

131
集成微电路无线电电子设备设计丛书

无线电发送设备

〔苏〕O.A. 切尔诺科夫 编
孙 文 治 译

高等教育出版社

内 容 简 介

本书原版是苏联出版的教科书。

本书介绍了以不同集成度的混合集成微电路实现的半导体无线电发送设备的计算和设计。讨论了所用有源器件和无源元件的电气特性的结构特点。阐述了自激振荡器、功率放大器、倍频器、频率和相位调制器、功率合成器等的工作原理和参数的计算方法。并给出了这些部件的主要特性及拓扑结构的实例。全面系统地讨论了无线电发送设备的结构特点。

全书共十一章

本书可供高等学校电子类、通信类专业师生用作教材或教学参考书，也可供有关专业科技人员参考。

责任编辑 姚玉洁

Проектирование Радиозлектронной
Аппаратуры на интегральных Микросхемах
Радиопередающие Устройства

О.А.Челноков

« Радио и Связь » Москва, 1982

集成微电路无线电电子设备设计丛书

无线电发送设备

〔苏〕О.А.切尔诺科夫主编、

孙文治译

•

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

江苏阜宁印刷厂排版

中国青年出版社印刷厂印刷

•

开本850×1168 1/32 印张11.25 字数270 000

1990年5月第1版 1990年6月第1次印刷

印数0 001-1 160

ISBN 7-04-000737-1/TM·42

定价 3.80 元

目 录

前言	(1)
第一章 混合集成电路无线电发送设备及其特点与应用	
领域	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 无线电发送设备结构框图的实例	(3)
第二章 混合集成电路无线电发送设备的元件	(9)
§ 2.1 引言	(9)
§ 2.2 有源器件的基本特性与结构	(10)
§ 2.3 无源元件	(13)
2.3.1 基片及其特性	(13)
2.3.2 导体膜片、电阻膜片和介电膜片	(14)
2.3.3 微带线及其基本特性	(16)
2.3.4 电感线圈	(18)
2.3.5 电阻器	(19)
2.3.6 环行器和阀门	(20)
2.3.7 电容器	(21)
2.3.8 超高频接头	(29)
第三章 晶体管功率放大器	(33)
§ 3.1 功率放大器的基本特性	(33)
§ 3.2 晶体管在振荡状态的工作特点	(34)
3.2.1 晶体管的小信号参数	(34)
3.2.2 晶体管的平均参数	(39)
3.2.3 计算公式	(52)
§ 3.3 功率增益	(55)
§ 3.4 效率	(58)
§ 3.5 晶体管外壳的耗散功率和容许温度	(66)

§ 3.6	功率放大器能量指标的计算结果	(67)
§ 3.7	最简单的匹配转换电路	(76)
§ 3.8	功率放大器的寄生现象及其抑制方法	(83)
3.8.1	寄生现象的简单分类	(83)
3.8.2	共基功率放大器滞后现象的特性	(87)
3.8.3	抑制寄生现象的最简方法	(99)
§ 3.9	功率放大器可靠性的保证	(103)
3.9.1	晶体管失效的主要原因	(103)
3.9.2	集电极回路工作状态的特点	(104)
3.9.3	输入电路状态的特点	(107)
3.9.4	额定输出功率	(108)
3.9.5	功率放大器在失配负载时的工作	(109)
第四章	宽带晶体管功率放大器	(112)
§ 4.1	引言	(112)
§ 4.2	匹配转换电路线性理论的基本原理	(114)
§ 4.3	功率放大器输入端宽带匹配转换电路	(121)
4.3.1	封装晶体管功率放大器用宽带匹配转换电路	(121)
4.3.2	封装在晶体管管壳内的输入端匹配转换电路	(123)
§ 4.4	功率放大器集电极电路中宽带匹配转换电路的设计	(126)
4.4.1	封装晶体管放大器集电极电路中的匹配转换电路	(126)
4.4.2	功率晶体管结构放大器的匹配转换电路、内装集电极电感	(138)
§ 4.5	级间宽带匹配转换电路	(138)
§ 4.6	具有宽带匹配转换电路的功率放大器结构实例	(141)
第五章	晶体管放大器的功率合成	(146)
§ 5.1	引言	(146)
§ 5.2	双信号功率合成装置	(147)
5.2.1	功率分配器和功率合成的一般特性	(147)
5.2.2	正交分配器	(151)
5.2.3	同相分配器	(153)
5.2.4	同环形功率分配器构成的正交功率分配器	(157)
5.2.5	正交分配器在设计功率放大器时的使用特性	(158)
§ 5.3	多端功率合成装置	(162)
5.3.1	双重分配器与双重合成器	(162)

5.3.2	多射线星形结构 带有阀门的功率合成器	(164)
5.3.3	维尔金森多端合成器	(165)
5.3.4	多端合成器的平面结构	(167)
5.3.5	串联式多端合成器	(167)
第六章	相位调制器	(171)
§ 6.1	引言	(171)
§ 6.2	半导体控制元件	(174)
§ 6.3	半导体无线电发设备结构中的相位调制器	(180)
§ 6.4	线性相位调制器	(182)
6.4.1	单回路调制器的准静态理论和动态理论	(182)
6.4.2	变容二极管双回路线性调制器	(194)
6.4.3	反射型线性调制器	(202)
§ 6.5	离散式相位调制器	(206)
6.5.1	反射型调制器	(216)
6.5.2	负载线性调制器	(212)
§ 6.6	高速预调制器	(217)
第七章	变容管可调频率晶体管自激振荡器	(222)
§ 7.1	引言	(222)
§ 7.2	变容管可调频率自激振荡器的计算	(224)
§ 7.3	变容管可调频率自激振荡器的结构实现特点	(232)
第八章	半导体倍频器	(236)
§ 8.1	引言	(236)
§ 8.2	变容管倍频器	(237)
8.2.1	变容管倍频器的理论	(237)
8.2.2	新型变容二极管的参数	(242)
8.2.3	平衡倍频器的特点	(248)
8.2.4	微带线变容管倍频器结构概述	(253)
§ 8.3	晶体管倍频器	(254)
第九章	超高频固态二极管振荡器	(262)
§ 9.1	引言	(262)
§ 9.2	部件 工作原理和特性	(263)
9.2.1	二极管的结构实现与参数	(264)

9.2.2 固态谐振器	(268)
§ 9.3 振荡理论和准线性分析法	(272)
9.3.1 混合状态下的耿氏二极管自激振荡器	(276)
9.3.2 具有分布参数耦合的宽频带自激振荡器	(282)
§ 9.4 振荡器的功能块 结构	(286)
9.4.1 固定频率自激振荡器	(286)
9.4.2 可调频率自激振荡器	(293)
9.4.3 再生放大器	(298)
9.4.4 超高频组件	(302)
第十章 无线电发送设备的特殊部件	(305)
§ 10.1 引言	(305)
§ 10.2 备用设备	(305)
§ 10.3 输出功率的稳定	(308)
§ 10.4 末级放大电路对天线失配的保护	(313)
第十一章 混合集成电路半导体无线电发送设备结构的共性问题	(317)
§ 11.1 引言	(317)
§ 11.2 部件的结构实施及其连接方法	(317)
§ 11.3 基片在无线电发送设备机壳上的固定	(320)
§ 11.4 元件在基片金属化表面上的固定 元件与部件的连接密封	(324)
§ 11.5 部件调整用工艺装置	(326)
§ 11.6 参数的内部的检测	(327)
§ 11.7 散热的保证	(328)
参考文献	(330)
符号注释	(366)
缩略词	(347)

第一章 混合集成电路无线电发送设备 及其特点与应用领域

§1.1 引言

无线电发送设备是各种不同用途的无线电系统中的一个重要环节。在多数情况下,整个系统的体积、重量、能量损耗、可靠性和使用寿命,首先取决于无线电发送设备的特性。由此可见,要解决总体装备微型化这个课题的重要关键就在于改善无线电发送设备的主要性能指标。〔2,108〕这就使无线电发送设备的设计面临着一系列特殊的困难。

要求保证能有很大的输出功率,就得提高有源器件的各极工作电流和工作电压,增大有源器件的耗散功率,这在末级和末前级中尤为突出。大的耗散功率要引起半导体结构的过热,而减少过热的必要性却又受到减轻重量和缩小体积的制约。

在大多数情况下,无线电发送设备的输出级都工作在强非线性工作状态,亦即电流截止的工作状态。在倍频器中,非线性工作状态是为了实现其基本功能所必需的;然而,在功率放大器中,非线性工作状态却是为了保证获得高的效率了。非线性工作状态是以半导体器件各极电流和电压的复杂波形为其特征的,在许多情况下,这将导致严重的过载,首先是电压的过载。过载非常危险,因为它会破坏半导体结构的完整性,甚至会相应地引起元器件的失效。

非线性工作状态的另一特征是增大了由于种种物理原因产生寄生现象的危险性。属于寄生现象的有:寄生振荡的自激,与存在于晶体管模型中的非线性电容有关的参变振荡激励,延滞现象

等。寄生现象的后果是：破坏设备工作的电磁兼容性，引起调制特性的失真，出现部件工作状态的跃变（例如在输入功率均匀变化时的跃变）。跃变的结果是使有源器件处在电流或者电压超过容许值的状态下。这是使有源器件失效的常见原因之一。

对于非线性设备的工作状态的分析，特别是非线性设备最佳结构的综合，要比线性设备的分析和综合复杂得多。对非线性超高频设备的计算、非线性超高频设备工作状态的分析、最佳匹配转换电路的综合、考虑到混合集成电路实施特点的工程设计方法之发展等问题，目前已引起各界专家们的兴趣和关注。

无线电发送设备的主要电气性能和体积重量指标，不仅取决于无线电系统的结构，而且还取决于诸如所要求的可靠性、无线电系统整体装配所能允许的重量和体积、批量生产的可能性、维修的方便性等许多因素。众所周知，有时对重量和体积的要求不太苛刻，但必须有特别高的可靠性；有时对重量和体积的要求毫不含糊，而且就得据此进行无线电发送设备的设计。

无线电发送设备的制作总是面临着一些非此即彼的抉择。比如从一方面看，在采用在密封管壳（后面称为管壳）中的有源器件、平板式或圆筒形标准微调电容器等时，可使制造工艺和调整得以简化，无需求对无线电发送设备作整体密封，而且维修十分方便。

从另一方面看，采用无封装或固定在小型管壳中的晶体管和二极管作成的有源器件、MOS电容器、小型微调电容器时，可以大大地减轻无线电发送设备的重量和缩小其体积。由于半导体结构和无源元件都得加以密封，就必须把无线电发送设备的部件全部密封起来，从而应该在特定的场所来生产这些部件。元、器件之间应该用热压焊接法或超声波焊接法通过细薄导线相连接。上述种种导致工艺周期大为复杂和维修的不方便。诚然，即使是在将功率晶体管结构焊到二氧化铍陶瓷垫片或聚合材料基片的金属化表面的工艺过程中最微小的损伤，也会导致结构散热性能的变坏，

从而使结构在正常工作状态下也会出现严重的过热。大大的降低设备的可靠性。之所以在用功率晶体管或二极管结构时感到非常不便，还由于这些结构无法从装置中单独取出来并作逐个检查。

无线电发送设备的设计中，应当充分考虑到从事整机设计及其各个部件设计的专家们所能拥有的工艺和经济方面的可能性。以现代先进水平制成的混合集成电路，是以具有高的可靠性为其特征的，然而，这只能在以精密工艺装配整个设备后才能实现。至于高的可靠性，包括了温度的试验、振动试验、密封性能等。

综上所述，现今用于无线电系统中对其电气指标和可靠性提出了苛刻要求的无线电发送设备，仍然继续采用有封装的有源器件、集总参数的电感器和电容器，并且各元器件之间用普通的焊接方法来进行连接。因为制造者可保证每一个元、器件的可靠性，可用不同方式的试验逐个进行检验，从而使整个无线电发送设备的可靠性高于采用混合集成电路形式的无封装元、器件装制的无线电发送设备的可靠性。在颇大程度内，这类设备属于小批量生产的应用范围较窄的一些无线电系统的无线电发送设备。

这些远非完臻的见解说明了，要对采用混合集成电路装制的无线电发送设备的结构工艺给出全面的介绍是颇为困难的，然而也说明了使广泛领域的专家们感到兴趣和关注的问题是不同集成度的超高频混合集成电路的计算和设计。

§ 1.2 无线电发送设备结构框图的实例

现在我们来讨论几种无线电发送设备的基本特性和应用特点
利用悬浮在海洋上、冰层上空或大气层中的浮标（用气球），是研究海洋或大气现象以及预测气候的有效方法。在这些浮标上装有无无线电发射机，信息由发射机发出并传送到人造地球卫星上^[47, 48]，而后再由人造地球卫星转发而传送到接收站去。在浮标上的无线电发射机的结构框图如图1.1所示^[47]，其中石英晶体振荡品（Γ）的工作频率为50MHz，它具有保证多普勒测

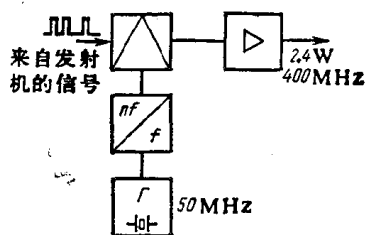


图1.1浮标用无线电发送设备的结构框图

量所必需的短时间频率不稳定性 10^{-9} ；而在15钟内的频率不稳定性约为 $\pm 10^{-8}$ 。石英晶体振荡器后面是晶体管倍频器。这种无线电发送设备采用了调制指数为 $\pm 60 \pm 6^\circ$ 的相位键控。相位键控器由几段用PIN二极管进行转换

的线段制成。所需要的无线电通信线的潜在通信容量并不大，大约仅为100bit/s。无线电发送设备工作在占空比为每秒60的状况，此时其输出功率约为 $2.4W \pm 1\text{ dB}$ 。整个浮标装置所消耗的平均功率约为0.3W。

气球式浮标用的无线电发送设备具有类似的输出特性，但其结构框图略有不同^[48]。

在传送模拟形式的信号时，图1.1中的相位键控器可代之以线性相位调制器（ЛФМ）。

图1.2示出了LES-9型人造地球卫星（ИСЗ）^[49]上的接收-发送系统，结构比较复杂，它具有两副天线，一副是喇叭形天线（宽射束），第二副是带有移动平板式反射器的抛物线天线（窄射束）。每副天线前面的滤波器用来分隔频率不同的接收通道和发送通道。发射机的载波频率和接收机的本振荡器频率均由同一个振荡器形成，在这个振荡器中的主振荡器频率为5MHz，先通过几级晶体管倍频器把它倍增到2.25GHz，再用几级变容管倍频器进而把它倍增到36GHz。这个振荡器能在36GHz频率上保证输出100mW的功率，而其总的耗散功率为12W。这个振荡器后面是功率分配器，它的用途是可顾名思义而一目了然的。图中两个本机振荡器Г所产生的频率分别为900MHz和840MHz的信号，各自加于其后的由PIN二极管和微带线装成的相位键控器受调制，而后再连同来自功率分配器和滤波器的公共振荡器的信号（36GHz）一起加于频移混频器。结果就形成了载波频率分别

为 36.9GHz 和 36.84GHz 的发射机已调制输出信号，而它的潜在通信容量约为 100Mbit/s 。

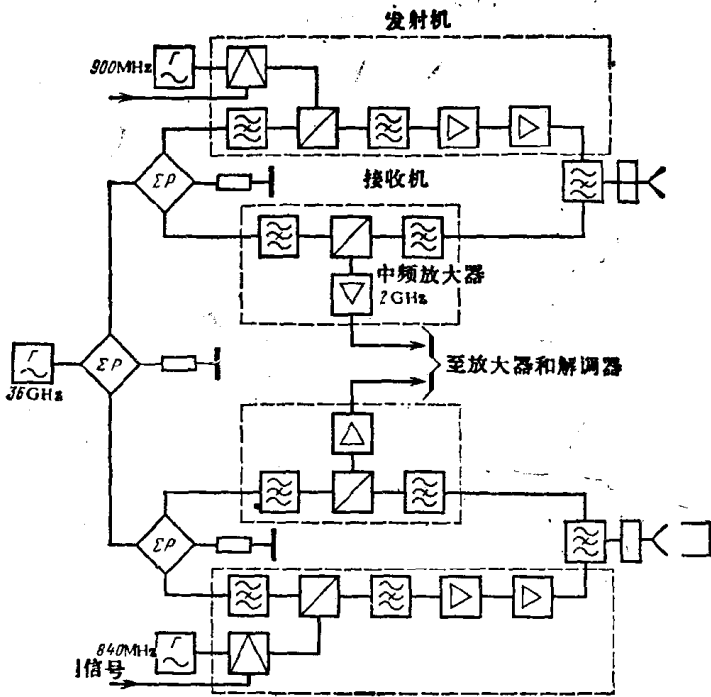


图1.2 毫米波无线电发送设备的结构框图

接收机输入信号的频率为 34GHz ，它与本振信号一起加于肖特基二极管低噪声混频器的输入端，结果使中间频率为 2GHz 。每个发射机的输出功率大致为 0.6W ，它是依靠对由崩越二极管装成的四级反射型放大器的功率进行合成的办法来保证的。用于这些放大器中的环行器的总损耗为 0.1dB ，为了功率的合成，采用了损耗少、对称性好的特制T型接头；放大器的效率约为 4% 。

目前广泛应用活动式相控天线阵（AΦAP）^[2,45,51,55,108]，这种天线阵能把较多模型M的功率在空中实现合成，而且还

能对接收-发送天线的方向图进行电气控制。下面来讨论如图1-3所示发送频率 f_1 和接收频率 f_2 不相等的活动式相控天线阵。接收机和发射机的分隔是用专门的滤波器（双信伴传器）来实现的。主振荡器输出信号通过由倍频器和功率放大器组成的整形器加于相位调制器，经过放大后就在各个模型的输入端之间进行分配。在发送通道中接有离散式移相器和功率放大器；变换移相器就可控制天线的方向图。在模型的接收通道中也接有类似的离散式移相器和低噪声放大器（МЛНУ）。

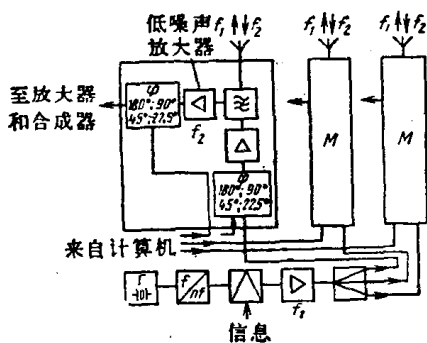


图1.3 活动式相控天线阵的结构框图

图1.4所示的是收发同频脉冲工作的雷达用活动式相控天线

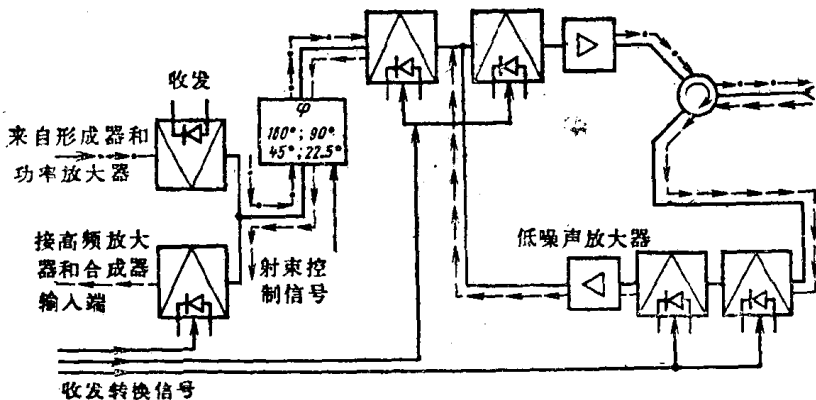


图1.4 活动式相控天线阵模型的结构框图

阵的一个模型结构框图^[45]。在发送时，闭锁接收机，以免其输入电路过载。无论在接收或是在发送过程中，都用同一个相移器来形成天线的方向图。天线阵的模型由放大器、低噪声放大器、离散式移相器以及三个通常用PIN二极管和微带线装制的转换器

所组成。

如图1.5所示在同一副天线上对为数甚多的功率放大器 $Y\Delta$ 进行功率合成的无线电发送设备得到了广泛的应用，而且颇有发展前途^[50]。当然，这些放大器都应当具有相同的和稳定的相位移以及很小的输出功率离散性；反之，若不满足这些条件，就会在合成电路中引入功率损耗。为了提高整套无线电总体的可靠性^[50]，预先准备两套同样的无线电发送设备，其一是半套头的主机发送设备，其二是半套头的备份机。利用一种由微带线线段和PIN二极管制成的装置，来保证半套头主机与备份机的隔离，并

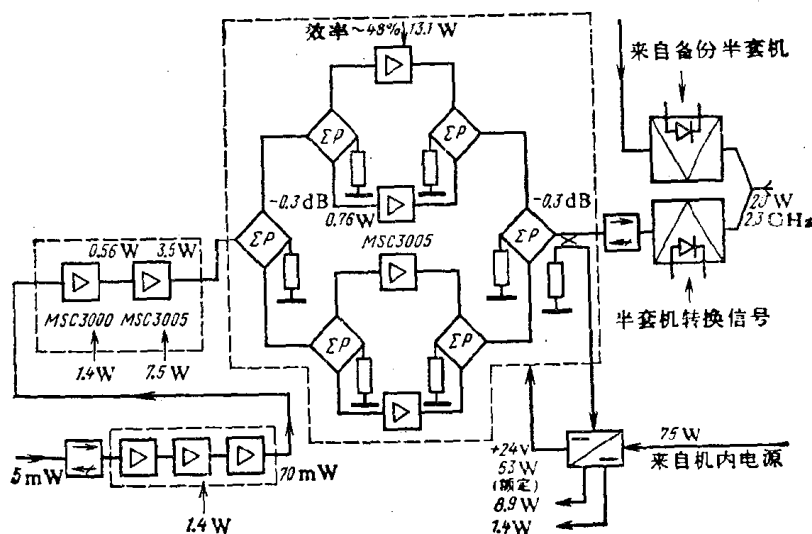


图1.4 四只晶体管的功率在天线中合成的无线电发送设备的结构框图

且将它们接在同一副天线上。一旦发现主机出了故障时，就可用相应的方法改变转换装置中PIN二极管的工作状态，使供电电压从主机的半套头上断开，并即馈送到备份机的半套头上去。

文献〔106〕中还介绍了一系列作为各种无线电系统组成部分的无线电发送设备结构框图。这些设备与调频（FM）中继

站、电视广播发射机、移动式收发系统、波导通信线收发设备、控制运载工具的多普勒雷达PJIC系统等有关。分析了所有这些框图之后^[22, 75, 106], 就可选定哪些是决定无线电发送设备整机的电气特性和体积、重量指标的主要部件。石英晶体主振荡器、半导体振荡器构成的可调频率自激振荡器、晶体管倍频器或变容管倍频器、线性相位调制器或离散式相位调制器、频移混频器就是这样的一些部件。功率分配和合成的混合装置、滤波器、保证备份无线电发送设备工作的通道转换装置等, 同样也是无线电发送设备的重要部件。

第二章 混合集成电路无线电 发送设备的元件

§ 2.1 引 言

组成无线电发送设备的超高频部件,实在是名目繁多,不胜枚举。在本章中,只能对诸如前一章中所述的各种无线电系统中无线电发送设备的结构框图作些分析。无线电发送设备的参数,首先取决于含有有源器件的各部件的电气性能和尺寸、重量指标。属于这类部件的有功率放大器、倍频器、自激振荡器及调制器等。在这些装置中,只有在其超高频无源元件(例如固定容量电容器或可变容量电容器、环行器、功率分配器或功率合成器等)具有相应的电气性能,并在结构上能与有源器件相配合时,才有可能发挥所用半导体器件的潜在性能。应该指出,对于无线电发送设备所使用的无源元件的电气性能要求,要比诸如在无线电接收设备所使用的无源元件的要求苛刻得多。这是与无线电发送设备大功率部件所用的无源元件总是工作在重载的电状态下有关的。例如,在桥式功率分配器和功率合成器中的镇流电阻,其耗散功率就有几瓦到几十瓦;又如,在强放级匹配转换器电路中的电容器,就得在频率非常高的电压和电流下工作。

与无源元件一样,对于有源器件在结构上同样提出了一些苛刻的要求。尤其是有源器件的输出端的寄生电感,将会严重地影响部件的主要电气性能(例如通频带、放大的稳定性等)。在许多情况下,例如设计镇流电阻时,就必须力求减小其对地的寄生电容。正是由于力求使输出端的寄生电感和对地的寄生电容减少

到最小的要求，促使人们制造出一些象MOS电容器等的新型无源元件，同时也促使以往所采用的诸如平板微调电容器和圆筒形微调电容器在结构方面的改进。

目前已经制成有在结构上能够和由不对称式微带线装的部件相配合一些新型环行器、整流阀、功率合成器和功率分配器等。

这些问题的解决首先是以应用新材料和现代工艺方式为基础的，这种新工艺最初用来建立这样一类半导体结构，即在同一个壳体中组合大量并联连接的结构，并且保证壳体上的半导体结构有良好的散热条件。

对部件（放大器、倍频器）的效率及其一系列其它参数（例如对晶体管放大器或变容管倍频器输入端阻抗匹配程度）的苛刻要求，在半导体器件的参数不可避免其离散性的情况下，就得要在调整超高频无线电部件的最后阶段，重新调整一下有关元件。所以在任何集成度时，能在结构上对无源元件实现平稳的或间断的调整，都是具有实际意义的。

正如前述，多数有源器件或无源元件都要求通过对无线电发送设备的一些独立部件的密封或整机的密封，来防止外界环境对它们的破坏。因而对密封部件内部高频能量的输入和输出，以及电源电压和调制电压的馈给，都要采用专门的密封式转换接头来实现，这种转换接头是现代无线电发送设备的重要部件。

§ 2.2 有源器件的基本特性与结构

半导体电子学的主要趋势是在减小净空间体积和重量的情况下，提高输出功率和工作频率。就目前状况来看，能够在频率高达 $1 \sim 2 \text{ GHz}$ 频段内取代大多数无线电发送设备中的电真空器件的双极型晶体管已经制造出来了。例如，MSC1330型晶体管在 1 GHz 频率上保证有 30 W 输出功率。一些试制性晶体管样品已能在 2 GHz 频率上有 40 W 输出功率^[41]。在文献〔39〕和〔43〕中还

介绍了在管壳内装有能保证大大拓宽通频带的匹配转换电路的一些晶体管特性。用这种晶体管装接成的一个放大器，在输入功率 $P_{BX} = 4.5\text{W}$ 、频率在 $610 \sim 960\text{MHz}$ 范围内的连续工作状态下，有 30W 输出功率^[30]，而另一个放大器在输入功率 $P_{BX} = 4\text{W}$ 、频率在 $1.8 \sim 2.1\text{GHz}$ 范围内时，有 22W 输出功率^[43]。

厘米波段的双极晶体管业已研制成功，在文献〔243〕中介绍了工作频率 10GHz 时输出功率为 2W 的晶体管的特性。至于在更高的频率上，功率场效应管的应用是大有发展前景的，例如文献〔92〕中报导了有关频率为 16GHz 时有 1W 输出功率的场效应管的研制情况。

大多数晶体管都用于连续工作状态。因为晶体管不同于电真空器件，即使是短暂的电流或电压重载状态也会导致晶体管失效。所以晶体管在脉冲工作状态时允许的输出功率与它在连续工作状态时的输出功率差不多大。但是，在研制脉冲晶体管方面也还是有其重大的突破。例如MSC1600M型晶体管，在 1GHz 频率上，脉冲持续时间为 $10\mu\text{s}$ 、占空比为100集电极电压为 50V 时，能保证 600W 的脉冲功率，而放大器的效率为 35% ，功率增益为 $K_P = 6\text{dB}$ 。

许多晶体管壳的品名表已为大家所熟知。在设计混合集成电路时，采用螺栓旋过铜底板的螺孔固紧在无线电发送设备机壳上的晶体管（见图2.1a和6），要比采用螺钉、螺帽的晶体管（KT904、KT913）方便得多。对于后一种晶体管，附加的密封容器的结构是相当复杂的，这与为了要固定晶体管，就要在空间结构的一个壁上钻出通孔，从而增加了密封的难度有关。

如图2.1b和r所示，KT372和KT918这类装在小型非密封壳体中的器件，是将其下表面焊到壳体基片金属化的表面上。

在第三代无线电发送设备中，采用了焊在聚合材料基片的金属化表面上的晶体结构；在结构耗散功率大的情况下，也可采用焊在氧化铍（BeO）垫圈上的晶体管结构。由于这种垫圈的反面已经金属化，故可把它焊在散热架（机壳）上。从本质上说，它是