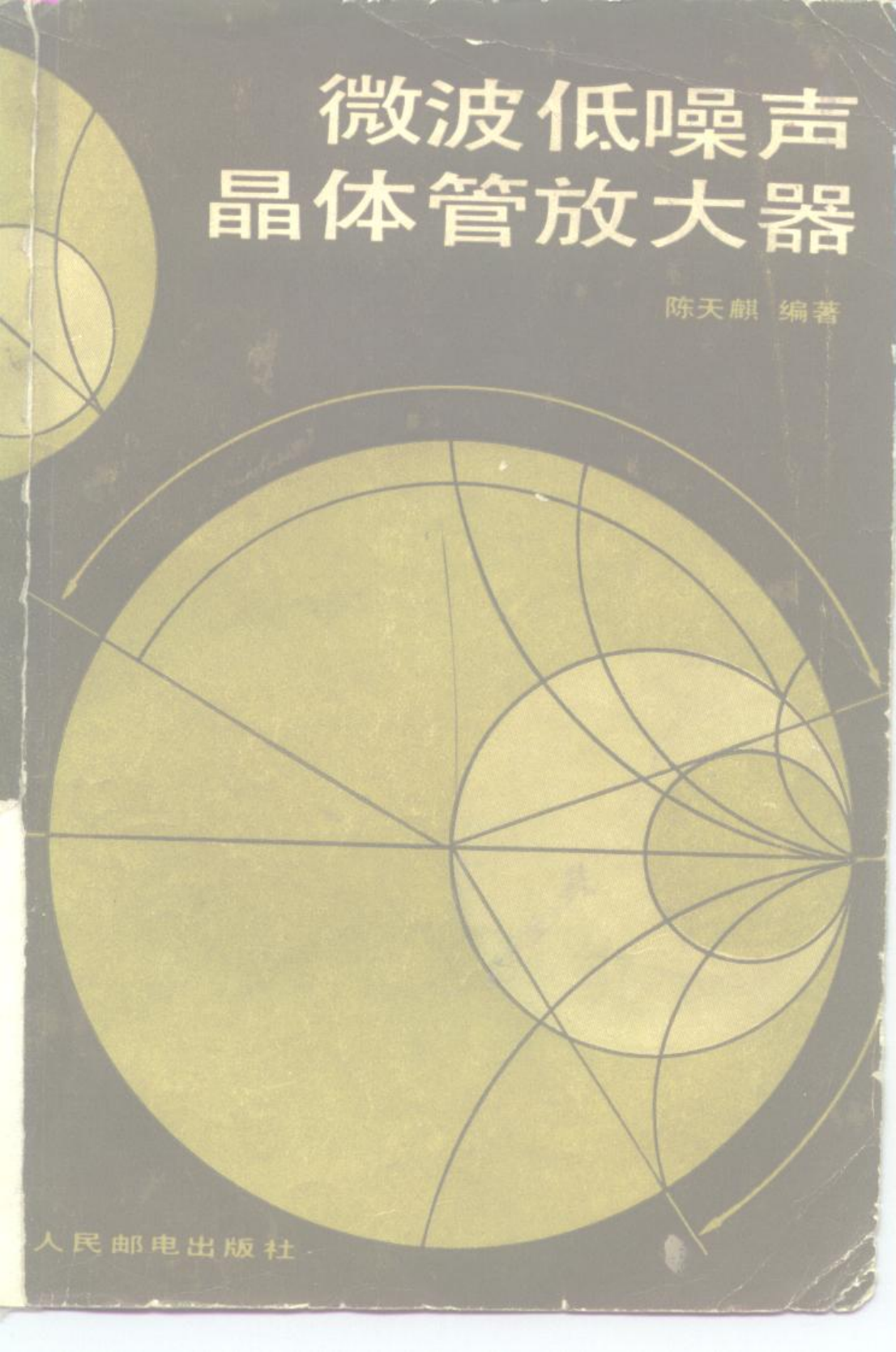


微波低噪声 晶体管放大器

陈天麒 编著



人民邮电出版社

微波低噪声晶体管放大器

成都电讯工程学院 陈天麒 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书从第一章到第六章系统地论述了散射参量的基本理论以及微波双极晶体管和微波场效应晶体管的基本特性。同时用散射参量详细地分析了单端式、平衡式和负阻反射型微波低噪声晶体管放大器的各种基本特性，如增益、带宽、匹配、噪声系数、噪声量度及中和等。从第七章到第九章介绍了用散射参量设计微波低噪声晶体管放大器的基本原理和方法。最后，第十章论述了微波晶体管散射参量和噪声参量的测量原理与方法，并用信号流图分析了测量误差。

本书可供从事于雷达、电子对抗、微波通信等专业的工程技术人员科研工作者和高等院校师生参考。

微波低噪声晶体管放大器

成都电讯工程学院 陈天麒 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

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 1983年1月第一版

印张：12 24/32页数：204 1983年1月北京第一次印刷

字数：291千字 印数：1—8,000册

统一书号：15045·总2648-无6214

定价：1.55元

前 言

随着雷达、导航、电子对抗、微波通讯、宇宙通讯、电视、遥测遥控的新发展,要求微波系统向小型化、自动化、固体化、集成化、宽频带、低噪声以及更高的工作频段发展。微波低噪声晶体管(双极晶体管和场效应晶体管)及其相应的低噪声放大器就是为适应这种新发展的要求而产生和发展起来的一种新型固体放大器件。今日科学技术的发展是极为迅速的,新的研究成果、新的技术不断涌现出来。在60年代中期,由于半导体平面外延工艺的发展,双极晶体管的工作频率刚跨进微波频段,场效应晶体管也随之而进入了微波频段,并在低噪声性能、更高工作频率等多方面显示出比双极晶体管更为优越的性能,并且很快发展成为一种相当成熟的微波固体器件。在我国,微波低噪声晶体管及其相应的低噪声放大器尚处于发展阶段,我们不仅需要吸取国外的先进技术,同时也需要总结我国自己的经验。为此根据国内外微波低噪声晶体管放大器的发展现状,并根据作者所作的科研成果和教学实践编写了本书。考虑到读者自学的方便,在本书中,对有关微波低噪声晶体管放大器设计的基本内容作了详细的分析和推导,并列举了许多计算例子。

本书从第一章到第六章讲的是基本理论。首先从微波传输线理论(要求读者具备传输线基本理论和线性代数的基本知识)出发,较详细地系统地论述了散射参量的概念及其基本理论,并介绍了微波双极晶体管和微波场效应晶体管的基本特性。然后,利用散射参量对单端式、平衡式和负阻反射型微波低噪声

晶体管放大器的基本特性进行了分析。详细地分析了稳定性和匹配问题，并用噪声波对微波晶体管放大器的噪声特性进行了分析。这些分析对任何线性二端口网络都是适用的。

微波晶体管负阻反射型放大器是近两年发展起来的一种新型放大器，它比参量放大器简单，且噪声也较低，因而具有实际工程意义。这种放大器目前尚处于实验阶段，本书也对它作了分析。另外，对平衡式微波晶体管放大器的基本原理和特性也作了详细的分析。

从第七章到第九章论述了微波低噪声晶体管放大器的设计原理和设计方法。书中着重于基本设计原理和基本设计方法的论述，并列有各种放大器的设计例子。至于宽频带微波晶体管放大器的综合设计法和计算机辅助设计法，由于需要较大的篇幅，而且已经有许多专著可阅读，故本书对它们未作讨论。

第十章论述了微波晶体管小信号散射参量和噪声参量的测量原理和方法。重点论述了几种普通实验室能建立的、以微波测量线进行测量的基本原理和方法，并用信号流图对测量误差进行了分析。

本书在编写过程中黄香馥同志审阅过原稿，提出了许多宝贵的意见；秦士和李普成同志对本书修改提出了许多中肯的意见，作者在此表示诚挚的谢意。

作 者

1982年1月

目 录

前言

绪论 1

第一章 S 参量基本理论 6

§ 1-1 概述 6

§ 1-2 一端口网络 S 参量 8

§ 1-3 n 端口网络 S 参量 11

§ 1-4 归一化波与归一化 S 参量 15

§ 1-5 归一化波与 S 参量的物理意义 20

1-5-1 归一化波的物理意义 20

1-5-2 S 参量的物理意义 21

§ 1-6 S 参量与其他参量的换算 26

§ 1-7 不定型 S 矩阵及其特性 30

§ 1-8 S 参量的换算 33

§ 1-9 稳定性 37

§ 1-10 中和 39

§ 1-11 有源性与无源性 42

1-11-1 有源性与无源性 42

1-11-2 有耗与无耗 45

§ 1-12 一般化 S 参量 47

附录 A1-1 散射概念的一般化 48

附录 A1-2 一般化 S 参量公式的推导 54

第二章 微波低噪声晶体管 61

§ 2-1	概述	61
§ 2-2	微波双极晶体管	62
2-2-1	结构及小信号等效电路	62
2-2-2	优质因数	67
2-2-3	S 参量	72
2-2-4	S 参量的频率特性	78
2-2-5	S 参量与工作状态的关系	80
2-2-6	噪声系数	82
2-2-7	噪声系数的频率特性	92
§ 2-3	微波场效应晶体管	95
2-3-1	结构与小信号等效电路	95
2-3-2	优质因数	98
2-3-3	S 参量	100
2-3-4	S 参量的频率特性	104
2-3-5	S 参量与工作状态的关系	107
2-3-6	噪声系数	109
2-3-7	噪声系数的频率特性	118
第三章	微波晶体管放大器的基本分析	121
§ 3-1	概述	121
§ 3-2	功率增益	122
3-2-1	输入功率和输出功率	122
3-2-2	工作功率增益 G_p	127
3-2-3	资用功率增益 G_u	129
3-2-4	转换功率增益 G_t	130
3-2-5	单向转换功率增益 G_u 与单向优质因数 u	131
§ 3-3	稳定性	135
3-3-1	端口反射系数的轨迹	135
3-3-2	绝对稳定判别准则	141
3-3-3	条件稳定与稳定判别圆	146

3-3-4	稳定系数 K_s 的特性	150
§ 3-4	稳定性与匹配	154
3-4-1	共轭匹配	154
3-4-2	绝对稳定放大器与最大功率增益 G_m	165
3-4-3	可匹配的潜在不稳定放大器与最小功率增益 G_{min}	168
§ 3-5	噪声系数和等效输入噪声温度	171
3-5-1	噪声系数 F 和等效输入噪声温度 T_e	171
3-5-2	噪声波的基本概念及噪声系数	174
§ 3-6	噪声量度 M	177
§ 3-7	频带宽度 B	180
3-7-1	窄带放大器的带宽	180
3-7-2	宽带放大器的带宽	183
§ 3-8	放大器的单向化——中和	184
3-8-1	并联中和	184
3-8-2	串联中和	186
§ 3-9	放大器的动态范围	191
3-9-1	线性动态范围 DR	192
3-9-2	无假响应动态范围 DR_m	194
§ 3-10	低噪声偏置电路	198
附录 A3-1	绝对稳定条件下 $B_1 > 0$ 和 $B_2 > 0$ 的证明	200
附录 A3-2	传输参量与网络互易性的量度	202
第四章	微波晶体管放大器特性的图解分析	206
§ 4-1	概述	206
§ 4-2	G_p 的图解	206
§ 4-3	G_o 的图解	210
§ 4-4	G_u 的图解	212
§ 4-5	F 和 T_e 的图解	215
§ 4-6	M 的图解	217

4-6-1	等 M 圆	217
4-6-2	最小噪声量度 $M_{\min}$	220
第五章 负阻反射型放大器的基本分析		225
§ 5-1	概述	225
§ 5-2	功率增益	226
5-2-1	反射功率增益 G_r	226
5-2-2	G_r 的图解	227
§ 5-3	噪声系数	230
5-3-1	栅极端口反射型放大器的噪声系数	231
5-3-2	漏极端口反射型放大器的噪声系数	231
§ 5-4	展宽频带的基本原理	238
5-4-1	无源电抗补偿原理	238
5-4-2	有源电抗补偿原理	242
§ 5-5	环形器-负阻放大器的稳定性	241
第六章 平衡式放大器的基本分析		242
§ 6-1	概述	242
§ 6-2	平衡式放大器的工作原理	244
§ 6-3	定向耦合器	244
6-3-1	正交定向耦合器的 S 矩阵	244
6-3-2	信号分配与负载失配的影响	250
6-3-3	信号合成与负载失配的影响	254
§ 6-4	平衡式放大器的 S 矩阵	258
§ 6-5	平衡式放大器的匹配、功率增益和稳定性	265
6-5-1	匹配	265
6-5-2	功率增益	266
6-5-3	稳定性	267
§ 6-6	平衡式放大器的噪声系数和噪声量度	268
6-6-1	噪声系数	268

6-6-2 噪声量度	271
第七章 单端式放大器的设计	272
§ 7-1 概述	272
§ 7-2 设计方法与步骤	272
7-2-1 设计方法	272
7-2-2 设计步骤	274
§ 7-3 匹配网络的基本形式	276
§ 7-4 二端口匹配网络的基本分析	279
7-4-1 并联匹配网络	279
7-4-2 串联匹配网络	288
7-4-3 宽带匹配网络	294
§ 7-5 高增益放大器的设计	294
7-5-1 绝对稳定情况下的设计	294
7-5-2 潜在不稳定情况下的设计	299
7-5-3 多级放大器的设计	302
§ 7-6 低噪声放大器的设计	304
7-6-1 绝对稳定情况下的设计	304
7-6-2 潜在不稳定情况下的设计	306
7-6-3 多级放大器的设计	308
§ 7-7 低噪声量度放大器的设计	309
§ 7-8 单向放大器的设计	314
§ 7-9 宽带放大器的设计	316
§ 7-10 短线均衡放大器的设计	320
第八章 负阻反射型放大器的设计	326
§ 8-1 利用潜在不稳定晶体管的设计	326
§ 8-2 利用绝对稳定晶体管的设计	329
第九章 平衡式放大器的设计	335
§ 9-1 定向耦合器的设计	335

§ 9-2 放大器的设计	338
第十章 小信号 S 参量和噪声参量的测量	340
§ 10-1 概述	340
§ 10-2 小信号 S 参量的测量条件	341
§ 10-3 辅助通道法测量原理和方法	342
10-3-1 S_{11} 和 S_{22} 的测量原理和方法	343
10-3-2 S_{21} 和 S_{12} 的测量原理和方法	345
§ 10-4 自环路法测量原理和方法	353
§ 10-5 负载反射法测量原理和方法	357
§ 10-6 矢量电压表法测量原理和方法	363
10-6-1 S_{11} 和 S_{22} 的测量原理和方法	363
10-6-2 S_{21} 和 S_{12} 的测量原理和方法	364
§ 10-7 网络分析仪法测量原理和方法	366
§ 10-8 测试部件的结构	368
§ 10-9 测量误差的分析	371
10-9-1 辅助通道法的测量误差	371
10-9-2 自环路法的测量误差	383
10-9-3 负载反射法的测量误差	384
§ 10-10 F 的测量原理和方法	385
§ 10-11 噪声系数参量 $F_{\min}$ 、 N' 和 Γ_{opt} 的测量原理 和方法	388
§ 10-12 噪声波参量 T_a 、 T_b 、 T_c 和 φ_c 的测量原理和 方法	390
10-12-1 间接测量法	390
10-12-2 直接测量法	390
主要参考文献	396

绪 论

微波低噪声晶体管放大器的发展和应用

微波放大器通常是随着微波放大器件的产生和工艺技术的改进而发展的。微波低噪声晶体管放大器也是如此。它随着微波低噪声晶体管的产生和工艺技术的发展而发展，40年代末期，世界上第一只半导体三极管(双极晶体管)问世，由于其体积小、重量轻、省电等优点，受到了极大的重视，并迅速发展成为固体电子器件的一个重要分支。到60年代中期，由于平面外延工艺的发展，双极晶体管的工作频率跨进了微波频段，出现了微波双极晶体管及其相应的放大器。

早在1952年，W·肖克莱(W·Shokly)就提出了场效应晶体管(FET)，但由于当时工艺技术条件的限制，这种管子还未发展成为实用固体器件。直到60年代中期，随着半导体材料和工艺技术的迅速发展，FET不但很快成为实用的固体器件，而且紧跟在双极晶体管之后迅速地进入了微波频段，出现了微波FET及其相应的放大器。微波双极晶体管和微波FET的并驾齐驱，使微波晶体管放大器*的发展日新月异。60年代中期，微波晶体管放大器出现后，由于其频带宽、稳定性好、省电、简单等特点，且其噪声性能也不差，因而很快取代了相应频段的隧道二极管放大器。随着工作频率的提高和噪声性能的改善，到了60年代晚期，微波晶

* 由于技术发展的历史原因，通常所谓“微波晶体管”指的是“微波双极晶体管”。本书所用的“微波晶体管”是泛指“微波双极晶体管”和“微波场效应晶体管”。

体管放大器开始取代了 L 和 S 波段的低噪声行波管放大器*。1974 年第一个 C 波段的微波晶体管放大器代替了低噪声行波管放大器投入了军事系统的应用。1975 年 X 波段 ($8\sim 12$ 千兆赫) 的微波晶体管放大器产品问世。现在已有 $12\sim 18$ 千兆赫的产品。 $18\sim 26$ 千兆赫的产品也将很快投入市场。在低微波频段 (如 L 波段) 微波晶体管放大器的噪声系数略次于参量放大器 (PA)，但由于它稳定，简单，因而在此频段上已取代 PA 。

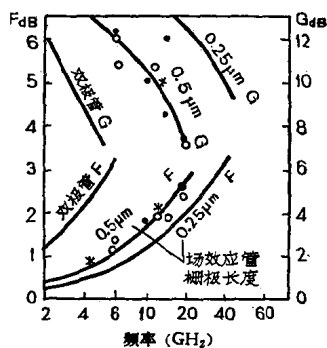


图 0-1 微波晶体管的发展水平

1978 年微波双极晶体管和微波 FET 的功率增益 G 和噪声系数 F 所达到的水平如图 0-1 所示^[1]。栅极长度为 0.25 微米的短栅砷化镓场效应晶体管 (GaAs-FET) 的计算值表明，它可以工作于 40 千兆赫，其噪声系数和功率增益分别为 $F=3.3$ 分贝和 $G=9$ 分贝。1977 年宽带低噪声微波晶放的产品水平如表 0-1 所示^[2]。

表中微波晶放的最小信号功率增益为 20 分贝，输入和输出驻波比不大于 2。由于微波 FET 可以达到的工作频率比微波双极晶体管可能达到的工作频率更高，并且前者的噪声系数也比后者的噪声系数低很多，因而在高于 4 千兆赫的频率上几乎都采用微波场效应管。为了更进一步降低噪声系数，已将低温技术应用于微波晶放中，并研制出了低温微波场效应晶体管放大器。例如，一个工作频率为 18 千兆赫、噪声系数为 2.3 分贝、功率增益为 7 分贝的 GaAs-FET 放大器，将其冷却到温度为

* 由于微波宽带低噪声行波管放大器的发展，及其大动态范围等特点，因此行波管放大器目前仍保持其相当的地位。

表 0-1 宽带低噪声微波晶放产品特性

频率(GHz)	0.5—1	1—2	2—4	2—4	4—8	8—12	12—18
器 件	双极晶体管			GaAs-FET			
最大噪声系数 (dB)	1.8—3.5	2.0—4.5	3.5—6.0	3.0—3.5	4.0—6.0	5.0—7.5	7.0—8.5
带内波动 ($\pm$ dB)	0.5—1.0	0.5—1.0	0.5—1.0	1.0	1.0—1.5	1.0—1.5	1.0—2.0
1dB增益压缩点 (dB _m)	5—15	5—15	5—18	5—15	5—23	5—13	7—10
三阶互调截取点 (dB _m)	15—23	15—25	15—28	15—25	15—23	15—23	16—20

77°K 时, 其噪声系数降为 1.2 分贝、功率增益为 10 分贝; 另一个工作频率为 4 千兆赫的低温 GaAs-FET 放大器, 其噪声系数仅有 0.4 分贝, 可与同频段的低温 PA 媲美。当工作频率高达 20 千兆赫以上时, 为了克服微波晶体管与电路的匹配困难以及单级功率增益低与高增益要求的矛盾, 研制出了微波晶体管负阻反射型放大器, 例如, 已研制出工作频率为 23.3~24.1 千兆赫的微波场效应晶体管反射型放大器, 其噪声系数为 6~7.7 分贝、功率增益为 8 ± 1 分贝; 工作频率为 27 千兆赫的这种反射型放大器, 其噪声系数为 8 分贝、功率增益为 6 ± 1 分贝。随着微波集成技术的不断发展, 已研制出了集成化的微波低噪声宽带放大器, 例如, 在 1.2×1.8 平方毫米 GaAs 基片上集成的 8~18 千兆赫的宽带低噪声放大器, 其带内增益为 6 ± 1 分贝, 最佳噪声系数为 5~7 分贝。

低噪声微波晶放已广泛地应用于宇宙通讯、雷达、电子对抗、遥测遥控、射电天文、大地测绘、微波通信、电视以及各种高精度的微波测量系统中的前端低噪声放大器, 以完成微弱信号的放大作用。因此, 对低噪声微波晶放的基本要求是: 噪

声系数低、足够的功率增益、工作稳定可靠、足够的带宽和大的动态范围等。此外，在不同的应用情况下，可能对其体积、重量、耗电量等等提出限制性要求。微波晶放还在向更高工作频率、低噪声、宽频带、集成化和标准化发展。

微波低噪声晶体管放大器的特点

与其他微波低噪声放大器相比较，低噪声微波晶放有下列主要特点：

(1) 频带宽，相位线性好。由于微波晶体管在从直流到微波的宽频带范围内都具有放大能力，因此易于实现宽带化。它的带宽主要受到匹配网络的限制。

(2) 稳定性好，可靠性高。通常微波晶放都是二端口传输型放大器，稳定性和可靠性都比参放、隧放等负阻反射型放大器更好。

(3) 噪声低。低噪声微波晶放的噪声系数仅次于 PA 的噪声系数，优于行波管放大器和隧道二极管放大器的噪声系数。

(4) 动态范围大。微波晶放的功率增益 1 分贝压缩点达毫瓦量级(见表 0-1)，因此动态范围大。

(5) 体积小、重量轻、耗电少，易于实现标准化和集成化。

微波低噪声晶体管放大器的分析方法

微波晶体管的内部结构和管壳封装会形成许多寄生参量。由于这些寄生参量的影响，以及双极晶体管的基区和场效应管的沟道分布特性，使它们在微波频率上不利于再用低频电流电压的概念及其相应的网络参量(例如， z 、 y 和 h 参量等等)来分析。因为这些参量的测量已变得很困难，以致无法测量，这时，

采用波的概念和相应的网络参量来分析较为有利。1965年 K·库罗凯瓦(K·Kurokawa)提出功率波和散射参量(或简称 S 参量)。1967年 Bodway 用它们来系统地分析微波晶放大为见效。本书主要用 S 参量对微波晶放进行分析和设计。

低噪声微波晶体管尺寸很小,在微波频率上其输入和输出阻抗较低,因此,无论在结构方面,还是在阻抗匹配方面,它都适合于与微带电路等配合应用,并且这种配合应用已成为低噪声微波晶放集成化的基础。因此,微带型放大器已成为低噪声微波晶放的基本结构型式。本书就以分析微带型低噪声微波晶放为主,其方法对其他传输型式的微波晶放也适用。

第一章 S 参量基本理论

§ 1-1 概 述

任何一个一端口网络，不管其内部结构如何，都可以用其端口上两个选定的变量及其相互关系来描述端口的外特性。两个变量中只有一个是独立变量(通常称之为激励变量或激励函数)，另一个则是因变量(又称为因果函数)。在数学上，一端口网络的外特性就用联系这两个变量的一个微分方程来描述。对于 n 端口网络，则用联系 $2n$ 个变量的 n 个微分方程来描述其外特性。如果网络是非线性的，这些方程就是非线性微分方程，其系数是激励变量的函数；如果网络是线性的，则这些方程就是线性微分方程，其系数是与激励变量无关的常数，且这些系数完全由网络中电路元件的性质、数值及其排列结构确定。在网络理论中将这此系数称为网络参量。如果 n 端口网络是线性的，且各端口都用正弦信号激励，则可很方便地将线性微分方程组变换成代数方程组(即将时域方程变换成频域方程)，将时域分析变换成频域分析，从而可以很方便地用矩阵代数进行分析。

显然，网络变量的选择和激励变量的确定具有一定的任意性。选择的网络变量不同或选定网络变量后选择的激励变量不同，则所得到的网络参量也就不同。选择什么样的网络变量，除考虑理论上的严密逻辑外，极为重要的是考虑所选择的变量