



工业和信息化部“十二五”规划教材



电子科学与技术专业规划教材

微波固态电路

Microwave Solid State Circuit

薛正辉 任武 李伟明 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材
电子科学与技术专业规划教材

微波固态电路

薛正辉 任 武 李伟明 编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍微波电子线路中主要无源元器件、有源元器件以及由它们组成的各种功能电路的基本原理、基本结构、基本功能和基本分析方法。无源元器件部分以微带类型为主,有源元器件仅介绍半导体(即“固态”)器件,电路以微带类型的混合集成电路为主。全书共分为7章,第1章介绍微波电路中常用的微带无源元件,第2章介绍微波半导体元器件,微波频率变换器、微波放大器、微波振荡器以及微波固态控制电路分列于第3章至第6章,第7章简单介绍作为当前迅速发展的新一代微波电路的微波集成电路(MIC)和微波单片集成电路(MMIC)的基本知识。

本书主要是为信息技术、通信、雷达、电子对抗、电子科学与技术 and 遥感遥测等专业的工科高年级本科生编写的教材,供“微波电子线路”、“微波有源电路”和“微波固态电路”课程使用,也可供从事微波电子线路研发的科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微波固态电路 / 薛正辉, 任武, 李伟明编. —北京: 电子工业出版社, 2015.12

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-26850-2

I. ①微… II. ①薛… ②任… ③李… III. ①微波电路—固态电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第178907号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29.75 字数: 768千字

版 次: 2015年12月第1版

印 次: 2015年12月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书曾于 2003 年 5 月完成书稿, 2004 年 4 月由北京理工大学出版社出版发行。该教材一直作为北京理工大学信息与电子学院微波专业方向的微波电子线路课程教材, 因为内容涉及从无源器件到有源器件, 从 PN 结原理模型到实际应用各种二极管、晶体管, 再到各个功能型组件, 如变频器、放大器、振荡器和控制型器件, 多年来一直得到学生、授课教师及研究设计人员的好评, 普遍认为学习起来循序渐进, 易懂好理解。该教材于 2006 年获得北京市‘精品教材’称号, 也是对本书内容编写的一个肯定。

在多年的教学过程中, 发现遵循本书的结构和主线很好讲授, 学生也容易接受。但是现在的电子科技水平发展日新月异, 原先还使用二极管、三极管搭建实现的混频器、放大器、振荡器等电路, 现在已经逐步被各种集成芯片所代替, 频段覆盖越来越宽, 性能提升越来越接近理论极限, 外部也不再需要复杂的配套电路, 这一切使得工程应用和基础知识讲授之间出现了差距, 甚至有些脱节, 而且近年来在随着频率扩展到太赫兹频段, 出现了新的器件结构、半导体材料、更强功能的集成芯片, 所以一直希望能把这部分内容加到本书体系中, 做到结构、原理、应用相呼应, 学生在学校学到的知识, 出了学校进入工作单位就能使用上。

有这样的知识扩充需求, 加上学校重视十二五国防教材的建设, 本书也被纳入了建设范畴。借此机会, 决定增加相关内容, 形成内容更加全面, 更加贴合实际设计应用。主要增加的内容包括: 第 1 章中新增巴伦结构的原理分析; 第 2 章中增加了一些常见的二极管如检波管、稳压管、发光二极管、整流二极管等的原理, 并对近年来取得较大成就的扩散型双基区二极管、3-D 三栅极晶体管、石墨烯晶体管和太赫兹肖特基管等进行介绍, 第 2 章最后还增加了工程上二极管、晶体管的分类, 晶体管的命名方式, 并给出一些典型微波半导体厂家的产品信息; 第 3 章主要增加了双双平衡混频器的原理及分析, 检波管的原理及相应电路的功能介绍, 最主要的增加了单平衡混频器的工程设计过程, 引入微波工程 CAD 技术, 使用微波电路仿真软件实现整体电路性能的仿真优化; 第 4 章主要增加了功率合成的介绍, 并详细给出不同方式的功率合成技术原理, 并给出按照最大功率增益和最小噪声系数设计晶体管放大器的过程, 为工程设计提供参考; 第 5 章主要增加了频率合成技术方面的内容, 介绍频率合成的发展历史, 以及现在使用较多的包括 DDS 技术、锁相环技术等混合频率源技术; 第 6 章对限幅器、衰减器、移相器部分均增加了一些内容, 包括不同应用电路的原理及性能分析, 并给出一个固定角度移相器的设计过程; 第 7 章主要增加了对 MMIC 电路设计实现过程, 工程实施流程及未来发展趋势等方面的介绍。

在本书的修订过程中, 得到信息与电子学院、微波技术研究所各位领导的大力支持, 得到北京理工大学教务处的鼎力扶持, 本稿才得以顺利完成, 特此对他们的帮助表示衷心的感谢!

相信本书将会受到广大教师、学生、设计师的喜爱, 我们也希望通过我们的努力, 让学生对学科的理解变得简单, 对电路、器件的设计流程熟悉起来。希望这次的修订能带来新的知识点和启发, 也希望大家能够多提意见, 以助于我们改正出现的错误, 提升教材质量。

编 者

2015 年 3 月于北京

目 录

绪论	1	1.8.2 1/4 波长阶梯阻抗变换器	36
0.1 微波波段	1	1.8.3 渐变线阻抗变换器	36
0.2 微波电子线路与微波固态电路	3	1.8.4 单株线阻抗变换器	37
0.3 本书的主要内容和章节安排	4	1.8.5 滤波阻抗变换器	39
第 1 章 无源微波元器件	7	1.9 微带线平衡-不平衡转换器	39
1.1 普通集总参数元件	7	1.9.1 双面微带线巴伦	41
1.1.1 金属引线	7	1.9.2 共面微带线巴伦	41
1.1.2 电阻器	8	1.9.3 Marchand 巴伦	42
1.1.3 电容器	9	习题 1	42
1.1.4 电感器	11	第 2 章 固态有源微波元器件	44
1.2 微波电路基片材料及传输线元件	12	2.1 半导体基础	44
1.2.1 微波电路基片材料	12	2.1.1 半导体特性	44
1.2.2 微波电路传输线元件	13	2.1.2 PN 结	51
1.3 集总参数元件的微带实现	13	2.1.3 金属与半导体的肖特基接触	58
1.3.1 微带电感与电容	13	2.1.4 金属与半导体的欧姆接触	61
1.3.2 微带支线电感与电容	14	2.1.5 N 型砷化镓 (GaAs) 半导体特性	62
1.3.3 平面微带螺线电感	15	2.1.6 异质结	65
1.3.4 微带缝隙电容	17	2.2 肖特基势垒二极管	69
1.3.5 微带交指电容	17	2.2.1 肖特基势垒二极管的结构	69
1.4 微带线分支元件与电桥	18	2.2.2 等效电路	70
1.4.1 微带 T 形接头	18	2.2.3 伏安特性	70
1.4.2 微带十字接头	19	2.2.4 特性参量	72
1.4.3 微带线三端口功率分配耦合器	20	2.3 变容二极管	73
1.4.4 微带环形电桥	21	2.3.1 变容二极管的结构	73
1.4.5 分支线电桥	22	2.3.2 等效电路	74
1.5 微带线定向耦合器	24	2.3.3 特性	74
1.6 微带线谐振器	26	2.3.4 特性参量	77
1.6.1 终端短路微带线谐振器	26	2.4 阶跃恢复二极管	78
1.6.2 终端开路微带线谐振器	29	2.4.1 阶跃恢复二极管的结构	78
1.6.3 其他平面结构谐振器	29	2.4.2 工作原理及特性参量	78
1.7 微带线滤波器	30	2.4.3 等效电路	80
1.7.1 微带线低通滤波器	31	2.5 PIN 二极管	81
1.7.2 微带线带通滤波器	32	2.5.1 PIN 二极管的结构	81
1.7.3 微带线带阻滤波器	33	2.5.2 特性	82
1.8 微带线阻抗变换器与阻抗匹配网络	34	2.5.3 等效电路	83
1.8.1 1/4 波长阻抗变换器	35		

2.6	雪崩二极管	84	3.2.1	电路工作原理与时频域关系	154
2.6.1	雪崩二极管的结构	85	3.2.2	电路功率关系与变频损耗	162
2.6.2	工作原理及特性参量	85	3.2.3	噪声特性	170
2.6.3	等效电路	88	3.2.4	混频器的其他电气指标	174
2.6.4	其他雪崩管结构及工作模式简介	89	3.2.5	单平衡混频器	175
2.7	转移电子效应二极管	91	3.2.6	双平衡混频器	178
2.7.1	转移电子效应二极管的结构	91	3.2.7	双双平衡宽带混频器	180
2.7.2	工作原理与特性	91	3.2.8	非线性电阻微波混频器的 基本电路	182
2.7.3	等效电路	93	3.2.9	微带型单平衡混频器设计	189
2.8	其余类型的二极管	94	3.2.10	采用芯片实现混频器	199
2.8.1	检波二极管	94	3.2.11	下变频器的常见结构	203
2.8.2	瞬态电压抑制二极管	95	3.3	参量变频器	204
2.8.3	发光二极管	96	3.3.1	小信号和频上变频器的 工作原理与方程	204
2.8.4	整流二极管	96	3.3.2	参变网络及和频上变频器的 一般能量关系	208
2.8.5	隧道二极管	99	3.3.3	小信号和频上变频器的性能	211
2.9	结型晶体管	100	3.3.4	小信号和频上变频器的 电路结构	218
2.9.1	工作原理	100	3.4	变容管功率上变频器	219
2.9.2	等效电路与结构	102	3.4.1	变容管的电压-电荷特性	219
2.9.3	特性	103	3.4.2	变容管功率上变频器的 电路和电路方程	220
2.9.4	异质结双极型晶体管	114	3.4.3	变容管功率上变频器的性能	221
2.10	场效应晶体管	115	3.4.4	变容管功率上变频器的 电路结构	222
2.10.1	结型场效应晶体管	115	3.5	变容管倍频器	224
2.10.2	金属氧化物半导体场效应管	119	3.5.1	变容管倍频器的等效电路及 电路方程	224
2.10.3	金属半导体场效应晶体管	126	3.5.2	变容管倍频器的性能	225
2.10.4	异质场效应晶体管	131	3.5.3	变容管倍频器的电路结构	229
2.11	晶体管发展新技术	133	3.6	阶跃管倍频器	230
2.11.1	以 SiC 材料为基底的肖特基 二极管	134	3.6.1	阶跃管倍频器的工作原理 及分析	230
2.11.2	扩散型双基区二极管	135	3.6.2	阶跃管倍频器的电路	238
2.11.3	3-D 三栅极晶体管	136	3.7	场效应管混频器及倍频器	239
2.11.4	石墨烯晶体管	137	3.7.1	单栅场效应管混频器	239
2.11.5	太赫兹肖特基二极管	138	3.7.2	双栅场效应管混频器	241
2.11.6	几种新概念型的晶体管	141	3.7.3	FET 倍频原理	243
2.12	微波半导体产品简介	144	3.7.4	FET 倍频器电路	245
2.12.1	半导体产品命名方式	144			
2.12.2	微波半导体产品	148			
习题 2		152			
第 3 章	微波频率变换器	153			
3.1	概述	153			
3.2	非线性电阻微波混频器	154			

3.8 检波器	246	5.5.3 振荡器电路	341
3.8.1 检波二极管	247	习题 5	344
3.8.2 检波器原理	250	第 6 章 微波固态控制电路	345
3.8.3 检波器主要技术指标	251	6.1 概述	345
3.8.4 检波器的分类	257	6.2 PIN 管微波开关	345
3.8.5 检波器电路	260	6.2.1 PIN 管微波开关的基本分析	345
习题 3	261	6.2.2 PIN 管微波开关的基本电路 结构	355
第 4 章 微波放大器	264	6.3 场效应管微波开关	357
4.1 概述	264	6.4 微波限幅器	359
4.2 微波参量放大器	265	6.4.1 微波限幅器简介	359
4.2.1 可变电抗中能量转换与放大的物理过程	265	6.4.2 限幅器工作原理	360
4.2.2 参量放大的一般能量关系	267	6.4.3 PIN 二极管限幅器的分类	363
4.3 微波晶体管放大器	268	6.4.4 PIN 二极管限幅器技术指标	367
4.3.1 微波晶体管放大器的基本分析	268	6.5 微波电调衰减器	368
4.3.2 微波晶体管放大器的结构	287	6.5.1 衰减器的主要技术指标	368
4.3.3 微波晶体管放大器设计	292	6.5.2 衰减的基本原理	369
4.3.4 微波晶体管放大器的 CAD 简介	296	6.5.3 PIN 管电调衰减器	374
4.4 微波晶体管功率放大器	297	6.5.4 MESFET 电调衰减器	380
4.4.1 微波晶体管功率放大器的指标体系	297	6.6 微波电控移相器	381
4.4.2 微波晶体管功率放大器的结构	299	6.6.1 基本移相器原理及技术指标	382
4.4.3 功率合成技术	300	6.6.2 开关线式移相器	384
习题 4	309	6.6.3 高通/低通滤波器式移相器	385
第 5 章 微波振荡器	310	6.6.4 反射型移相器	387
5.1 概述	310	6.6.5 加载线式移相器	388
5.2 雪崩二极管振荡器	311	6.6.6 定向耦合器型移相器	398
5.2.1 负阻振荡器的一般理论与基本分析	311	6.6.7 平衡式移相器	402
5.2.2 微波振荡器的技术指标	320	6.6.8 四位移相器	404
5.2.3 雪崩二极管振荡器的基本电路	323	习题 6	404
5.3 转移电子器件振荡器	325	第 7 章 微波集成电路	406
5.3.1 转移电子器件振荡器工作模式	325	7.1 概述	406
5.3.2 转移电子器件振荡器电路结构	330	7.2 单片微波集成电路的材料与元件	408
5.4 微波晶体管振荡器	331	7.2.1 单片微波集成电路的基片材料	408
5.4.1 微波晶体管振荡器的起振分析	331	7.2.2 单片微波集成电路的无源元件	408
5.4.2 微波晶体管振荡器的电路结构	333	7.2.3 单片微波集成电路的有源元件	410
5.5 微波频率合成技术	335	7.3 单片微波集成电路的设计特点	411
5.5.1 频率合成技术发展及介绍	336	7.4 微波集成电路 CAD 技术	412
5.5.2 频率合成器的主要性能指标	341	7.4.1 MIC CAD 技术应用的发展	412
		7.4.2 MIC CAD 仿真能力	413
		7.4.3 MIC CAD 的基本实施过程	414

7.4.4	设计中用到的器件模型	415	7.7.4	微波及毫米波集成组件	431
7.5	微波集成电路的加工工艺简介	417	7.8	MMIC 电路发展趋势	435
7.5.1	微波集成电路工艺流程简述	417	附录 A	半导体二极管参数符号及其意义	438
7.5.2	单片微波集成电路工艺流程 简述	418	附录 B	双极型晶体管参数符号及其意义	442
7.6	微波集成电路新技术简介	424	附录 C	场效应管参数符号意义	449
7.6.1	多芯片组件技术 (MCM)	424	附录 D	国内外半导体厂家信息表	452
7.6.2	低温共烧陶瓷多层集成电路 技术 (LTCC)	425	附录 E	全球半导体器件厂商英文缩写与 中文全称对照	459
7.7	微波及毫米波集成电路应用实例	427	附录 F	商业仿真软件简介	461
7.7.1	微波及毫米波集成电路在雷达 领域的应用	427	参考文献		467
7.7.2	微波及毫米波集成电路在电子 对抗 (ECM) 领域的应用	430			
7.7.3	微波及毫米波集成电路在通信 领域的应用	430			

绪 论

电路的产生和开始应用可以追溯到 18 世纪晚期和 19 世纪早期。1800 年，意大利物理学家亚历山德罗·伏特（Alessandro Volta, 1745—1827）发明了第一块电池——伏特电池，由于这种电池的出现和可靠性的提高，可以提供比较稳定的直流（Direct Current, DC）功率，最初的电路雏形才得以出现和发展。但是很快人们又发现低频的交流（Alternating Current, AC）可以提高电能的传输效率，减小传输单位距离的电能损耗，并且可以通过工作于法拉第电磁感应定律下的变压器发生能量转换。随后，在诸如查里斯·斯坦梅茨（Charles Steinmetz）、托马斯·爱迪生（Thomas Edison）、沃纳·西门子（Werner Siemens）和尼古拉斯·特斯拉（Nikola Tesla）等电磁领域的先驱们的共同努力下，电能产生和传送作为一项工业事业迅猛发展，电迅速走入人们的日常生活。1864 年，英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831—1879）提出了电和磁通过空间耦合导致电磁波的重要假设，1887 年，德国物理学家亨利希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894）第一次通过实验证明了电磁波通过空气的辐射和接收，高频能量脱离了电线的束缚进入了无线空间。这一重大发现促成了无线通信和高速技术的飞速发展，20 世纪 20 年代出现了无线电广播，20 世纪 30 年代诞生了电视，20 世纪 40 年代诞生了雷达，一直发展到 20 世纪 80 年代出现了个人移动电话，20 世纪 90 年代出现了全球卫星定位系统，到今天人类社会已经进入信息时代，高速、大容量、覆盖全球范围的信息流更是要依赖电磁波，尤其是高频电磁波的产生、传播和处理，而这种高频能量的利用除了要依靠高频天线等装置外，更为核心的是高频电路的设计、制造和应用。高频（微波）电子线路的产生和发展正是适应了无线通信的飞速发展，成为高频和微波技术及工程应用的一个重要方面，受到越来越密切的关注。

由于适应雷达、通信、导航、遥测遥感等系统的需求，电子线路的工作频率逐渐提高，已经进入微波、毫米波甚至亚毫米波段，首先传统上采用的低频电路与系统的分析与设计理论受到极大挑战。众所周知，基尔霍夫（Kirchhoff）类型的电压电流定律这一分析与设计工具仅适用于直流到低频率的集总参数电路，当工作频率扩展到射频和微波波段，由于电路参数的分布化，基尔霍夫定律一般是失效的。另一方面，也由于工作频率的提高，电磁波能量的传输居于主导地位，在电路组成结构和元器件上也大异于低频系统。微波电子电路课程的设置正是针对在高频和微波波段电子电路的组成、元器件的选用、电路性能的分析、功能部件的设计等具有特异性的基本问题，本书即是配合微波电子电路课程的开设而编写的。

0.1 微波波段

微波段是电磁波谱的一个重要组成部分。过去的一百年来，人们对电磁波谱进行过多种分类尝试，但是第一个被工业界和政府部门广泛接受的分类方法诞生于第二次世界大战后，由美国国防部提出。目前被广泛采用的分类方法是美国电气电子工程师协会（IEEE）提出并推广的，如表 0-1 所示。

表 0-1 电磁波谱划分表

频率范围	波长范围	频段名称	波段名称
30~300Hz	10000~1000km	极低频 (Extreme Low Frequency, ELF)	
300~3000Hz	1000~100km	音频 (Voice Frequency, VF)	
3k~30kHz	100~10km	甚低频 (Very Low Frequency, VLF)	超长波 (Ultralong Wave)
30k~300kHz	10~1km	低频 (Low Frequency, LF)	长波 (Long Wave)
300k~3000kHz	1000~100m	中频 (Medium Frequency, MF)	中波 (Medium Wave)
3M~30MHz	100~10m	高频 (High Frequency, HF)	短波 (Short Wave)
30M~300MHz	10~1m	甚高频 (Very High Frequency, VHF)	超短波 (Ultrashort Wave)
300M~3000MHz	100~10cm	超高频 (Ultrahigh Frequency, UHF)	微波 (Microwave)
3G~30GHz	10~1cm	特高频 (Superhigh Frequency, SHF)	
30G~300GHz	10~1mm	极高频 (Extreme High Frequency, EHF)	
300G~3000GHz	1~0.1mm	丝米 (Decimillimeter)	
	0.75mm~0.76 μm		红外线 (Infrared)
	0.76~0.39 μm		可见光 (Visible Light)
	0.39~0.005 μm		紫外线 (Ultraviolet Radiation)
	0.005~10 ⁻⁸ μm		X 射线 (X Radial)
	10 ⁻⁸ μm 以下		γ 射线 (γ Radial)

由表 0-1 中可见，微波一般是指电磁波谱中频率从 300MHz 到 3000GHz 的一段，对应的波长范围为 1m 到 0.1mm，覆盖超高频、特高频、极高频和丝米频段。在雷达和通信等应用中还常用一些波段代号和习惯称谓来表示微波中一些特殊波段，这些波段代号是在第二次世界大战中英美为保密而采用的，今天也还在沿用，如图 0-1 和表 0-2 所示。

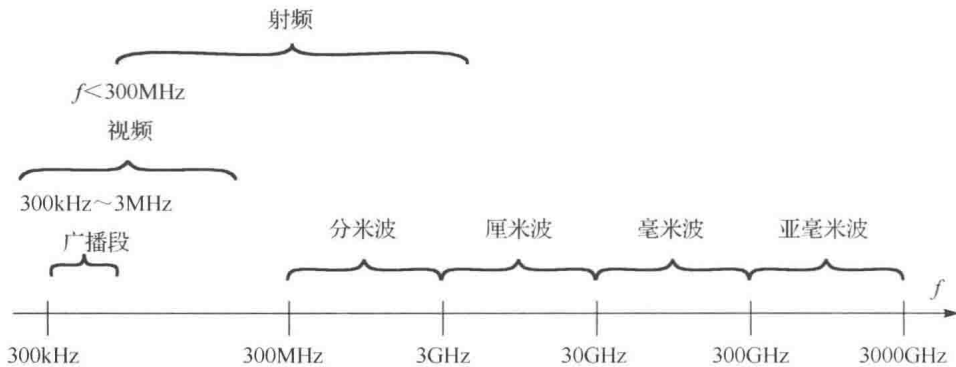


图 0-1 波段习惯称谓示意图

表 0-2 微波波段代号表

波段代号	习惯称谓	频率范围	波长范围
P 波段		0.23~1GHz	130~30cm
L 波段		1~2GHz	30~15cm
S 波段	10cm 波段	2~4GHz	15~7.5cm
C 波段	5cm 波段	4~8GHz	7.5~3.75cm
X 波段	3cm 波段	8~12.5GHz	3.75~2.4cm
Ku 波段	2cm 波段	12.5~18GHz	2.4~1.67cm
K 波段	1.3cm 波段	18~26.5GHz	1.67~1.13cm
Ka 波段	8mm 波段	26.5~40GHz	1.13~0.75cm
毫米波段		40~300GHz	7.5~1mm
亚毫米波段		300~3000GHz	1~0.1mm

必须指出的是，以上这些波段的划分并不是唯一的，还有其他许多种不同的波段划分方法，它们分别由不同的学术组织和政府机构提出，甚至在相同的名称代号下有不同的范围，因此波段代号等只是指代大致的频率范围。其次，以上这些波段的分界也并不严格，工作于分界线两边临近频率的系统并没有质和量上的跃变，因为这些划分完全是人为的，仅是一种助记符号，不存在物理上的差别。

微波在电磁波谱中的重要地位突出体现在它在广阔的军用和民用领域的应用。首先由于微波波长短，容易通过聚束天线实现窄波束定向辐射，因而为无线电探测和定位提供了有效的手段，目前广泛采用的各种军民用雷达，包括远程和超远程警戒雷达、火力控制和炮瞄雷达、火箭和导弹等的制导雷达、飞机导航雷达、气象雷达、车辆防撞及倒车雷达等几乎都工作在微波波段。其次，由于微波频率高、频带宽、信道容量大，因此在通信系统中也获得了广泛应用，包括个人移动通信系统、卫星通信系统、高速大容量数据传输系统、语音和图像广播系统、无线互联网络综合业务系统等。再次，由于微波的传播是视距直线传播，相比较于中低频率和光系统，它可以几乎全天候穿透云雾、丛林甚至电离层，可以在地球和太空之间开辟一个窗口，这为人类进入太空和探测太空提供了技术手段，如射电天文学就是建立在微波技术发展的前提下，它比光学望远镜系统探测的更深远，也更不容易受到气候和天气状况的制约。

由于这样一些优势，20 世纪 50 年代前后，分米波段和厘米波段得到了充分的发展和应用。60 年代之后，人们又开始向毫米波和亚毫米波开拓。由于毫米波和亚毫米波波长更短、频率更高，因此系统天线更小巧，具有较好的抗干扰能力，对多普勒频移效应更灵敏，能提供更宽的频带和更好的分辨率。其次，虽然毫米波和亚毫米波具有一定的似光性，但相比较于光学系统，它们对于云雾烟尘等具有较好的穿透力，全天候性能突出。此外，由于整个系统体积小、质量轻、结构灵巧等特点，毫米波和亚毫米波特别适合于移动通信、空间通信和制导等系统。

今天，微波系统已经不止在工作频率和应用领域上有了极大的扩展，而且随着信息化时代的来临，向着大规模和超大规模集成化、数字化和普及化发展，成为了信息流动的重要手段和运载工具，为人类科学技术的进步和生活水平的提高扮演越来越重要的角色。

0.2 微波电子线路与微波固态电路

微波电子线路一般泛指构成微波系统中各种功能模块的元器件与电路结构，也称为微波有源电路，以区别于由微波传输线和其他各种微波无源元器件组成的微波无源电路。回顾微波技术的发展史，在 20 世纪五六十年代以前的 20 多年时间里，由于对半导体材料研究的水平较低和工艺技术的不足，

整个微波领域几乎全部使用微波电真空器件，也就是通称的电子管，包括速调管、行波管、返波管、磁控管和正交场放大管等，由这些电子管组成的微波电子线路被称为微波电真空电路。自 20 世纪 60 年代以来，微波半导体材料技术和工艺水平得到了飞速发展，先后出现了金属半导体二极管、硅双极晶体管、砷化镓-金属-半导体场效应管、雪崩二极管、耿氏二极管、隧道二极管和 PIN 管等微波半导体器件，并在微波系统中获得了广泛应用，这种由半导体管为核心组成的微波电子线路就称为微波固态电路。在微波半导体器件发展的同时，采用平面微波传输线（微带线）和薄膜淀积与光刻技术的微波混合集成电路（MIC）和单片集成电路（MMIC）也取得迅速发展。利用单片集成工艺甚至可将微波电路淀积在一个半导体芯片上，不需要调整就可达到性能指标，因此能够大量生产以降低成本。经过多年来的发展，单片 GaAs 集成电路现在已经成熟，低噪声放大器、混频器-中频放大器组件以及中功率放大器单片组件已经研制成功，目前已经向着大规模和超大规模微波集成电路化迈进。目前不仅微波接收机已集成化和固体化，而且中功率以下的微波发射机也已经固态化，几乎全部取代了微波电真空器件及电路，仅在大功率设备中微波电真空器件和电路还被采用。因此本书仅研究微波固态电路及其相关问题，关于微波电真空器件和电路的理论与应用可参看其他参考文献。

相比微波电真空电路，微波固态电路的主要优点在于以下几个方面：

(1) 系统具有固有的高可靠性，其平均无故障工作时间可达 $10^5 \sim 10^6$ 小时。究其原因，一方面是由于微波固态器件本身具有高可靠性，另一方面是由于固态电路可在实际运用时设置备份系统，这样也提高了系统的可靠性。

(2) 固态电路体积小、质量轻。

(3) 成本低。当固态组件作为标准件大量生产时，其成本较低，而且一致性较好。

(4) 系统设计快速简便。由于各种功能和性能指标的固态组件或模块已经基本商品化，因此系统设计者只需要合理选择使用即可构成完整的系统。

概括地讲，按照技术和应用水平不断提高的顺序以及电路元器件形态的不同，微波固态电路可以分为三个类型：分立集总元件电路、混合集成电路及单片集成电路。在分立集总元件电路中，电路采用的无源和有源元器件都是集总参数的和分立的，如电阻、电感、电容、二极管、三极管等，在组装电路时把这些元件分别装配于电路板上，情况与低频电路类似，由于当工作频率高到吉赫兹范围时，这些集总元件尺寸太小以至于无法研制和加工，同时由于其他各种寄生参量的影响，使得分立集总元件电路一般只能适用于 L 波段之下。混合集成电路是把常用的微波无源元件，如传输线、电阻、电感、电容等，以分布参数方式制作在塑料、陶瓷、蓝宝石或铁氧体等介质基片上，然后把分立微波固态器件装配于这些介质基片上构成的，其优点是电路结构紧凑、可以实现小型化，是目前微波固态电路最常用的形式。但是当工作频率达到毫米波或更高时，这种混合集成电路安装元件之间的连接变成了大问题，有时甚至不可能做到，这时单片集成电路成为了主要电路形式，它把微波半导体固态器件和无源元件都制作在半导体基片上，其性能稳定、电路制作一致性很强、结构更加小巧，因而微波单片集成电路成为了毫米波以上微波固态电路的主要发展方向。

0.3 本书的主要内容和章节安排

为了使本书使用者能直观全面地了解本书的结构和内容，让我们先从几个典型系统的框图入手了解典型的微波毫米波系统的组成。图 0-2 所示的是一个通用的个人移动通信系统的简化框图^[6]，如个人蜂窝移动电话和无线局域网等，统称为无线收发信机系统。

这里并不关注这一系统的功能讨论和工作原理，仅需注意的是在高频模拟信号电路部分除了传输线以外，包含了这样几种功能模块：对信号完成上下变频的各种混频器，提供高频（微波）信号的振

荡器，对信号完成放大作用的功率放大器和低噪声放大器，控制天线与收发回路连接的开关等控制组件、低通滤波器等，这些是组成高频（微波）电路的基本单元。

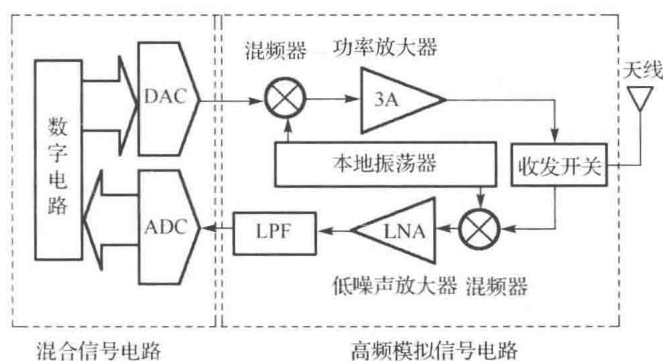


图 0-2 通用射频系统原理简化框图

图 0-3 给出了一个工作于 35GHz 的典型脉冲制辐射计式探测器的原理框图^[32]。

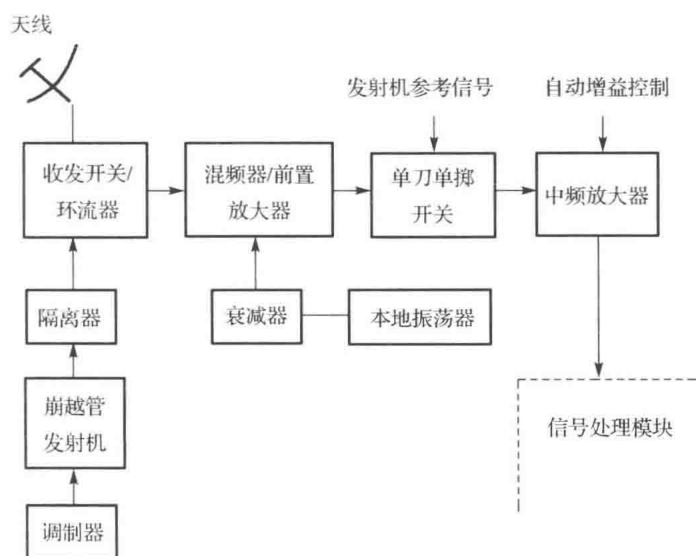


图 0-3 典型脉冲制辐射计式探测器原理框图

从这一框图中，大家也可以看到在系统中除信号处理模块外，其组成也包括无源元件、振荡器、放大器、混频器、控制器件等。

这说明前述的这些功能模块就是组成各种军民用途的微波毫米波系统的基本单元，要进行系统的分析与设计离不开对这些单元的掌握和运用。

本书正是针对这一目的而展开的，概括地讲，本书介绍以微带微波传输线、传输线元件和微波半导体器件组成的微波有源电路组件的基本工作原理、基本电路结构和基本分析设计方法，电路形式以混合集成电路为主，以分立元件电路为辅，简单介绍单片集成电路。具体地说，本书介绍了微波固态频率变换器、微波固态放大器、微波固态振荡器和微波固态控制电路四方面主要内容，以及构成这些功能组件的各种微波无源和有源器件与电路，基本上覆盖了微波固态电路的应用领域。本书主要面向对象是信息技术、通信、雷达、电子对抗和遥感遥测等专业的工科高年级本科生，可作为“微波电子线路”、“微波有源电路”和“微波固态电路”课程的教材。在章节安排上，本书内容体系共分为 7 章，按 3 个部分进行组织编写的。

第一部分主要介绍在微波固态电路中常用的各种微波无源器件和半导体器件，包括第1章和第2章。

- 第1章介绍微带类型的微波无源器件与网络，包括集总元件、微带线集总元件、分支元件和功率分配器、滤波器、谐振器、定向耦合器、环形电桥、阻抗匹配网络、平衡-不平衡转换器等。
- 第2章介绍微波半导体器件，包括半导体基础、各种微波二极管、微波双极晶体管、微波场效应管等。

第二部分是本书的核心部分，主要介绍微波固态频率变换器、微波固态放大器、微波固态振荡器和微波固态控制电路的基本工作原理、基本电路结构和基本分析设计方法，包括第3章到第6章。

- 第3章介绍微波固态频率变换器，包括微波阻性下变频器、参量上变频器、变容管功率上变频器、微波倍频器、场效应管混频器与倍频器、检波器等。
- 第4章介绍微波固态放大器，包括参量放大器、双极晶体管和场效应管放大器、功率放大器与功率合成器等。
- 第5章介绍微波固态振荡器，包括雪崩管振荡器、转移电子器件振荡器、晶体管振荡器、频率合成技术等。
- 第6章介绍微波固态控制电路，包括微波开关、微波限幅器和电调衰减器、微波移相器等。

第三部分主要介绍混合集成微波固态电路（MIC）和微波单片集成电路（MMIC）的基础知识，包含第7章。

- 第7章介绍微波集成电路基片材料和导体材料、单片微波集成电路的设计特点、微波集成电路的加工工艺等问题。

从以上章节安排可以看出，本门课程的内容比较广泛，要求具备比较深入、广博和扎实的基础知识和完成必要的先修课程：如工科公共基础课程“高等数学”、“线性代数”、“复变函数”，工科电类专业基础课程“电路分析”、“线性电子线路”、“非线性电子线路”、“信号与系统”、“随机信号分析”、“半导体器件基础”等，还有电磁场与微波技术专业基础课程“电磁场理论”、“微波技术”、“微波网络基础”等。考虑到工科学生的具体情况和对这一学科知识的需求，本书在编写中尽量简化了繁复的理论分析与数学推导过程，而着重于对物理概念、工作原理和结论的介绍；从内容取舍上也贯彻了介绍基础知识和必备手段为中心的原则，不求大求全，角色以作教科书为主、以作技术参考书和工程手册为辅。

第1章 无源微波元器件

本章主要介绍广泛应用于微波电子线路的各种无源元器件和部件，主要包括集总元件、微带线集总元件、分支元件和电桥、定向耦合器、谐振器、滤波器、阻抗变换器和平衡-不平衡转换器等。其中一部分是在工作频率低于微波段的其他电子线路中已经广泛采用的，如属于集总元件的电阻、电感、电容及滤波器、谐振器等，它们应用于微波段电子线路会有一些特殊结构、工作原理和特性。另外一些是在微波电子线路中独有的，考虑到微波混合集成电路甚至是单片集成电路的需要，这里只介绍以微带结构为基础的元器件和网络，包括微波集成电路基片材料与传输线元件、微带线集总元件、微带分支元件和功率分配器、定向耦合器、环形电桥、阻抗变换器、平衡-不平衡转换器等。考虑到工程问题的实际需要，这里只从应用的角度对他们进行介绍，而实际上这里涉及的每一个元部件的深入分析和精确设计都有相当的深度，这里不做探讨，可参见相关的参考文献。

1.1 普通集总参数元件

普通集总参数元件主要包括电阻器、电感器和电容器，本节将主要介绍在微波电子线路中应用的这些元件的特性。

1.1.1 金属引线

在大家所熟知的直流和低频领域，一般认为金属导线不存在自身的电阻、电感和电容，实际上是其值很小以至于可以忽略，因而它从来没有作为单独的元件存在。但当工作频率进入微波波段，其情况已经大大不同，金属引线不仅具有自身的电阻和电感，而且它们还是频率的函数，对电路性能的影响已经不能忽略。

设圆柱状直铜导线的半径为 a ，长度为 l ，材料电导率为 σ_{cond} ，则其直流电阻可表示为：

$$R_{\text{DC}} = \frac{l}{\pi a^2 \sigma_{\text{cond}}} \quad (1-1)$$

对于直流信号来说，可以认为导线的全部横截面都可以用来传输电流，或者说电流充满在整个导线横截面上。其电流密度可表示为：

$$J_{z0} = \frac{I}{\pi a^2} \quad (1-2)$$

但在交流状态下，由于交流电流会产生磁场，根据法拉第电磁感应定律此磁场又会产生电场，与此电场联系的感生电流密度的方向将会与原始电流相反。这种效应在导线的中心部位即 $r=0$ 位置最强，造成了在 $r=0$ 附近的电阻显著增加，因而电流将趋向于在导线外周界附近流动，这种现象将随着频率的升高而加剧，这就是通常所说的“趋肤效应”。进一步研究表明^[6]，在微波波段 ($f \geq 500\text{MHz}$)，此导线相对于直流状态的电阻和电感可分别表示为：

$$R \cong \frac{a}{2\delta} R_{\text{DC}} \quad (1-3)$$

$$L \cong \frac{a}{2\omega\delta} R_{\text{DC}} \quad (1-4)$$

其中

$$\delta = (\pi f \mu \sigma_{\text{cond}})^{-1/2} \quad (1-5)$$

定义为“趋肤深度”，式(1-3)和式(1-4)一般在 $\delta \ll a$ 条件下成立。从式(1-5)可以看出，由于趋肤深度与频率之间满足平方反比关系，可见随着频率的升高趋肤深度是平方律减小的。

根据推导^[6]，交流状态下沿导线轴向的电流密度可以表示为：

$$J_z = \frac{\rho I}{2\pi a} \frac{J_0(\rho r)}{J_1(\rho a)} \cong \frac{\rho I}{j2\pi a \sqrt{r}} e^{-(1+j)\frac{a-r}{\delta}} \quad (1-6)$$

式中 $\rho^2 = -j\omega\mu\sigma_{\text{cond}}$ ， $J_0(\rho r)$ 和 $J_1(\rho a)$ 分别为0阶和1阶贝塞尔函数， I 是导线中的总电流。图1-1列出了交流状态下铜导线横截面电流密度对直流情况的归一化值，图1-2表示了 $a=1\text{mm}$ 的铜导线在不同频率下 J_z/J_{z0} 相对于半径 r 的曲线，由这些曲线可以看到在频率达到1MHz左右时，就已经出现了比较严重的趋肤效应，当频率到达1GHz时电流几乎仅在导线表面流动而不能深入导线中心。

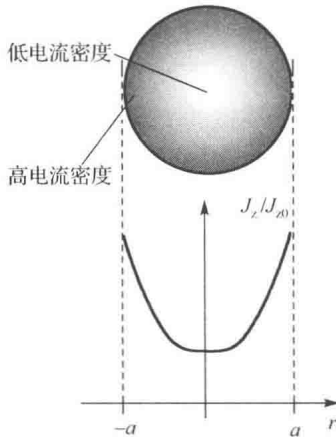


图 1-1 用直流电流密度归一化的交流电流密度横截面分布

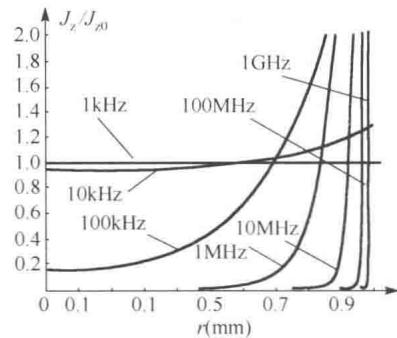


图 1-2 半径 $a=1\text{mm}$ 铜线的归一化交流电流密度的频率特性

1.1.2 电阻器

电阻是在低频电子电路中最常用的元件之一，主要有以下几种类型：

- 高密度碳介质合成电阻；
- 镍或其他材料的线绕电阻；
- 温度稳定材料的金属膜电阻；
- 铝或铍基材料薄膜片电阻。

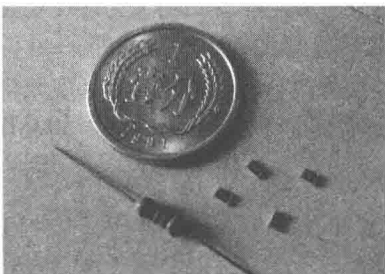


图 1-3 薄膜片状电阻与普通色环电阻的比较

由于体积最小和性能优越，其中在微波电子线路中最常用的还是薄膜片状电阻，一般用作表贴装元件(SMD)，其大小比例如图1-3所示。

大家知道，在微波波段一根普通金属导线就已经存在电感，那么具有阻值 R 的普通电阻器在微波波段的等效电路必然会相对复杂化，不仅具有阻值，还会有引线带来的电感和线间的寄生电容，其性质将不再是纯电阻，而是“阻”、“抗”兼有。图1-4列出了一普通电阻在射频和微波段的等效电路。在图中，两个 L 表示引线电感；

C_a 表示电荷分离效应造成的电容量，而 C_b 表示引线间的电容量，它们是与电阻中引线的实际布置方式有关的；由于引线是理想金属，故忽略了其自身造成的电阻成分。对于线绕电阻，其等效电路还要考虑由于线绕部分造成的电感量 L_1 和绕线间的电容 C_1 ，引线间电容 C_b 相比较于内部和绕线电容一般较小，有时可以忽略，其等效电路如图 1-5 所示。

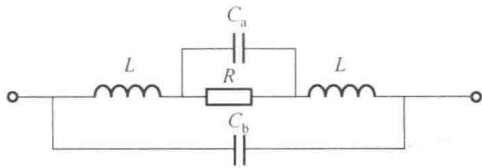


图 1-4 电阻器的微波等效电路

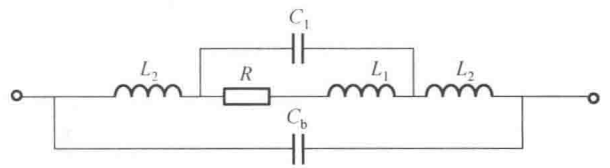


图 1-5 线绕电阻器的微波等效电路

以一 500Ω 金属膜电阻为例（其等效电路如图 1-4 所示），设其两端引线长度各为 2.5cm ，引线半径为 0.2032mm ，材料为铜，已知 C_a 为 5pF ，则可根据式 (1-4) 计算引线电感并进而求出图 1-4 等效电路的总阻抗对频率的变化曲线，如图 1-6 所示。从此图中可以看出，在低频率下阻抗即等于电阻 R ，而随着频率的升高达到 10MHz 以上，电容 C_a 的影响开始占优，它导致总阻抗降低；当频率达到 20GHz 左右时，出现了并联谐振点；越过谐振点后，引线电感的影响开始表现出来，阻抗又加大并逐渐表现为开路或有限阻抗值。这一结果说明看似频率无关的电阻器在微波波段将不再仅是一个电阻器了，在应用中应加以特别注意。

前面已经介绍，在固态微波电子线路中最常用的集总参数电阻器是薄膜片电阻，其大小主要取决于耐受的功率量级，例如 0.5W 功率的片电阻大小约为 $1\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ （长 \times 宽），而 1000W 功率时大小约为 $25\text{mm}\times 25\text{mm}$ （长 \times 宽），如图 1-3 所示。薄膜片电阻的阻值可以在 0.1Ω 到几兆欧之间，阻值的公差约在 $\pm 5\%$ 到 $\pm 0.01\%$ 之间。由于一方面阻值的误差较大，另一方面会产生寄生场影响其对频率的线性度，大阻值的薄膜片电阻一般难于制造。一个典型薄膜片电阻的结构剖面图如图 1-7 所示，其结构的主要特点是在陶瓷基片材料（一般是铝氧化物）上淀积金属膜（一般是镍铬铁合金）形成电阻层，通过调整这一电阻层的长度和插入内部电极来达到要求的阻值，在内部电极的两端做金属连接以便于焊接到电路板上，另外在电阻膜的表面还要制作一层保护膜。

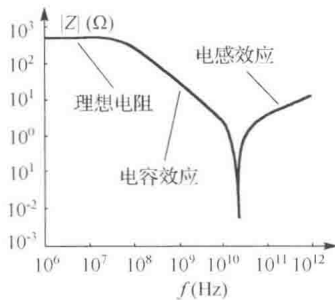


图 1-6 500Ω 金属膜电阻阻抗绝对值与频率的关系

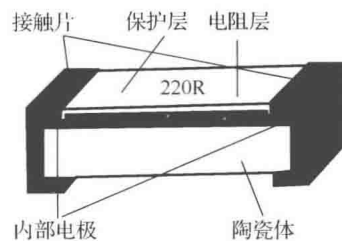


图 1-7 典型的片状电阻的横截面图

1.1.3 电容器

在低频率下，电容器一般可看做是两平行板构成的结构，其极板的尺寸要远大于极板间距离，则电容量可以定义为：

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1-7)$$

式中， A 为极板面积； d 为极板间距离； ϵ 为极板间填充介质的介电常数。理想状态下，极板间介质中没有电流。