

微波电路

周月臣 编著

北京邮电学院出版社

(京)新登字162号

内 容 提 要

本书主要介绍微波通信设备中应用的各种微波有源器件的工作原理、特性以及由这些器件构成的微波电路。前者以介绍微波晶体管(包括双极管、场效应管和高电子迁移率管)、肖特基势垒二极管、变容二极管、阶跃恢复二极管、体效应二极管、雪崩二极管、PIN二极管等微波半导体器件为主,微波电子管(速调管和行波管)次之;后者主要包括对微波晶体管放大器、收发信混频器、参量放大器、振荡器、倍频器、调相等电路的构成、工作原理、主要特性以及设计方法的详细分析、论述。书中附有小结、习题和参考文献,以帮助读者对正文内容的理解和掌握。

本书可作为邮电高等院校无线通信专业本科生教材,亦可供微波技术专业及从事微波技术工作人员参考。

微 波 电 路

编 者:周月臣

责任编辑:王守平

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

昌平马池口印刷厂印刷

850×1168毫米 1/32 印张 11 字数 294 千字

1992年8月第一版 1992年8月第一次印刷

印数:1-3100册

ISBN 7-5635-0093-6/TN·29

定价:3.65元

绪 言

本课程的主要任务是研究微波通信设备中的有源微波器件及电路。

众所周知，实现微波通信的主要设备之一是微波收发信机，它们是怎样构成的呢？概括起来说，主要是由许多无源微波器件和有源微波电路组成。前者就是《微波技术基础》课程中学过的单向器、环行器、滤波器、方向耦合器、各种谐振腔、匹配器等。后者就是本课程中将要学习和研究的主要内容。这里将以国产960CH/4GHz微波收发信机为例，对本课程中将要涉及的主要有源微波器件与电路作较详细的阐述和分析。

发信机简化框图如图1所示。

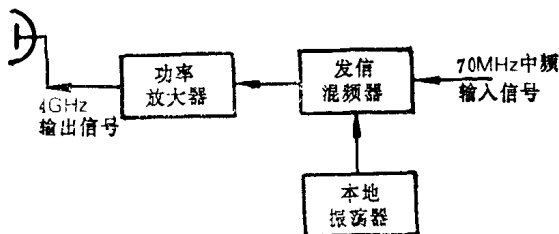


图 1 发信机简化框图

70MHz中频已调制信号携带了我们所需要传输的大量信息，如电话或电视信号。为了实现远距离传输，可将其搬到微波频率上，这就得有一个本地振荡源和微波发信混频器的共同作用才能实现（当然，还必须配备一些其他无源微波器件）。一般说来，由于受技术条件的限制，经发信混频出来的微波信号功率只有几mW到几十mW的数量级，显然是不能满足因空间对电波传播衰耗而要实现可靠通信的条件。故此，还必须紧接上一个微波功率放大器，以便将该小功率微波信号放大到所要求的功率电平。最后，

经过馈线、天线发射出去。在这里，涉及的主要有源微波电路有微波功率放大器、微波发信混频器和微波本地振荡源。

如上所述，微波功率放大器主要是将功率电平提高到微波发信机输出所要求的值。它的实现方法目前主要靠行波管功率放大器和速调管功率放大器。前者主要用于地面微波中继通信发信机功放和卫星通信地球站发射机末级功放或末前级功放。例如，国产的960CH/4GHz微波发信机的末级功放采用输出功率为5W的EY-501行波管；1800CH/6GHz微波发信机的末级功放则采用输出功率为10W的行波管。后者主要用于微波散射通信和卫星通信地球站发信机末级功放，输出功率可达30kW以上，近年来随着微波半导体器件的发展，出现了瓦级的微波晶体管功率放大器和微波固体二极管功率放大器，甚至在数十瓦级上有取代行波管功率放大器的趋势。例如，国产8GHz微波发信机的末级采用雪崩二极管作功率放大器，其输出功率可达瓦级。国外在这个频段上采用场效应晶体管（简称FET管）作功率放大时，输出功率可达10W以上。

发信机中微波发信混频器的作用是完成从中频信号到微波信号的频率变换（上变频）。根据建立在能量守恒定律基础上的门雷-罗威关系，利用工作在反向偏置状态下变容二极管电容-电压特性的非线性而完成上变频作用的。其主要特点是输出功率大、混频增益高。例如，国产960CH/4GHz微波发信机中就采用了2EC类变容二极管。当然还可根据具体工作频段和功率的不同要求选择各自合适的变容二极管。

微波本地振荡源也是微波发信机不可缺少的一个部件，它提供一个合适的微波功率振荡，以配合发信混频器完成频率变换作用。所谓合适就是指“功率大小”和“频率高低”等符合设计要求。产生这种本振源的方式很多，主要有如下一些形式：第一种是直接应用微波晶体管产生微波功率振荡；第二种是利用微波体效应管构成的所谓耿氏振荡器；第三种是利用反射式速调管产生

的微波功率振荡。这三种方式的特点是结构简单，但频率稳定度差，为了保证通信的可靠性，往往还需要采用稳频措施。因此，为了获得具有足够高频率稳定度的微波功率振荡，常常采用下述的所谓晶振倍频链本振源。它利用石英晶体产生100MHz左右的高稳定度小功率振荡，然后经过功率放大和倍频而获得高稳定度的微波功率振荡。在这种构成方式中的倍频电路一般采用变容二极管或阶跃恢复二极管等微波半导体器件来实现。前者常用来构成1GHz以下的集中参数倍频器，后者则用于构成1GHz以上的分布参数倍频器。它们也是一种很重要的有源微波电路。这样的本地振荡源尽管有着频率稳定度高的优点，但由于受谱杂波和调频热噪声大的影响，使本振信号输出的载噪比不高。因此，近年来又出现了第五种方式的本振源，即由上述的微波直接振荡器和晶振倍频链方式组合构成的所谓锁相本振源。例如960CH/4GHz微波二型机就是采用这种方式。由于兼有两者的优点，使本振源性能得到很大提高，因而，获得越来越广泛的应用。

微波收信机框图如图2所示。

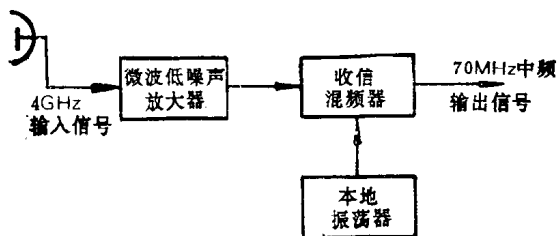


图2 收信机简化框图

由发信机发出的微波信号经过长距离传输，因空间衰减而到达接收端的信号场强已是很弱的。例如，960CH/4GHz微波接收机输入端信号一般处在 $1.6\mu\text{W}$ 到 300pW 的范围内。至于卫星通信中，到达地球站接收机输入端信号就更小了，通常只有几个pW的数量级，因此，必须设法将该微弱信号放大。为了尽量减小放大器本身噪声对被放大信号信噪比的影响，必须要求放大器本身噪声

尽量小。这就是在接收机前端应用有源微波电路——微波低噪声放大器的原因。目前可作为这种低噪声放大器的主要方式有微波晶体管低噪声放大器和微波参量放大器。前者可在12GHz频段上达到单级增益大于5 dB、噪声系数小于1.5dB的水平(例如国产WC—60型微波FET管放大器)；后者则是目前获得最低噪声放大的主要形式，它是早期实现卫星通信必不可少的，通常有常温参量放大器和致冷参量放大器两类。前者的噪声系数为1~2dB，后者低达0.1~0.2dB。

收信机中收信混频器的作用与发信混频器相反，用以实现微波信号向中频信号的变换(下变频)。由于肖特基势垒二极管具有混频损耗小、噪声低等一系列优点，因此，目前的微波收信混频器几乎都是采用这种半导体器件。

收信机中收信本地振荡源的作用和主要实现方式与发信机中的本地振荡源相同。主要区别在于对本振源功率大小和噪声高低等方面要求有所不同。前者主要在于尽可能获得最高的载噪比，后者主要为获取较大功率。

综上所述可见，微波有源电路也是构成微波收发信机最基本的部件。因此，只有在学会并掌握每种微波电路的结构、工作原理、基本特性及设计方法的基础上才能研制出满足要求的微波设备，才能维护好微波设备。而这正是一个从事微波通信工程的技术人员所必须具备的基本能力。鉴于这种情况，本书各章将从工作原理、基本特性、结构和设计方法等几个方面对微波晶体管放大器、微波二极管混频器、微波二极管放大器、微波二极管倍频器、微波振荡器和速调管功率放大器、行波管功率放大器等主要有源微波器件及电路进行详细的阐述和分析。

目 录

前 言 绪 言

第一章 微波晶体管放大器

- § 1.1 概述····· (1)
- § 1.2 微波晶体管的结构和等效电路····· (2)
 - 1.2.1 微波双极晶体管的内部结构和等效电路·· (3)
 - 1.2.2 微波场效应晶体管的内部结构和等效
电路····· (5)
- § 1.3 微波晶体管的S参数····· (7)
- § 1.4 微波晶体管放大器的主要性能····· (11)
 - 1.4.1 微波晶体管放大器的噪声系数····· (14)
 - 1.4.2 微波晶体管放大器的增益····· (17)
 - 1.4.3 微波晶体管放大器的稳定性····· (22)
- § 1.5 小信号微波晶体管放大器的设计····· (28)
- § 1.6 微波晶体管功率放大器····· (34)
 - 1.6.1 微波晶体管功率放大器的非线性失真···· (35)
 - 1.6.2 微波晶体管功率放大器的设计····· (42)
- § 1.7 新型微波晶体管及其电路····· (46)

小 结

习 题

参考文献

第二章 微波混频器

- § 2.1 概述····· (59)
- § 2.2 收信混频原理及其特性分析····· (60)
 - 2.2.1 肖特基势垒二极管····· (60)
 - 2.2.2 收信混频原理及其等效电路····· (65)
 - 2.2.3 收信混频器的主要特性····· (70)
 - 2.2.4 收信混频器的基本电路····· (81)

2.2.5	微波场效应晶体管混频器	(91)
§ 2.3	发信混频原理及其特性分析	(95)
2.3.1	变容二极管特性	(96)
2.3.2	发信混频原理	(101)
2.3.3	发信混频器特性的理论分析	(103)
2.3.4	发信混频器的基本电路	(111)

小 结

习 题

参考文献

第三章 微波二极管放大器

§ 3.1	概述	(117)
§ 3.2	微波变容二极管参量放大器	(118)
3.2.1	参量放大器的工作原理	(118)
3.2.2	非简并参量放大器的等效电路	(121)
3.2.3	非简并参量放大器的特性分析	(123)
3.2.4	非简并参量放大器的基本电路及设计考虑	(141)
§ 3.3	雪崩二极管放大器	(146)
3.3.1	雪崩二极管的工作原理及其特性	(146)
3.3.2	微波二极管负阻放大器的特性分析	(152)
3.3.3	雪崩二极管放大器电路实例	(162)

小 结

习 题

参考文献

第四章 微波二极管倍频器

§ 4.1	概述	(170)
§ 4.2	变容管倍频原理	(171)
4.2.1	非线性电容产生谐波的过程	(171)
4.2.2	倍频器的基本电路	(172)
§ 4.3	变容管倍频器的特性分析	(176)
4.3.1	电流-电压关系及其阻抗特性	(176)

4.3.2	倍频器的输出功率和效率·····	(181)
§ 4.4	变容管倍频器的设计·····	(182)
4.4.1	变容管倍频器电路型式的选择·····	(182)
4.4.2	变容管倍频器的设计方法——查表法·····	(184)
§ 4.5	阶跃恢复二极管倍频器·····	(191)
4.5.1	阶跃管特性及其等效电路·····	(191)
4.5.2	阶跃管倍频器工作原理与特性分析·····	(196)

小 结

习 题

参考文献

第五章 微波振荡器

§ 5.1	概述·····	(215)
§ 5.2	微波晶体管振荡器·····	(216)
5.2.1	微波晶体管振荡器的工作原理·····	(216)
5.2.2	微波晶体管振荡器的设计·····	(222)
§ 5.3	微波二极管负阻振荡器·····	(231)
5.3.1	体效应二极管的工作原理及其基本特性·····	(231)
5.3.2	微波二极管负阻振荡器电路及其基本特性·····	(241)

小 结

习 题

参考文献

第六章 微波控制电路

§ 6.1	概述·····	(260)
§ 6.2	PIN二极管·····	(261)
6.2.1	PIN管的基本特性·····	(261)
6.2.2	PIN管的等效电路及主要参数·····	(265)
§ 6.3	微波开关电路·····	(272)

6.3.1	单刀单掷开关	(273)
6.3.2	单刀双掷开关	(279)
§ 6.4	微波相位调制器	(282)
6.4.1	微波二相相位调制器的工作原理	(282)
6.4.2	反射式微带型0、 π 相位调制器电路	(287)
小 结		
习 题		
参考文献		

第七章 微波电子管放大器

§ 7.1	速调管放大器	(300)
7.1.1	双腔速调管放大器	(300)
7.1.2	多腔速调管放大器	(309)
§ 7.2	行波管放大器	(312)
7.2.1	概述	(312)
7.2.2	行波管(EY-501型)的结构	(313)
7.2.3	行波管放大器的工作原理	(318)
7.2.4	行波管放大器的工作特性	(323)
小 结		
习 题		
参考文献		
附 录		

第一章 微波晶体管放大器

§ 1.1 概 述

近十年来，随着半导体技术的进步，微波晶体管放大器在降低噪声、提高工作频率和增大输出功率等方面都取得了很大的进展。例如，在低噪声放大方面，12GHz的场效应晶体管放大器，其噪声系数可达1.5dB，是常温参放的竞争对象；18GHz及其以下频率上的高电子迁移率晶体管放大器，其噪声系数可低于1dB，足以取代常温参放。在功率放大方面，目前单管功率放大器在1GHz以上超过40W，2GHz以上可达20W，甚至在X波段上的场效应晶体管放大器，输出功率也有10W左右。可用来取代中等功率的行波管放大器。

微波晶体管放大器之所以得到这样迅速发展，是因为它具有工作频带宽、噪声低、动态范围大以及耗电省、体积小、重量轻、成本低等一系列优点。

此外，微波晶体管随着频率的升高，尺寸变小，阻抗变低。因此，便于与分布参数的微带电路相联接。

晶体管的潜力怎样？它能否再往更高的频段和更大的功率容量发展？从理论上讲，不论是双极晶体管还是单极晶体管，它们的频率极限与允许电压的极限值由下式决定：

$$U_m f_T = \frac{E_B V_S}{2\pi} = \begin{cases} 1 \times 10^{12} & \text{V/s (砷化镓材料)} \\ 2 \times 10^{11} & \text{V/s (硅材料)} \\ 1 \times 10^{11} & \text{V/s (锗材料)} \end{cases}$$

其中， U_m 是加在器件上最大允许电压 (V)；

f_T 是电流增益带宽乘积，或称特征频率 (Hz)；

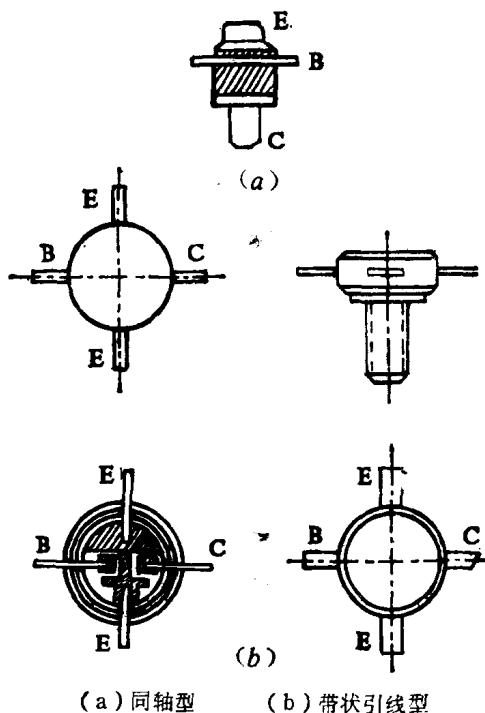
E_B 是半导体材料的介质击穿电场 (V/m)；

V_S 是载流子饱和漂移速度 (m/s)。

由上式可见，硅的极限值比锗大两倍，砷化镓材料的极限值比锗大10倍，比硅大5倍。从目前微波晶体管所达到的水平来看，只有砷化镓晶体管还有相当大的潜力，因此，估计今后在X波段以上、乃至毫米波段将主要使用这类器件。

§ 1.2 微波晶体管的结构和等效电路

微波晶体管与普通晶体管的工作原理基本相同。但是两者的结构工艺却有很大差别。为了保证晶体管的外部结构即封装形式产生的寄生电抗最小，同时便于接入分布参数的外电路，微波晶体管常用的封装形式有同轴型和带状引线型两种，如图(1.2-1)所示。它们分别适用于同轴型电路和微带电路。此外，在微波电路



图(1.2-1) 微波晶体管的外形结构

中也可以直接使用未加封装的管芯，以便消除管壳寄生参数的影响。

1.2.1 微波双极晶体管的内部结构和等效电路

微波双极晶体管内部结构通常是平面型。这种结构的主要优点是性能稳定，电流放大倍数随电流的变化较小，并允许在较小有效结面积的条件下，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。根据提高晶体管的高频特性和增加功率容量的原则，可把结构设计成发射极和基极交叉排列的所谓交指型结构。它常用于低噪声和小功率晶体管中，如图(1.2-2)(a)所示。为增加功率容量也可采用其它形式的结构，如覆盖型、网格型等如图(1.2-2)(b)、(c)所示。

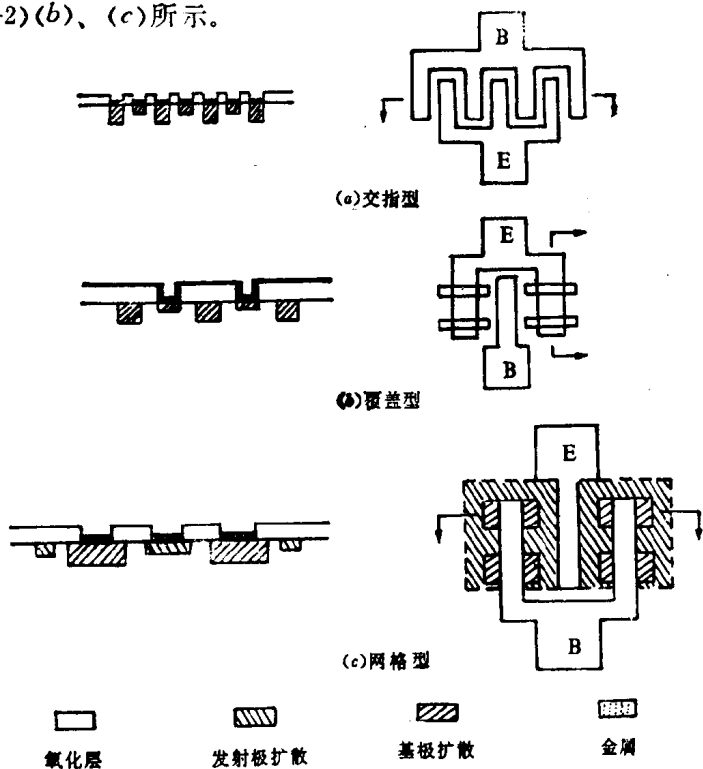
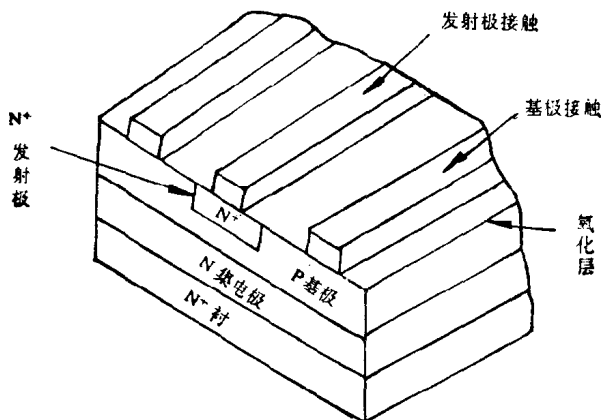


图 (1.2-2) 微波双极晶体管内部结构示意图

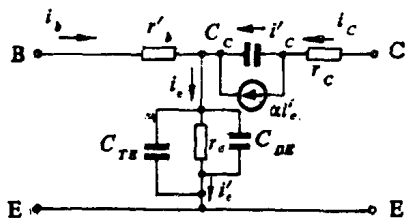
图(1.2-3)给出了双极晶体管的交指型平面结构的部分截面示意图。它是在 N^+ 型衬底上生长一层 N 型外延层(集电极), 在外延层上扩散形成 P 型基区, 然后在基区上形成一层 N^+ 型发射



图(1.2-3) 交指型结构的截面示意图

区, 最后制作发射极、基极和集电极的欧姆接触, 这样就形成了NPN型晶体管。

如果将上述管芯接成共发射极形式, 其小信号作用下的简化等效电路如图(1.2-4)所示。图中 r_e 为发射结电阻; r'_b 为基极



图(1.2-4) 微波双极晶体管管芯共发射极简化电路

扩展电阻; r_c 为集电极电阻; $C_e (= C_{DE} + C_{TE})$ 为发射极电容; C_c 为集电极电容。

将管芯封装之后, 还会引入一些寄生参量, 其等效电路如图

(1.2-5)所示。图中，反馈电容 C_{r1} 和 C_{r2} 影响晶体管的增益和稳定性。管壳输入电容 C_i 、基极引线电感 L_{bp} 和集电极引线电感 L_{cp} 不但使晶体管带宽变窄，还会引起输入损耗，致使晶体管的增益下降。因此，若能直接使用管芯，将会更好地发挥器件的性能。

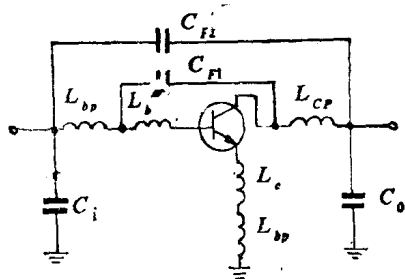


图 (1.2-5) 封装管壳的等效电路

1.2.2 微波场效应晶体管的内部结构和等效电路

微波场效应晶体管与普通场效应晶体管工作原理基本相同，都是利用多数载流子工作，其高频特性、噪声特性和稳定性等均优于双极晶体管，因而在8GHz以上频段，几乎都选用微波场效应晶体管。

目前应用的微波场效应晶体管主要有绝缘栅型、结型和金属半导体型等三种，其中以砷化镓半导体材料衬底上制作的N沟道金属-半导体场效应晶体管 (MESFET) 性能最好，因此，广泛用作低噪声放大器和功率放大器。

图 (1.2-6) 是上述 (MESFET) 内部结构示意图。衬底采用高电阻率 ($10^8 \Omega\text{-cm}$) 本征砷化镓材料，它基本上是绝缘体。在衬底上生长一层N型外延层，并在N型外延层上蒸发铬-镍金属，以便形成源、漏的势垒。一般情况下，金属和半导体接触时，由于金属原子核正电子的吸引力大，使N型半导体外延层中的电子跑向金属一侧，结果就使金属一侧带负电，而N型半导体由于失去电子而带正电，由此形成正负电荷的势垒 (又称肖特基势垒)。然后，在源、漏上蒸发金-锑合金，使源和漏的肖特基势垒变为欧姆接触。

(a) 所示。图中虚线框内表示无任何封装的管芯等效电路模型，即本征等效电路模型。各等效元件在结构中的位置如图(b)所示。其中 g_m 是场效应管的跨导； G_d 是漏电导； R_{gs} 是沟道电阻； C_{gs} 是源栅电容。外部寄生元件有：源电阻 R_s ；栅极金属电阻 R_g ；漏电导 G_{dr} ；衬底电容 C_{ds} 。其中 R_g 和 R_s 是影响晶体管噪声性能的主要外部热噪声源。

§ 1.3 微波晶体管的S参数

由前面对微波晶体管等效电路的分析可知，其封装后的等效电路很复杂、参量多、分析繁，因而不便于电路设计。如果仿照低频的方法，即将小信号下的微波晶体管等效为一个线性二端口网络，然后用其网络参数 Z 、 Y 或 h 来表示它的外部特性，进行电路分析和设计，则是方便易行的。但在微波频段，为测得这些参数而必须实现开路或短路的电路条件是很困难的；并且，由于寄生参量和器件内部的耦合作用，往往在进行这种测量时很容易产生寄生振荡而无法进行；此外，在微波频段，输入和输出端均由分布参数元件构成，这就限制了这种方法的应用。由传输线理论可知，传输线上任何一点的电压波都由一个入射电压波和一个反射电压波叠加而成，而这些电压波在微波频段测量是很方便的。因此，可以选择端口处的入射电压和反射电压作为微波晶体管等效网络端口的变量，即采用S参数来表征微波晶体管的外部特性，所以在微波波段利用S参数分析和设计放大器。至于S参数的定义和物理意义则作如下介绍。

首先，在小信号条件下，将微波晶体管等效为图(1.3-1)所示的线性二端口网络。图中 V_1 为输入电压， I_1 为输入电流， V_2 为输出电压， I_2 为输出电流；并且网络输入和输出端的传输线特性阻抗相等，即 $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_0$ 。通常，由于传输线特性阻抗不可能正好等于网络的输入阻抗和负载阻抗，致使在其输入和输出端都存在入射电压波(或入射电流波)和反射电压波(或反射电流波)