

微带功率晶体管放大器

袁孝康 王仕璠 朱俊达 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了微带大功率晶体管放大器的设计理论和调试方法。内容包括微波功率晶体管的特点、动态阻抗和网络特性及其测试方法；阻抗匹配网络设计；用大信号S参数设计功率晶体管放大器；宽频带功率晶体管放大器的设计特点；功率合成技术；放大器的调整和测试以及一些研制实例。本书可供从事微波功率晶体管放大器的科研、教学、生产等技术人员参考。

微带功率晶体管放大器

袁孝康 王仕璠 朱俊达编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 1982年8月第一版

印张：8 4/32 页数：130 1982年8月天津第一次印刷

字数：184千字 插页：1 印数：1—7,700册

统一书号：15045·总2602—无6190

定价：0.87 元

前 言

最近十多年来，微波功率晶体管的研制有了很大发展，无论在输出功率、还是在工作频率的提高方面，进展都非常迅速。微波功率晶体管与微带电路技术相结合，开创了微波发射机固态化和小型化的新途径。

微波功率晶体管主要有两种类型，一种是双极晶体管，一种是场效应晶体管。就双极晶体管来说，已经陆续出现了500 MHz输出60 W、1~2 GHz输出40 W、3 GHz输出10 W、5 GHz输出5 W、10 GHz输出1 W的产品，上述这些产品进入了实用阶段。就场效应晶体管来说，10 GHz输出功率已能达到3 W以上，22 GHz还能输出250 mW功率，其发展极为迅速，但总的说来目前还处于研制阶段。有人认为，在4~30 GHz范围内，砷化镓场效应管将成为主要的微波功率源，而在4 GHz以下的频率范围内，主要的微波功率源就是双极晶体管了。本书所指的微波功率晶体管，主要是指耗散功率大于1 W的大功率微波双极晶体管，而不是广义地包括场效应晶体管。但是，本书所介绍的一些电路技术，对于场效应晶体管也是适用的。

微波晶体管放大器具有许多公认的优点：噪声低，频带宽，相位线性度好，动态范围大，效率高，级联方便，稳定可靠，供电简单，体积小，重量轻，因此，它在很多领域内已经或正在取代电真空器件放大器。在小功率范围内，晶体管放大器已经成为微波放大器的主体；在大功率范围内，晶体管放大器也发挥着越来越大的作用。可以预期，只要峰值功率不太高，

晶体管放大器也将成为微波功率放大器的一种主要类型。

微带功率晶体管放大器是微波功率晶体管放大器的主要形式。现时，它已被广泛地应用在雷达、通信、遥测、遥感、移动电台等各类整机中。有关微带功率晶体管放大器的文章资料虽然不少，但系统性的专论书籍还比较少见，我们在较广泛地收集资料的基础上，结合自己工作上的体会，编写成此书，希望对从事微带功率晶体管放大器的同志们有所帮助。由于这方面的内容较新，而我们的理论水平和实际经验都很不够，书中难免会有不少缺点和错误，请读者批评指正。

本书在编写过程中得到不少同志的帮助和支持，特别是叶琼同志对书稿内容作了部分修改和补充，还提供了一个用微带指数线匹配功放的实例，在此一并表示感谢。

编著者

1979年8月

目 录

前言

第一章 微带功率晶体管放大器的特点和一般

设计考虑 (1)

1•1 微波功率晶体管概说 (2)

1•2 微带电路概说 (13)

1•3 微带功率晶体管放大器的一般设计考虑 (15)

第二章 微波功率晶体管的动态阻抗和大信号 S 参数

测量 (27)

2•1 微波功率晶体管的动态阻抗测量 (27)

2•2 用大信号 S 参数表征微波功率晶体管 (36)

2•3 微波功率晶体管的大信号 S 参数测量 (39)

第三章 阻抗匹配网络设计 (48)

3•1 串联阻抗 (或并联导纳) 匹配法 (48)

3•2 $\frac{1}{4}$ 波长线加电抗调配线匹配法 (52)

3•3 $\frac{1}{8}$ 波长线匹配法 (55)

3•4 不定长度微带线直接匹配法 (58)

3•5 T 形或 π 形网络匹配法 (61)

3•6 多节并联导纳匹配法 (68)

3•7 渐变线匹配法 (72)

3•8 $\frac{1}{4}$ 波长多阶梯阻抗变换器匹配法 (76)

3•9 短阶梯阻抗变换器匹配法 (81)

3•10 变阻滤波器匹配法 (84)

3.11 关于阻抗法设计微带功率晶体管放大器的小结	(87)
第四章 用大信号 S 参数设计微带功率晶体管放 大器	(92)
4.1 晶体管放大器的稳定性	(92)
4.2 晶体管放大器的增益和输出功率	(99)
4.3 绝对稳定功率晶体管放大器设计	(108)
4.4 潜在不稳定功率晶体管放大器设计	(116)
4.5 用实验方法设计功率晶体管放大器	(120)
第五章 宽频带功率晶体管放大器设计	(127)
5.1 宽频带功率晶体管放大器的若干设计考虑	(127)
5.2 衰减—频率特性具有一定倾斜特性的阻抗匹配网络	(134)
5.3 宽频带丙类晶体管放大器设计	(141)
5.4 宽频带线性功率晶体管放大器设计	(153)
第六章 功率合成技术	(158)
6.1 概述	(158)
6.2 基本的功率分配 (或合成) 器	(162)
6.3 二进制功率合成阵	(181)
6.4 串馈功率合成阵	(189)
第七章 微带功率晶体管放大器的调整和测试	(196)
7.1 功率晶体管的失效机理和保护电路	(196)
7.2 消除寄生振荡的具体措施	(201)
7.3 调整高频特性	(203)
7.4 功率晶体管放大器的各测试指标	(204)
第八章 研制实例	(208)
〔实例一〕2GHz 微带功率晶体管放大器的研制	(203)
〔实例二〕2GHz 两级微带功率晶体管放大器的研制	(218)
〔实例三〕500MHz 微带功率晶体管放大器的研制	(224)
附录一 几种国外微波功率双极晶体管	(230)
附录二 几种国外微波功率场效应管	(231)

附录三	某些国产微波功率晶体管参数	(232)
附录四	微带线的有效介电常数和特性阻抗表	(240)
附录五	契比雪夫阻抗变换器数值表	(244)
附录六	阻抗圆图	插页
参考资料		(249)

第一章 微带功率晶体管放大器的特点和一般设计考虑

最近十多年来，电子设备全固体化的浪潮已经席卷了雷达、微波多路通讯、遥测、宇航和电子对抗等广大领域，并且取得了非常巨大的成绩。众所周知，小功率电子管的地位几乎为晶体管所取代。在大功率领域，晶体管不能取代电子管的传统观念已被打破。事实上，在五十年代中期，低频功率晶体管便已成为现实。到了六十年代后期，功率晶体管的使用频率便进展到微波领域，这就为电子设备的全固体化创造了必要的条件。正是由于固态器件的飞速发展和制作工艺的日臻完善，促使电路理论和技术产生了新的突破，其标志之一就是在六十年代中期微带电路开始进入实用阶段。半导体器件与微带电路的结合，开创了微波理论和技术的新局面。

微带晶体管放大器就是以微带电路形式制成的微波放大器。它具有噪声低、频带宽、相位线性度好、动态范围大、效率高以及体积小、重量轻、供电简单、寿命长、适合批量生产等优点，因而在小信号应用中，已经取代了隧道二极管放大器、行波管放大器和某些常温参量放大器。在大信号应用中，它已经或正在取代中、小功率的超高频三、四极管、行波管和多腔速调管等超高频电子管放大器，迅速地开拓着广阔的应用领域。因而在峰值功率不很高的情况下，微带晶体管放大器将逐步代替其他各种微波功率放大器，而成为微波功率放大器的主要形式之一。

本章将对微带功率晶体管放大器的两个主要组成部分——微波功率晶体管和微带电路作一个概括的介绍，并且还要阐述

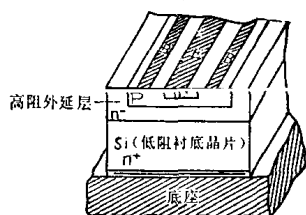
微带功率晶体管放大器的一般设计原则。

1.1 微波功率晶体管概说

微波功率晶体管是微带功率晶体管放大器的心脏，它对放大器的性能有着重大影响。因此，微带功率晶体管放大器的研制者和使用者，都应对微波功率晶体管的特性有一定程度的了解。

1. 微波功率晶体管的结构

微波功率晶体管是目前最难于制作的半导体器件之一，它需要一般大功率晶体管的制作技术，又需要精细电极图案和极为紧凑的管芯几何尺寸。



微波功率晶体管目前几乎全都采用平面结构，图1-1就是具有外延层的硅双扩散 $n-p-n$ 型平面管管芯示意图，它是在低阻衬底 n^+ 型硅片上，先制作薄的 n^- 型高阻外延层

图 1-1 典型的平面管结构示意图 (其电阻率和厚度主要由击穿电压决定)，然后应用标准平面工艺，在硅片表面生长氧化层，通过光刻和掩蔽扩散等技术，在外延层上先后制作所要求电极图形的 p 型扩散基区和高浓度 n^+ 型扩散发射区，并在其上制作欧姆接触电极(基极和发射极)，便形成了 $n^+-n^-pn^+$ 结构的外延平面管管芯。集电极直接由片子背面引出。

平面结构的主要优点是性能稳定，并允许在较小的有效面积条件下，使用较大的接触面积，从而可将引线电感和接触电阻减至最小。借助精密的氧化光刻工艺，可制成极为复杂的电极

图案。在微波功率晶体管中，通常采用下列三种电极图案：梳状结构（又称为叉指结构），覆盖式结构，网状结构（又称为矩阵结构），目的在于获得尽可能大的发射极周长对结面积之比值（这一比值是晶体管实际所能达到的最大工作电流的主要标度），并且使集电极到基极的电容和时间常数 $r_{bb}C_c$ 最小（ r_{bb} 是基区扩展电阻， C_c 是集电结电容）。工作频率高达千兆赫量级的微波功率晶体管，其发射极和基极线条的宽度约为 $2\mu\text{m}$ 量级，发射极和基极间距只有 $1\mu\text{m}$ 量级，已接近通常的照相制版技术和光刻工艺的极限。更有甚者，还要在大的结面积条件下达到小至 $0.1\mu\text{m}$ 量级的基区宽度，这是制作微波功率晶体管的最大困难所在。因此，近年来浅结扩散技术和离子注入技术得到了很大的重视和发展。

2. 微波功率晶体管的性能参数

（1）极限工作电压、结击穿电压和最高工作电压

晶体管的极限工作电压（ V_C ）是指发生下列三种情况之一的最小电压值：p-n结发生击穿，或甚至完全损坏；晶体管的参数发生显著的变化，以致暂时丧失工作能力；管子的参数发生缓慢的、然而是不可恢复的变化。

结击穿电压 V_B （集电结或发射结击穿电压，这里统称为结击穿电压）是指集电结或发射结在加有反向电压下发生击穿现象时的电压值。通常将p-n结反向电流达到一定值时的反向电压值定为击穿电压值。除了单个结的击穿电压以外，在实际应用中，往往更多地要求集电极-发射极之间能承受高的反向电压。设基极开路时，集电极-发射极之间的击穿电压为 BV_{CEO} ，发射极开路时，集电极-基极之间的击穿电压为 BV_{CBO} ，二者之间有下列的经验关系式^[1]：

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[n]{1+h_{fe}}} \approx \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[10]{1+\frac{f_T}{f}}} \quad (1-1)$$

式中, n 是与晶体材料和管子类别 ($p-n-p$ 型或 $n-p-n$ 型) 有关的常数, 对 $n-p-n$ 硅管, $n = 2.5 \sim 4$; f_T 是晶体管的特征频率; f 为工作频率。显然, $BV_{CEO} < BV_{CBO}$ 。如果基极并不开路, 而是在基极和发射极之间接有一定的电阻 (实际应用中均如此), 则这时的集电极-发射极之间的击穿电压 BV_{CER} 将在 BV_{CEO} 和 BV_{CBO} 之间, 即 $BV_{CEO} < BV_{CER} < BV_{CBO}$ 。

显然, 上述击穿电压已经包含在晶体管的极限工作电压的内容中了。

最高工作电压 (V_M) 是指晶体管能够安全工作的最高电压。为了防止可能出现的偶然不利因素, 以及保证晶体管工作的可靠性、稳定性和使用寿命, V_M 必须小于晶体管的极限工作电压。

(2) 极限工作温度、最高结温度和最高储存温度

晶体管的极限工作温度 T_l , 通常理解为保证晶体管能够正常工作的最高温度。当晶体管内部温度超过结温 T_j 时, 它就要暂时丧失工作能力, 或者完全失效。最高结温度 T_{jm} 是指晶体管正常工作的最高 $p-n$ 结温度 (主要指集电结温度, 因为热量主要在该处产生), 对于锗管 T_{jm} 大致在 $70^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 范围, 硅管的 T_{jm} 在 $150^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 范围。此外, 还有最高储存温度 T_{sm} , 它是保证晶体管未加电时不遭受破坏的最高温度, 当温度超过 T_{sm} 时, 其工作能力会发生不可恢复的突然丧失, 或引起管子特性的不可恢复的恶化。

在一般情况下, T_l 与 T_{jm} 值相差不多, 而 T_{sm} 值最高 (硅管 T_{sm} 一般不低于 300°C)。同时还必须注意, 由于大功率晶体管的

结面温度分布很不均匀，因此 T_{jm} 和 T_i 的物理意义不甚明确。在使用中应当留有一定的安全余量。

(3) 热阻和最大集电极耗散功率

热阻 R_T 是功率晶体管的一个重要参数，它表征晶体管工作时所产生的热量向外界散发的能力。其单位是“ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ”，它的物理意义是当管子的耗散功率等于1 W时晶体管的管内温升度数($^{\circ}\text{C}$)。 R_T 越小，晶体管散发所产生的热量本领越大，因而在相同的环境温度下能够承受更大的耗散功率。热阻的定义是：

$$R_T = \frac{T_2 - T_1}{P_C} \quad (1-2)$$

其中 T_2 是热源温度（即集电结温度）， T_1 是环境温度， P_C 是晶体管工作时的集电极耗散功率。

晶体管的热阻由三个部分组成：

$$R_T = R_{Ti} + R_{TC} + R_{TO} \quad (1-3)$$

其中， R_{Ti} 表示热流由热源（集电结）流至晶体管底座的那部分热阻，称为内热阻； R_{TC} 表示热流由管子底座流至外散热器的热阻，称为接触热阻； R_{TO} 表示由散热器向周围介质（一般为空气）散发热量的热阻，称为外热阻。

当耗散功率小于1 W时，一般不加外散热器，这时 $R_{TC} = 0$ ， $R_T = R_{Ti} + R_{TO}$ ，这里的 R_{TO} 应理解为管子的管壳本身向周围介质散发热量时的外热阻（有时称为管壳辐射热阻）。

最大集电极耗散功率 P_{cm} ，是指在一定环境温度 $T_1 = T_a$ 下，使集电结温度达到允许的最高值，即 $T_2 = T_{jm}$ 时的集电极耗散功率。由(1-2)式可知，

$$P_{cm} = \frac{T_{jm} - T_c}{R_T} \quad (1-4)$$

一般手册上给出的数据是在一定的散热条件，（即一定的壳温 T_c ($P_C > 1\text{w}$ 时)或环境温度 T_c ($P_C < 1\text{w}$ 时))下测得的。如果实际使用的壳温 T'_c 或环境温度 (T'_c) 不是手册规定的温度，则这时的最大允许集电极耗散功率 P'_{cm} 可按式求得：

$$R_T = \frac{T_{jm} - T'_c}{P'_{cm}} = \frac{T_{jm} - T_c}{P_{cm}}$$

故
$$P'_{cm} = \frac{T_{jm} - T'_c}{T_{jm} - T_c} \cdot P_{cm} \quad (1-5)$$

(4) 饱和电阻和最大集电极电流

晶体管的饱和电阻 R_{CES} 是指晶体管处在饱和状态下集电极-发射极之间的电阻（在一定的集电极电流下），可用公式表示如下：

$$R_{CES} = V_{CES} / I_C \quad (1-6)$$

其中， V_{CES} 为晶体管在饱和状态时集电极-发射极之间的压降，称为晶体管的饱和压降（在一定的集电极电流下）。为了使晶体管适应低电压大电流应用、扩大晶体管的动态工作区域、提高功率晶体管的集电极效率和保证管子使用的可靠性，都必须减小 R_{CES} 值。但是，一般并不给出 R_{CES} 值，而代之以给出的是最大工作电流范围内管子的 V_{CES} 值。显然，在一定的集电极电流下， R_{CES} 和 V_{CES} 值越小越好。并且还需注意，管子的 R_{CES} 和 V_{CES} 值在低频段和高频段具有不同的数值，频率越高，其值越大。大多数功率晶体管的 V_{CES} 小于3V（在微波频率下可以超过5V）。

无论是从制作工艺的难易程度来看，还是从使用方便、安全可靠的角度来看，通常希望功率晶体管工作在低电压大电流状态，而不是工作在高电压小电流状态。在很低的电压范围内（例如小于3V），晶体管的饱和电阻是限制最大工作电流的主要

因素。当工作电压稍大时,管子的电流放大系数 (α 或 β) 将随电流增加而下降,从而限制了工作电流的增加。当工作电压增大到一定值后,管子允许的 P_{cm} 就成为限制最大工作电流的决定因素了。在更高的工作电压范围内,由于二次击穿现象的发生,晶体管实际所能达到的最大工作电流将小于 P_{cm} 所允许的值。通常晶体管手册上所列出的最大集电极电流 I_{cm} 值只是受 α 或 β 下降所限制的电流值。

根据以上叙述,可以构成如图 1-2 所示的功率晶体管的安全工作区*。当管子工作在 $ABCDE$ 曲线所规定的区域内时,可以认为是安全的,其中 AB 是管子最大集电极工作电流 I_{cm} 的限制曲线, BC 为集电极最大耗散功率 P_{cm} 的限制曲线, CD 为二次击穿限制曲线, DE 为集电极-发射极最大耐压 V_{CEmax} 曲线 (一般有 $BV_{CEO} \leq V_{CEmax} \leq BV_{CBO}$)。

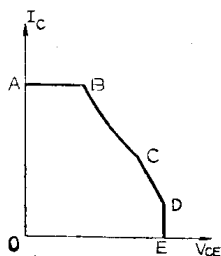


图 1-2 晶体管的安全工作区

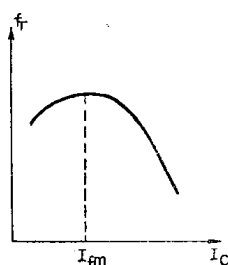


图 1-3 f_T 随 I_C 的一般变化规律

(5) 特征频率 f_T ¹⁾

特征频率 f_T 定义为晶体管的电流增益 β 下降到 1 时的频

* 现在给定的是直流安全工作区。在微波频率下,安全工作区比直流状态大, CD 段的限制决定于热斑温度。

1) 在频率低于 2GHz 时, f_T 是一个重要参数, 当频率高于 2GHz 时, 特别对共基极微波管来说, 意义就不大了。

率。它是表征晶体管在高频时放大能力的一个基本参量。由于 f_T 与电流有关（当发射极电流很大时， f_T 通常要减小），故必须考虑 f_T 随电流的分布关系，但 f_T 高的管子 in 高频工作时，并不一定能够输出大的功率，只有在大的工作电流范围内 f_T 高的管子在高频下工作才能达到大的功率输出。因此，对应于 f_T 峰值下的 I_{fm} 的大小是衡量功率晶体管输出能力的重要标志（见图1-3）。

（6）功率增益

功率增益 G_p 是微波功率晶体管重要参数之一。微波功率晶体管由于受材料和工艺的限制，一般其 G_p 都不很高，而且还受带宽和增益乘积的限制。如果要求带宽宽则 G_p 就低，反之 G_p 就大。同时 G_p 也是随着工作频率升高而下降，在微波功率晶体管中，由于各种因素的影响，它不遵循每倍频程6dB的下降规律，而通常以每倍频程（3~5）dB规律下降。所以在设计宽带功率放大器时，必须考虑上述的特点。当需要宽带高增益时，必须适当地降低工作频率来使用。

（7）输出功率

微波功率晶体管的输出功率 P_o 不仅与工作频率和工作状态有关，而且极大地依赖于管子的热状态和电流分布的均匀性。器件内部局部过热点的出现是限制最大安全输出功率的重要因素。

对于千兆赫以上的微波功率晶体管，连续输出功率 P_o 不可能超过最大集电极耗散功率 P_{cm} 值的40~50%，因为在连续使用时，管子的工作温度将很高，如果一旦发生偶然的负载失配现象，反射回管子的功率将使结温继续升高，为了使结温始终保持保持在200℃以下（对硅管而言），必须有良好的匹配。

（8）集电极效率

集电极效率 η 定义为晶体管的输出功率与电源总消耗功率的比值：

$$\eta = \frac{P_o}{V_{cc}I_c} \cdot 100\% \quad (1-7)$$

其中 V_{cc} 是集电极供电电源值； I_c 是流经集电极的电流值。

提高功率晶体管的效率 η 值具有重要意义，因为 η 高电源利用率也就高，而且降低了消耗在管子内部的功率，因而降低了管子的工作温度，这就使管子的热稳定性得到改善。

提高 η 值总是与扩大管子的输出特性曲线的工作区域相一致，为此应当采用饱和压降小的管子并提高工作电压；并且还需改善在不同工作电流下放大系数的均匀性，使得非线性失真不因工作区域的扩大而增加。此外， η 值还与工作状态有重大关系，并且是工作频率的函数。

3. 微波功率晶体管的封装

(1) 寄生参量对微波功率晶体管性能的影响

为了保护管芯免遭机械损伤，以及防潮防尘等考虑，晶体管总是需要封装的。封装不可避免地要引入寄生参量（寄生电感、寄生电容和各种损耗）参阅图1-4。这些寄生参量对于微波功率晶体管的性能有重大影响，甚至会破坏已制成的管芯的良好性能。

现在让我们来简单分析一下发射极引线电感对晶体管工作性能的影响（参阅图1-5）。有引线电感 L_e 时，共发射极电路的输入阻抗为：

$$R_i = (v_b + v_L) / i_b \quad (1-8)$$

由 L_e 引起的电抗分量为：

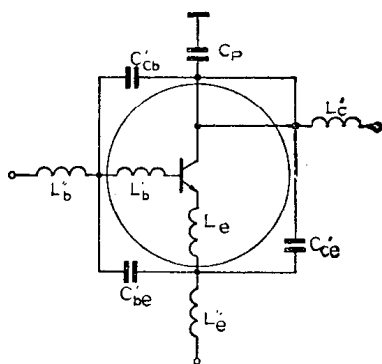


图 1-4 管壳封装寄生参量示意图

L_b' 、 L_e' 分别为基极和发射极的内引线电感； L_b'' 、 L_e'' 分别为管壳基极和发射极的电感； L_c' 为管壳集电极电感； C_{cb}' 为管壳的集电极-基极之间寄生电容； C_{be}' 为管壳的基极-发射极之间寄生电容； C_{ce}' 为管壳的集电极-发射极之间寄生电容； C_b 为管壳至地的寄生电容。

$$\frac{v_L}{i} = \frac{i_e \cdot j\omega L_e}{i_i} = \frac{(i_b + i_e) \cdot j\omega L_e}{i_i} = (1 + \beta) \cdot j\omega L_e \quad (1-9)$$

其中 β 是在工作频率上的共发射极电流放大系数，它在6dB/倍频程频率特性的高频区域内能近似用下式表示：

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\omega/\omega_\beta} \approx -j \frac{\beta_0 \omega_\beta}{\omega} = -j \frac{\omega_T}{\omega} = -j \frac{f_T}{f} \quad (1-10)$$

式中 $f_T = \frac{\omega_T}{2\pi}$ 是特征频率； f 是工作频率（ β_0 是直流 β 值， $\omega_\beta = \omega_T/\beta_0$ 是 β 的截止角频率）。

由（1-9）和（1-10）式可得：

$$\frac{v_L}{i_b} = \omega_T L_c + j\omega L_e \quad (1-11)$$