

# 微波技术基础

(六)

一九七六年一月

# 目 录

第七章 微波测量 .....	1
前言 .....	1
一、为什么要进行微波测量 .....	1
二、微波测量的基本特点 .....	1
§ 1 微波基本测试系统 .....	2
§ 2 微波讯号源 .....	14
一、反射速调管的类型与结构 .....	15
二、反射速调管的工作原理 .....	18
三、速调管插座及速调管电源 .....	27
四、微波讯号发生器 .....	31
§ 3 微波测量线 .....	40
一、微波测量线的结构原理与要求 .....	40
二、测试误差及测量线的精度检查 .....	46
三、测量线晶体检波器的校正 .....	52
§ 4 驻波与阻抗的测量 .....	55
一、用测量线测驻波系数的方法 .....	56
二、阻抗的测量 .....	65
三、阻抗匹配技术 .....	69
§ 5 波长频率和 Q 值的测量 .....	70
一、用测量线测量波长 .....	71
二、用谐振波长计测量波长 .....	72
三、用比较法测频率——外差式频率计 .....	86

四、谐振式波长计的校正与检定 .....	90
§ 6 微波功率与衰耗量的测量 .....	97
一、微波功率的测量 .....	97
二、微波衰耗量的测量 .....	110
§ 7 天线方向图的测量 .....	122
一、天线方向图测量对场地的要求 .....	122
二、旋转天线法测试方向图所需设备 .....	124
三、旋转被测天线法的介绍 .....	125
四、测试方向图误差的分析 .....	126
附录一 节点宽度法公式推导 .....	126
附录二 节点偏移法公式推导 .....	129
附录三 几种微波元件衰耗量的测试或检定 .....	135
附录四 行波管与返波管的工作原理 .....	142

## 第七章 微波测量

### 前言

#### 一、为什么要进行微波测量

列宁说：“实践高于（理论的）认识，因为它不但有着普遍性的品格，而且还有直接现实性的品格”。微波传输线以及微波元件都是属于分布参数的电路，它用电磁场的结构代替了电路中的变化，用电场或磁场强度代替了电压和电流，用理论分析的方法来研究一些比较复杂的结构往往碰到很大的困难，而且有的分布参数的影响也不可能完全考虑进去，因此，不管在设计试制或维修时都需要通过测量来进行检验、调整，以便获得第一手资料。可见，微波测量是微波技术中的一个重要组成部分，因此较熟练地掌握微波基本测量技术，并熟悉主要测试设备及仪器，是进行工作所不可缺少的。由于微波技术在无线电科学研究和通信工程中愈来愈广泛的应用，因此，微波的测试设备与方法也是种类繁多、日新月异，但它的最基本的测量，如驻波的测量，频率的测量以及功率的测量等都是测量技术的基础，本章主要讲的就是这些最基本的测量技术。

#### 二、微波测量的基本特点

毛主席说：“……如果不研究矛盾的特殊性，就无从确定一事物不同于他事物的特殊本质，就无从出现事物运动发展的特殊的原因，或特殊的根据，也就无从辨别事物，无从区分科学研究的领域。”微波测量与低频测量不同之处如下所述：

1. 微波测量所用的元件大多是分布参数的，例如波长计，以及各种微导元件，针对不同的测量，采用不同的波导元件组成一条微波测量系统，测量的指示，是通过一部分波导元件（如晶体检波探头）把电场

或磁场变化的大小转化为低频电流，再用一般的指示仪表（如检流计或微安表）或设备（如测量放大器）指示出来。

2. 在微波测量中，被测的物理量改变了，因为在微波波段中，由于频率极高，各传输线及微波元件都属于分布参数电路，这时，电压与电流没有确定的意义，电压电流不易测出，如上所述，它只能作一种间接性的辅助指示，因此在微波测量中最基本的测量参量是驻波，功率和波长（或频率），其他的参量，如品质因数、衰减量、相移量等都是由这三个基本参量的测量结果而通过计算来确定的，因此，品质因数等这些参量又称为二次参量。

3. 微波测量的一些参量往往也通过仪器上的几何尺寸来确定的，如测波长时通过波长计上的测微螺旋读数来取得，测阻抗时通过测量线上的游标尺或千分表来取得读数，因此测量的准确度和精确度在很大程度上依赖于机械结构的精密度，一般微波测试设备的机械加工要求是十分严格的，在测量读数时也要仔细正确，此外，在微波范围内，由于某些参量不能直接测量，故常用间接的方法测量，如测量微波功率就是把微波功率转化为热能后进行测量的，测量阻抗也是通过测量驻波，再借助阻抗圆图来解决的。

总之，根据微波测量的特点，掌握一些微波的基本测量方法，是本章的主要任务。

## § 1 微波基本测试系统

微波测试系统是由微波信号源、各种波导元件，被测元件以及指示仪表设备所组成的，根据不同的测试任务，可以组成不同的测试系统，不管系统的组合有多少种，但它都有一个基本的测试系统，其中有几种



输出最大，通常也要调节反射电压，使速调管工作在其振荡范围（称为振荡区）的最大点附近，这可以由微波系统中的指示器指示出来。

图（7-1）中的三公分测试系统中的振荡源是直接应用装在速调管插座上的反射速调管产生的，常用的型号是K-19。速调管的供电由另外一部速调管电源所供给，速调管电源供给速调管的灯丝电压，负的反极电压，及正的加速极电压。有的电源上还附有简单调制用的方波及锯齿波。我们自制的速调管电源上还有两个电表，一个是指示反射电压的直流电压表，另一个是指示速调管阴极电流的直流毫安表。工作正常时，反极电压约在200伏左右，阴极电流约15~30毫安。速调管插座上的活塞是调节使得微波向负载方向传送的功率最大。

微波信号源有时使用工厂生产的微波信号发生器，它将速调管、速调管电源、调制部分，甚至于波长计功率计等都装到一个仪器内，使用起来就比较方便，例如型号为XFL-10型的是一个三公分信号源，型号为XFL-6B型的是一个五公分信号源。图（7-2）中五公分微波测试系统中所用的微波信号源是型号为XFL-6B型的微波信号发生器，五公分测试系统的组合与三公分基本相同，只是所用的波导口径尺寸不同，测试系统的波导元件的结构及外形有所不同，这是根据各厂自己设计所制造的产品而异，但其基本原理与作用仍是一样的，只不过制造的精密度有所差异而已，关于工厂出品的微波信号发生器的介绍在后面再讲。

## (2) 固定衰减器

这一个元件放在这里的作用，主要是使负载对信号源的影响减小，它起的是隔离作用，最好是用铁氧体隔离器，一方面它不减少信号源向负载传送的功率，二方面也能起到良好的隔离作用，隔离的衰减量大于

10分贝以上，如没有铁氧体隔离器，也可用固定衰减器代替，其衰减量取10分贝左右，太大会减少功率向负载方向的传输，太小则隔离作用降低。

### (3) 波长计

波长计主要作为测量微波测试系统的工作波长，多用空腔谐振波长计，波长计的读数是从小螺旋上读取的，有效数字可到三位、四位，再根据波长计的校准曲线查出相应的波长，为了避免螺旋的回差，调节读数时应向一个方向旋转，波长的谐振点由测试系统的晶体检波器检波后的电流，通过测量放大器或光点检流计来指示，波长计有两种：一种是通过式，另一种是吸收式，我们所用的是吸收式，因此其指示的谐振点是一个凹峰，根据凹峰的最低点来确定波长的读数。

### (4) 可变衰减器

可变衰减器相当于一个可变电阻，它用来控制送到负载上功率的大小，可变衰减器内有一块可移动的介质片，上面涂有吸收物质，如石墨或蒸发一层镍铬合金，它可以吸收微波功率，移动衰减片到靠近波导中部位置时则衰减最大，因波导中电场最大，吸收功率也大，靠波导管壁位置则衰减最小，使用时先把衰减量放到最大，然后根据测试系统上的晶体检波器输出指示调节其功率输出的大小，一般最小衰减量约0.5分贝，最大衰减量大于30分贝。

### (5) 短路活塞

是波导中造成传输线短路的一种元件，它把微波功率全反射回去，形成完全的驻波，再根据测试的不同任务而进行测量，短路活塞也可用可变电阻元件代替，短路活塞的驻波可达40分贝，可变电阻的驻波约30分贝，短路活塞的移动位置可从测微螺旋中读出。



### (6) 终端负载

这个元件的作用是全部吸收送过来的微波功率不使有功率反射回去，相当于传输线上的全匹配状态，因此又称为全匹配负载，它也是用一片介质放在波导一端的中部位置，介质上涂上吸收物质，使微波功率全部吸收。

### (7) 被测元件

被测元件可以是不同的波导元件，在测试时再连接到微波测试系统相应的位置中去。

### (8) 微波测量线

微波测量线是微波基本测试系统中的重要设备，特别是在测量驻波、阻抗等是不可缺少的，在调整测试时，根据需要，有时需用到全匹配负载、短路活塞以及其它波导元件等配合使用，微波测量线的结构设计比较复杂，在 § 3 中我们再加以介绍，这里先介绍一点简单结构。

测量线常见的有波导式测量线及同轴式测量线两种。其基本结构由三部分组成，即开槽线、指示机构及传动机构，图 ( 7-3 ) 是同轴线及波导测量线的简化结构图。

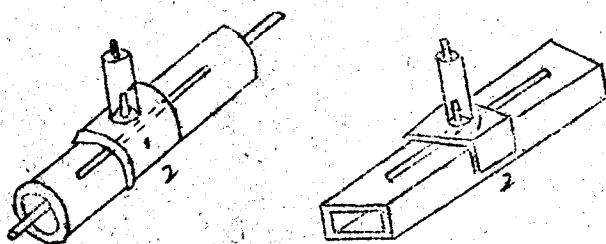


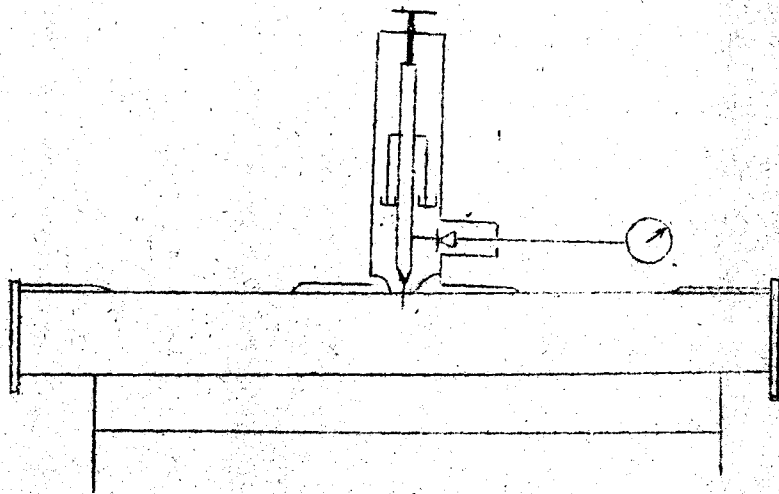
图 ( 7-3 ) 同轴线及波导测量线的简化结构图

### (a) 开槽线

开槽线是由普通的波导或同轴线在外壁上开有长条槽缝而作成，长条槽缝的开缝应不影响波导中微波电磁场的分布或传输功率的影响，因此，对开槽线的制造提出了一定的机械工艺要求，以充足的性能。

### (b) 指示机构

指示部分是用一个探针通过开槽缝伸入同轴线或波导内，它象个小的垂直天线一样，探针在所在位置产生感应电势，电势的强度与所在位置电磁场强度成正比，并经过探头谐振腔加至晶体检波器，晶体检波器把耦合过来的微波能量转换为直流电流或低频电流，再用微安计、光点检流计或测量放大器指示出来，其简图如图(7-4)。



图(7-4) 测量放大器指示器

探针的几何尺寸要作得足够细，其直径约 $0.2-0.5\text{mm}$ ，用磷铜丝做成，伸入波导中的深度可调，一般深度约为波导高度的 $5\sim 10\%$ ，以尽量减小对波导中电磁场的影响及不影响测量为准。

指示机构上有一同轴线的调谐活塞，调谐活塞的目的是调谐探针的

阻抗，以便与传输线匹配，输出指示表上则有指示，在调节时应细心调整测量线上活塞的位置，并一面观察指示仪表，使有指示出现，以达到最大。

### (c) 传动机构

传动机构是使探针在开槽缝中来回移动，以测量波导中驻波的分布，传动机构移动要平稳，移动时不能上下波动，移动的距离从游标尺或千分表读出。

### (d) 测量放大器

微波测量线指示机构中的检波器检出的电流需要仪表指示，由于检出的电流很小，故指示仪表应是能指示微小电流的仪表或将微小电流加以放大的仪器，最常用的是测量放大器与光点检流计。下面主要介绍测量放大器的简单结构及原理与使用，以常用的 FD-1 型测量放大器作例子加以说明。

测量放大器实际上是一个可以测量和放大低频讯号的低噪声放大器，它配合测量线作为测量驻波系数之用。

### (e) 测量放大器的工作原理

图 (7-5) 是 FD-1 型测量放大器的方框图。

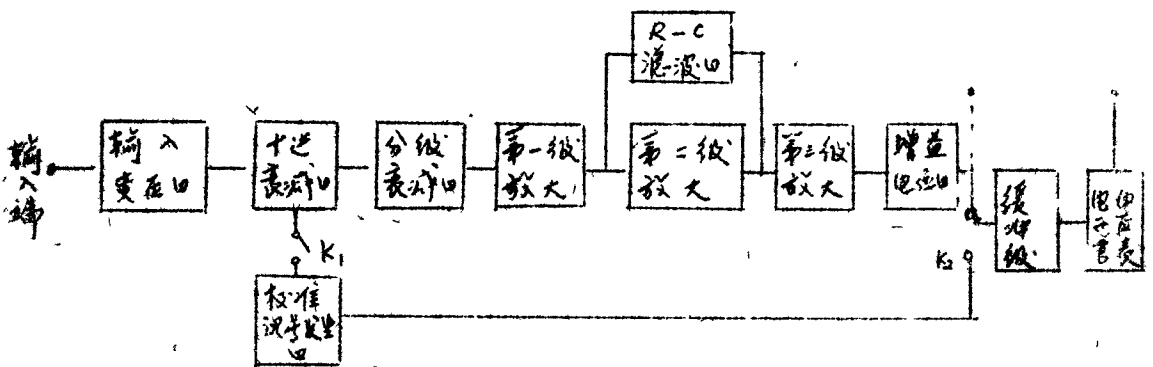
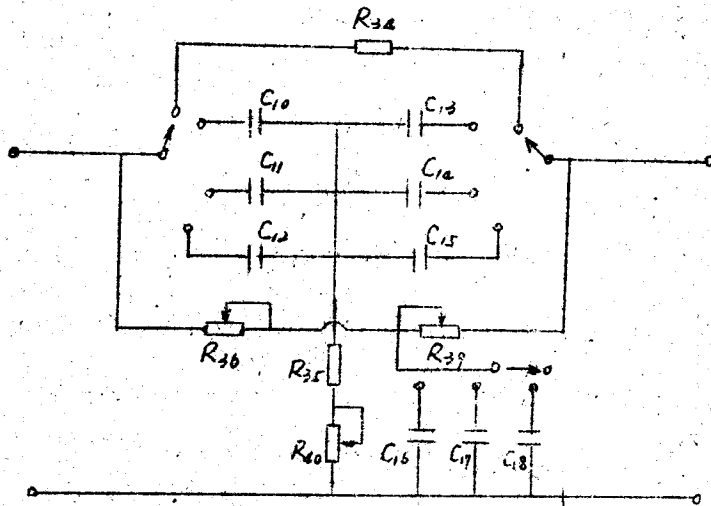


图 (7-5) FD-1 型测量放大器方框图

由测量线晶体检波器输出的讯号通过电缆经过仪器的输入插孔接至输入变压器，经过十进衰减器及分级衰减器而进入第一级放大器，经放大后又输送到第二级和第三级放大器，在第二级输出端与第一级输出端之间接入可调谐的阻容滤波器，利用滤波器限制使用频率，使它工作在窄频带，就可放大低电平的信号，减低了杂音电平的干扰，

我们知道，放大器中的负反馈是使放大器的工作稳定性增强，杂音电平减低，在测量放大器中的阻容滤波器是由电阻与电容组成，其简图为图（7-6）所示。其滤波器频率特性曲线如图（7-7）所示，图中 $\beta$ 为衰减量。

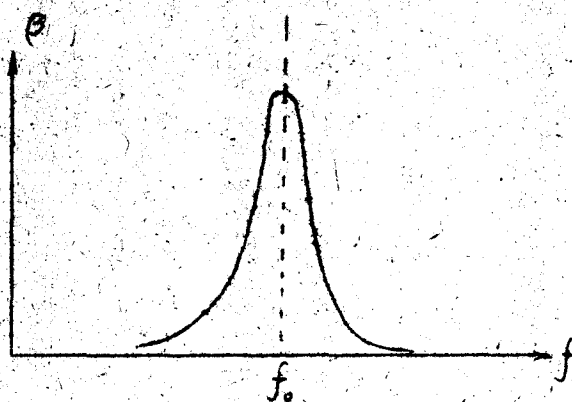


图（7-6）测量放大器中阻容滤波器

滤波器的谐振频率 $f_0$ 由下式所决定：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

从图（7-7）曲线看出，电桥谐振的频率 $f_0$ 衰减最大，几乎不能通过滤波器的，而较高或较低的频率却相对地能自由通过滤波器，因



图(7-7) 滤波器频率特性曲线

此，在谐振频率范围内就没有负回授作用，而在其他频率上产生负回授作用，使增益急剧降低。由于严格限制了通过的频带，因而电路中所产生的干扰和电子管的杂音电平有很大程度的减少，这样可以测量极低电平的讯号。

滤波器中有四个使用频带，它通过变换电容及电阻来改变，三个频带为  $400 \sim 1000\text{Hz}$ ， $900 \sim 2250\text{Hz}$  及  $2000 \sim 5000\text{Hz}$ ，当开关接到电阻  $R_{24}$  上时，即取消了滤波网络，所有频率都形成负回授，此时作为宽频带工作范围其频带为  $400 \sim 10000\text{Hz}$ ，它是在电平较高的情况下或作为低频放大器时使用的，滤波器中网络上的可变电阻是用来平衡电桥时作为均匀调节所需频率的。

从第三级放大器送出的讯号可以由增益控制电位器来控制其放大，然后通过缓冲级加到二极管组成的电子管电压表上，再由微安表指示出来。

为了减小电源的波动，整个仪器采用了稳压以及稳流的整流电路。

图(7-5)中有一个校准用的讯号发生器，它是用来作为本仪器

以八示数校准时的标准讯号，发生器是  $1000\text{Hz}$  的正弦振荡讯号。

(b) 仪器控制面板图

如图 (7-8) 所示。

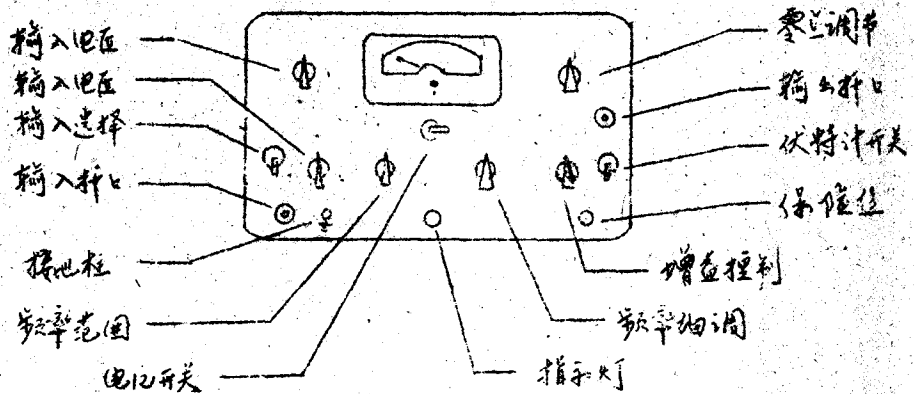


图 (7-8) 仪器控制面板图

输入选择——凡微波测试系统中用晶体检波器输出的讯号，都放在“晶体”的位置，有时在微波测试中要测试功率时，讯号是由功率计中的热敏电阻桥输出，它属于辐射热测定器，则输入选择可放在辐射热测定位置。

输入电压——面板下面的一个就是十进衰减器，上面的一个就是分级衰减器，十进衰减器的每一个数字表示送至放大器第一级的讯号减弱若干倍，这里可从 10 倍到 1000 倍，分级衰减器可使输入第一级放大器的讯号减弱 1.25、1.5……10 倍，十进衰减器上有一“标准”位置，是校准仪器放大系数时用的。

输出插口——为外接微安表之用。

频率范围——改变滤波网络的电容。

频率细调——改变滤波网络的阻位器。

(a) FD-1 型测量放大器的主要技术特性

① 仪器可以放大和测量  $200 \sim 10\,000\text{Hz}$  频带内的低频弱讯号。

② 放大工作方式有两种：宽频带与窄频带。

③ 放大器的最高灵敏度：

宽频带时当输入端电压不大于  $25\mu\text{V}$  时指针可满刻度。

窄频带时当输入端电压不大于  $10\mu\text{V}$  时指针可到满刻度。

④ 放大器频率特性及线性误差度：

宽频带： $400 \sim 10\,000\text{Hz}$  基本上是线性的

窄频带： $400 \sim 1\,000\text{Hz}$  2%

$900 \sim 2\,250\text{Hz}$  5%

$2\,000 \sim 5\,000\text{Hz}$  5%

窄频带每一段范围均可调谐于任一频率

⑤ 放大器可测量电压，其范围为  $10 \sim 2 \times 10^5 \mu\text{V}$

⑥ 放大器测量电压比为  $0.01 \sim 1$ ，精确度达 3%。

⑦ 仪器上微安表有两个刻度

测量电压比用的 100 分度。

测量电压单位分划的  $\mu\text{V}$  分度。

⑧ 放大器中具有  $1\,000\text{Hz}$  频率标准讯号振荡器，所输出的讯号放大系数的校准。

(d) 仪器的使用：

① 准备工作：

1. 十进衰减器的“输入电压”旋钮调在位置“ $\times 100$ ”上。

2. 分级衰减器的输入电压旋钮调在位置“ $\times 10$ ”上。

3. 频率范围开关调在位置“200~10000”上。

4. 放大旋钮旋到右边最大。

5. 仪器伏特计开关调在位置“断”上。

6. 接上电源，将电源开关转至位置“通”上，指示灯亮，则表示接通。

7. 经过适当时间预热。

8. 转动“零点调节”旋钮调到仪器指针在“零”位上。

## ② 测量驻波：

测量一般采用窄频带范围：

1. 将输入选择开关放在“晶体”位置。伏特计开关放在“通”上。

2. 将频率范围调至“200~10000”位置上。

3. 调节十进和分级衰减器，使仪器指针有指示。

4. 将频率旋钮转到适当的窄频带量程上，以仪器指示最大为准，再调节频率细调，使仪表指示最大。

5. 放大旋钮位置应使测量线探针移动至驻波<sup>波</sup>腹位置时，仪器指示值近于100（最大值），此后不旋动“放大旋钮”，如测量过程中，仪器指针在前半刻度指示读数时，为了提高测量精度，可调节输入电压旋钮，取得后半刻度指示读数。

6. 注意事项：使用测量放大器时，要控制好伏特计开关，不要使仪器上的微安表经常发生“打表”现象，以免损坏电表。

关于测量放大器的其他测试方法可参考测量放大器说明书。

## (10) 光点反射式检流计：

有时如果没有测量放大器，也可用光点反射式检流计代替，光电反射式检流计是一个悬线电流计，在可动的线圈上有一个小镜，另外有一



个小灯射向小镜，经小镜反射后照在玻璃的刻度标尺上，当晶体检波器输出微小电流通过小线圈而使线圈转动时，标尺上的反射光点也发生移动，移动的距离与通过电流的大小成正比，这种光点检流计只能通过很微小的电流，一般是 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 安，否则容易损坏，使用时要控制微波测试系统上的可变衰减器，同时检流计上悬挂的小线圈容易振动摇摆，剧烈时会震断悬线，因此在移动检流计或不用时，应将检流计的两个输入端用短线连起来，使之短路，其摆动就会小些。

## § 2 微波讯号源

进行微波测量时，需要一个微波信号源，它是一个微波振荡器，产生所需频率的微波讯号，这种微波振荡器，有由电子器件所构成的，也有由固体器件所构成的，根据不同的频率及不同的用途，现在有着不同的各种类型和结构的微波振荡器，对于应用于测量或接收设备中的本振，参量放大器的微波振荡器大多是小功率的，最常用的微波电子器件，有反射速调管及反波管等，在测量上多数用反射速调管，工厂出产的微波讯号发生器也多数用反射速调管所构成，在本节中，我们主要的也只介绍反射速调管的微波振荡器或讯号发生器。

为什么微波电子器件的结构与工作原理与一般低频电子管不同？低频电子管为什么不能用在微波波段内？除了一般电子管各极之间的分布电容及电感太大外，最主要的是称为电子渡越时间的影响，什么是电子的渡越时间？电子渡越时间是电子在电极之间飞跑时所需要的时间，一般普通低频三极管的电子渡越时间为 $\tau = 10^{-9}$ 秒，对于一般短波频率来说，电子渡越时间只占整个周期的很小一点时间，其影响可以忽略，

例如对于1兆赫的频率来说，其周期为 $T = 1/f = \frac{1}{9 \times 10^6} = 0.11 \times 10^{-6}$