

文章编号: 1001-4322(2004)01-0077-04

# 高功率微波辐射场功率密度测量系统\*

屈 劲, 刘庆想, 胡进光, 余 川

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 根据功率密度大、脉冲短、形状不规则的特点, 研制出一种能适应各种条件下使用的高功率微波功率密度测量装置。从已有的测量手段出发, 比较其不同原理和适用性, 选定了峰值检波法。根据实际工作需要, 着重从结构及测量的可靠性、降低系统误差等方面, 进行优化设计。该装置采用矩形波导和可靠性高的耦合衰减, 利用示波器进行测量。最后详细地给出了测量系统的标定方法。

**关键词:** 测量系统; 辐射场; 功率密度; 高功率微波

**中图分类号:** TM931 **文献标识码:** A

在高功率微波研究中, 诊断是必不可少的。而功率的测量, 包括脉冲形状的测量, 在诊断工作中占有非常重要的地位。本工作设计一种误差较小, 结构紧凑, 工作稳定可靠的高功率微波辐射场功率密度测量系统, 这对于高功率微波研究, 具有非常重要的意义。

## 1 结构与原理

微波辐射场功率密度测量系统包括: 接收器、接收变换器、测量装置、读数装置 4 个部分。

在测量系统中, 导波系统部分对于测量的准确度起着至关重要的作用。对于导波系统, 应解决匹配问题、连接问题和泄漏问题。对于同轴系统, 其接头对于驻波比的增大有很大贡献, 容易带来很大的失配误差, 也容易产生泄漏、重复性不良等问题。尤其当采用挠性同轴线时, 由于挠性同轴线的衰减与其弯曲程度有关, 会带来较大的系统误差。而波导的电性能以及连接处的重复性都较好。因此, 采用金属波导的导波系统, 将大大降低匹配、连接和泄漏等因素带来的误差<sup>[1]</sup>。

高功率微波脉冲的特点在于峰值功率高, 脉冲短, 而且脉冲形状常常不规则, 因此要求测量系统响应快。如果要借助较为成熟的低功率微波测量方法, 则要求将高功率微波脉冲可靠、线性地衰减。

对于短脉冲微波功率的测量, 选择了最为成熟的峰值检波法<sup>[2]</sup>。随着半导体技术的发展, 出现了低势垒二极管, 这种宽带匹配检波器在结实性和一致性上都较原来的点接触二极管有了较大提高, 完全能满足微波脉冲功率的测量需要, 成为近年来一种主要的微波功率测量器件。

晶体管检波器通常做成同轴器件。如果采用波导做主要的导波系统, 必然要涉及到波导-同轴的转换问题。若在波导导波系统终端采用波导-同轴转换器, 由于驻波比难于做得非常好(相对吸收负载而言), 将不可避免地形成反射。在采用天线作接收装置时, 由于天线驻波比较大, 容易形成多次反射, 其效率最高仅为 60%。同时, 驻波问题以及需要较大的衰减量的问题, 都会给测量带来不可消除的系统误差, 因此确定采用探针法进行测量。为了减小误差, 在波导上相隔  $\lambda/4$  处设两个探针。这种装置对于较窄频段内(小于 10%)工作时, 在两个探针上分别检波, 并将信号叠加, 可以减小误差, 这是由于双探针结构可以改善探针耦合支路给波导传输线带来的不匹配, 而且这种结构对于波导内的驻波的测量更准确。最后, 在波导末端加上一匹配负载。微波测量系统结构如图 1 所示。

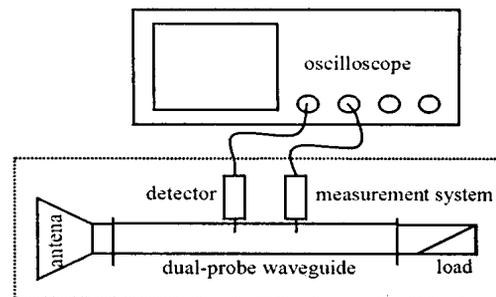


Fig. 1 Measurement system for power density of HPM radiation field

图 1 微波辐射场功率密度测量系统结构图

最后, 在波导末端加上一匹配负载。微波测量系统结构如图 1 所示。

\* 收稿日期: 2003-03-14; 修订日期: 2003-08-26

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 屈 劲(1974—), 男, 硕士研究生, 研实, 从事高功率微波研究, 绵阳 919-1016 信箱。

## 2 参数选择

### 2.1 检波管

以往,微波检波主要用点接触式硅二极管(SCD),它灵敏度高,结点电容小,串联电阻小,但结构脆弱,特性分散性大,稳定性差,只能指示微波电平相对大小。后来出现了肖特基二极管(SD)或称热整流子二极管,需加约 200mV 的正向启动偏压,而低势垒肖特基二极管(LBSD)或称低势垒热载流子二极管(LBHCD)可以完全代替点接触式二极管,充当低电平检波器使用,性能明显提高,同时适应宽频带使用的要求。

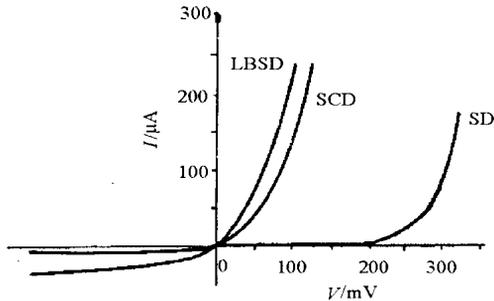


Fig. 2 Characteristic  $I-V$  curves of three kind of diode

图 2 普通肖特基二极管与点接触二极管以及低势垒肖特基二极管  $I-V$  特性曲线的比较

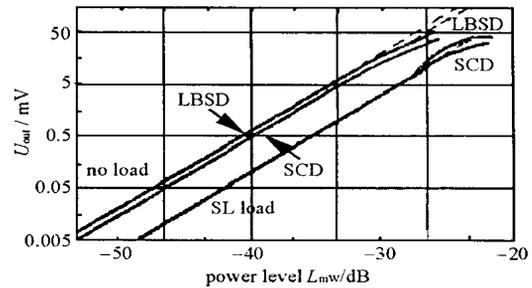


Fig. 3 Detecting curves of low base Schottky coaxial diode and spot-contact coaxial diode

图 3 低势垒肖特基二极管及点接触二极管的检波性能比较

由于低势垒管一致性较好,便于对其驻波比及频响设计比较复杂的补偿电路,共同安装在同轴支座内。在无偏置小信号检波时,工作区域位于原点附近,小信号输出支流分量与非线性  $R_0$  上交流电压的平方成正比(平方律检波)。以 HP 公司的 8470B 为例,频率范围从 10MHz ~ 18 GHz,驻波比小于 1.4。在我们的设备中,采用的是通过式功率测量法,可以不考虑驻波比的影响。连续波下灵敏度大于 0.5mV/ $\mu$ W(输入功率大于 -60dB)。对于不同的占空比,输出信号的幅度会有所不同,应以实验校准为准。频响较好,平方律检波范围最大值约为 -20dB,(必要时可加上平方律负载(约数十 k),使其扩展至 -10dB,平方率检波范围下限受系统噪声限制)。而示波器应为高阻接收。由于微波信号太弱时,检波器信号可能被噪声湮没,(以 TDS784 为例,测量功率不能小于 1mV),故必须使输入信号不得小于 -30dB。在一般情况下,检波的线性度要求不高时,普通晶体检波管可以满足使用要求。当工作在线性检波范围时,输入功率可以较高,输出电压可高至百 mV。

### 2.2 波导及耦合探针

对于不同的工作频率,我们选用不同规格的波导。接收器采用易于与矩形波导匹配及连接的角锥喇叭天线。接收信号在矩形波导内主模为  $TE_{10}$  模,这也便于使用电压探针进行耦合测量。为减少波导连接处的损耗和泄漏,应采用带扼流槽的法兰盘。

探针包含有变换器和耦合元件,耦合元件的尺寸在微波的传播方向上小到可以忽略不计。探针对导波系统内场的影响、引入的损耗和反射通常都很小。当导波系统上出现驻波时,由于探针沿波导的场分布产生响应,所以会使测量产生误差,因此使用彼此相距  $g/4$  的双探针装置(如果要进行信号合并,要求接双探针的检波器的输出电缆长度应相差  $g/4$  以满足同时性的要求),可以对其分别检波后相加,进行校准后能大大减小此类误差,同时还可以压制噪声。波导长度选为  $2.25 g$ ,这里的  $g$  为导波波长。

$$g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / c)^2} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为自由空间中的波长;  $c$  为波导截止波长。对于矩形波导中的主模  $TE_{10}$ ,有

$$g_{,10} = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2} \quad (2)$$

式中:  $a$  为选定的波导宽边尺寸。

由于实际使用的频率点不会很多,所以可以分别加工不同长度及双探针装置的波导以满足需要(亦可考虑探针采用测量线的结构),以消除频带宽度带来的误差。对于矩形波导中的  $TE_{10}$  模,波导中心处场强最大,故探针自宽边中心伸入。探针耦合度通常可以可靠地降低至 -60 ~ -70dB。在这种耦合度下,探针没有伸入波导内,对微波在波导内的传输影响更小。

### 2.3 负载

以检波管的功率级  $L_{mW}$  要求为 - 20dB , 探针耦合度为 - 60dB 计算 , 波导导系统功率级  $L_{mW}$  为 40dB , 可见 , 一般膜片式吸收负载即可满足需要 , 此类负载驻波比一般为 1.02 ~ 1.05 , 反射非常小。要求更大的功率容量时 , 采用镀膜工艺制作的膜片 , 或者直接使用碳化硅作吸收体 , 都可以满足使用要求 , 驻波比也可以达到此水平。

### 2.4 天线

普通角锥喇叭天线便于与波导连接 , 因而成为首选目标。我们计算天线的接收功率 , 在阻抗匹配 , 极化匹配以及收发天线对准的情况下 , 由弗里斯传输公式

$$P_r = (\sqrt{A_e / 4\pi r^2})^2 P_t G_t G_r \tag{3}$$

式中 :  $P_r, P_t$  分别为接收 , 发射功率 ;  $G_r, G_t$  分别为接收 , 发射天线增益 ;  $r$  为距离。接收天线口面处功率密度为

$$P = (P_t / 4\pi r^2) G_t \tag{4}$$

故有

$$P_r = (A_e / 4\pi r^2) P G_r \tag{5}$$

对于角锥喇叭天线 , 在远场区认为电磁波是平面波 , 忽略欧姆损耗下 , 最佳角锥喇叭的口面利用系数约为 50 %<sup>[3]</sup> , 因此有

$$G_r = (4\pi / \lambda^2) (1/2) S \tag{6}$$

式中 :  $S$  为天线口面面积 , 故有

$$P_r = \frac{1}{2} S P \tag{7}$$

在需要测量大功率密度的情况下 , 有 3 种适用方法 : (1) 在天线后加波导衰减器 ; (2) 在天线后加定向耦合器 ; (3) 减小探针耦合度。在调整探针耦合度时 , 应考虑负载的功率容量。衰减器可采用回转式 , 在衰减量仍达不到要求或功率容量不足时 , 可在前面加装吸收式固定衰减器。对于探针 , 可以考虑做成分段式的 , 同时结合小范围耦合度可调的波导-同轴转换器 , 以适应测量不同功率的需要。

## 3 测量系统的标定

测量系统的标定是由天线及耦合转换读数两部分分别进行的。检波器及双探针波导应预先标定 , 检波器的标定涉及其工作的平方律(或线性)范围 , 以及检波曲线与平方律(或线性)的偏离程度 , 也可以制作标定曲线进行校准 ; 双探针波导的标定包括测量其耦合度及两探针耦合度是否相同 , 还应考察其驻波比。实验中若使用了衰减器 , 则也应对其进行标定。

### 3.1 检波器

在对检波器进行标定时 , 必须注意 : 微波信号占空比不同时 , 检波器的效率会有所不同。同样 , 脉冲宽度也会影响检波器输出信号的幅度。因此 , 标定时应尽量使脉冲宽度和重复频率与实际使用时的情况一致 , 当然微波频率应与使用时一致。标定装置如图 4 所示。

微波源输出的微波信号通过可变衰减器衰减 , 再经功分器平均分为两路 , 一路由待校检波器检波 , 用示波器观测其检波信号 ; 另一路由标准功率计测量。我们绘出标定曲线 , 同时给出其平方律(或拟使用的线性检波)范围。

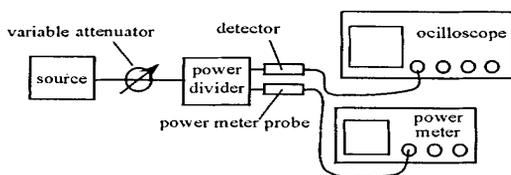


Fig. 4 Experimental setup for diode calibrating

图 4 检波器的标定装置

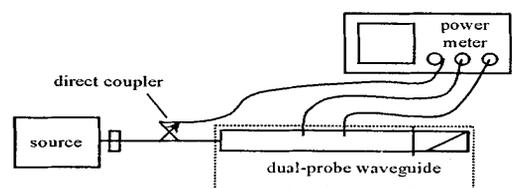


Fig. 5 Measurement setup for coupling coefficients of probes

图 5 波导耦合度的测量装置

### 3.2 带双探针的波导

波导耦合度测量装置如图 5 所示。微波源输出的信号通过带定向耦合器的波导连接在待校双探针波导

上,并在末端加上吸收负载。用标准功率计同时测量定向耦合器辅线及两探针耦合出的功率,即可计算出探针的耦合度。标定时,应预估探针的耦合度,选择尽可能与其接近的定向耦合器,以便减小读数误差。当然,直接使用网络分析仪进行标定是最好的选择。

### 3.3 耦合转换读数部分

装置如图6所示。微波源的信号经定向耦合器主线传至测量系统的双探针波导,定向耦合器辅线的信号由标准功率计测出,同时读出示波器上两路信号之和,即可绘出测量系统的标定曲线。根据此曲线,也可以看出平方律检波(或线性检波)范围内平方律检波(或线性检波)的误差。

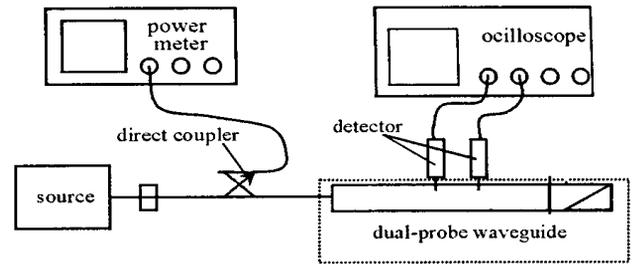


Fig. 6 Experimental setup for calibrating of coupling-reader unit

图6 耦合转换读数部分标定装置

### 3.4 天线

天线增益测量方法有比较法和绝对法,而绝对法测量增益又有双天线法、镜像法和三天线法。若测出其增益为  $G_r$ ,则其最大有效口径为  $^2 G_r/4$ 。

### 3.5 衰减器

衰减器衰减量的测量方法通常有功率比法、替代法、阻抗法、自校准法、扫频法等。利用矢量网络分析仪或标量网络分析仪加扫频源,可以方便地进行扫频测量。对于精密制造的回转式衰减器,其衰减量由下式确定:

$$A = -40 \lg \cos \theta + A_0 \quad (8)$$

式中  $A_0$  为旋转角度为零时的衰减量。这样,可以方便地调整衰减量以满足需要而不必多次校准。但是精密制造的回转式衰减器造价较高。

## 4 结论

本微波辐射场功率密度测量系统结构紧凑、坚固,工作稳定可靠,工作范围大,经过校准后误差小,使用方便。如果系统所处环境的微波功率密度比较大时,微波可能从检波器输出的接头处耦合,从而干扰检波器的正常工作。这一点可以根据应用中的具体情况,采取必要的屏蔽措施加以解决。

### 参考文献:

- [1] 柯林 R E. 微波工程基础[M]. 北京:人民邮电出版社,1981. (Corlin R E. The elements of microwave engineering. Beijing: Posts and Telecom Press, 1981)
- [2] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京:国防工业出版社,1991. (Tang S X. Measurement of Microwave. Beijing: National Defense Industry Press, 1991)
- [3] 刘克成,宋学诚. 天线原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1989. (Liu K C, Song X C. Principles of Antenna. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1989)

## Measurement system on power density of high power microwave radiation

QU Jin, LIU Qing-xiang, HU Jin-guang, YU Chuan

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1016, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A measurement system on power density of high power microwave radiation is presented. The system is based on peak detecting diode, waveguide system, and power decrease structure. The system is focused on low-error and the stability of structure. Calibrating Methods are also presented. The system is suitable for many occasions.

**Key words:** Measurement system; Radiation; Power density; High power microwave (HPM)