰值电压值就可求出探针处的电磁场分布, 进而可求出圆波导中传输的微波功率。

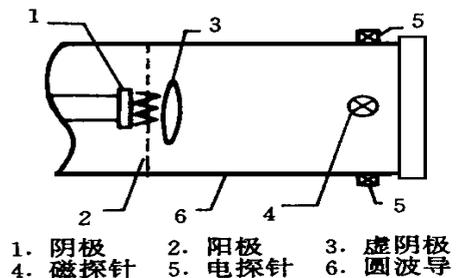


图2 探针的实验布置

Fig. 2 Arrangement for the probes

2 电磁探针性能测试及实验结果

2.1 微波源的模拟

为了使探针测量结果可信,需要对测量系统的各个部分进行细致的标定,其中最主要的是对探针耦合度的标定。而直接用虚阴极二极管式的微波振荡器作标定源,显然是不行的,需要设计一个能够模拟二极管中虚阴极振荡激励微波过程的源,这是标定中的困难所在。为此在二极管的阳极位置处,安装一个如图3所示的激励装置,通过电缆与微波信号发生器相连,这样在圆波导中可以模拟建立 TM_{0n} 模场结构。

2.2 探针耦合度的标定

从前面的分析可知,微波功率可通过探针耦合出一部分能量,经过衰减器衰减到一定范围后,再经检波输出峰值电压包络。通过现场标定,使用微波信号发生器激励图3所示装置,由示波器上所得电压包络,就可确定探针的耦合度,从而确定波导中传输的微波峰值功率。其计算公式为

$$P = (V/K) 10^{(A+B+C)/10} \tag{6}$$

其中 V 是检波包络的峰值电压(mV), K 是检波器的灵敏度(mV/mW), A 是探针的耦合度, B 是衰减器的衰减量, C 是测试系统其它部分的衰减量。

以 HP83752B 为信号源,以 HP8563E 频谱仪为记录设备,当输入功率为 17dBm,信号频率为 3.0GHz 时,测得电探针耦合度为 61.1dB,磁探针耦合度为 42.8dB。理论计算值为电探针耦合度为 60.2dB,磁探针耦合度为 41.3dB。理论值比标定值略小,这是由于探针引起所在处的场结构发生局部畸变,从而增大了探针的有效面积所致。

2.3 典型实验结果

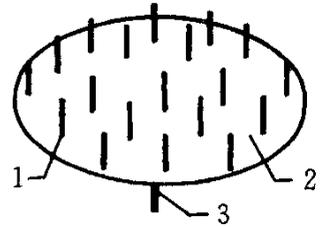
在脉冲功率调制系统上,我们同时使用电磁探针和远场喇叭测量虚阴极二极管所产生的微波功率,得到了较为一致的结果。如图4所示。

3 结论

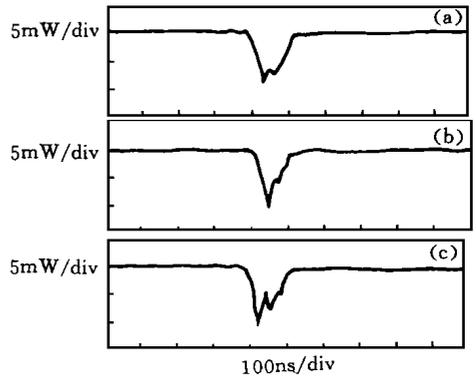
由以上标定和实验结果可看出,所设计的电磁探针具有承受微波功率高,密封好,结构简单,使用方便等特点。与喇叭天线测量方法配合使用,可互相补充,互相验证,为高功率微波峰值功率测量提供了一种有效实用的技术手段。

参考文献

- 赫崇峻等. 用有限元法计算耦合探针的有效面积. 高功率微波测试与天线技术论文集, 1992
- 姚德森等. 微波技术基础. 北京: 电子工业出版社, 1989
- 刘金亮等. 一种密封高频接头的研制. 强激光与粒子束, 1994



1. 铜针 2. 圆铜板 3. 电缆引线
图3 虚阴极的模拟
Fig. 3 Simulated vircator



(a)电探针信号 (b)磁探针信号 (c)天线测量信号

图4 功率测量波形
Fig. 4 Power waveform