

四川省2015年度图书出版重点规划项目

WEIBO GUTAI DIANLU

微波固态电路

(第二版)

喻梦霞 李桂萍 张小川 编著

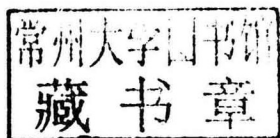


电子科技大学出版社

四川省 2015 年度图书出版重点规划项目

微波固态电路

喻梦霞 李桂萍 张小川 编著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

微波固态电路 / 喻梦霞, 李桂萍, 张小川编著. —

2 版. —成都: 电子科技大学出版社, 2015. 11

四川省 2015 年度图书出版重点规划项目

ISBN 978-7-5647-3154-0

I. ①微… II. ①喻…②李…③张… 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 249892 号

内 容 提 要

微波集成电路近些年发展迅速, 已广泛用于卫星通信、电视转播、中继通信、数据与图像传输、雷达、遥控遥感、电子对抗等领域, 工作频段由 1GHz 覆盖到 100GHz, 且正在向 100GHz 以上延伸, 因此本教材主要讨论微波集成电路, 针对目前微波电路发展的最新状况, 主要介绍微波半导体器件, 包括各种新器件, 及其组成的微波、毫米波电路。全书共包括七章, 主要为微波集成电路基础; 微波晶体管放大器; 微波混频器和检波器; 微波倍频器; 微波振荡器; 微波控制电路等。

本书是为电子科学与技术、电磁场与微波技术、电子工程和通信工程等专业的高年级本科生编写的教材, 供微波电路、微波固态电路课程使用。也可以作为毫米波雷达、制导、电子对抗、遥感技术、计量仪表专业的研究生以及从事相关研究项目的工程技术人员参考。

四川省 2015 年度图书出版重点规划项目

微波固态电路

喻梦霞 李桂萍 张小川 编著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 罗 雅

责任编辑: 罗 雅

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮件: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都市火炬印务有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 22 字数 580 千字

版 次: 2016 年 2 月第一版

印 次: 2016 年 2 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3154-0

定 价: 45.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言

微波及现代无线通信技术正以惊人的速度持续增长，几乎每天都有新的应用的报道。而微波集成电路在商业领域，其应有更是已蔓延到了无线电话、个人通信系统、无线局域网、车载毫米波防撞雷达、卫星通信、电视转播、中继通信、数据与图像传输、射频识别、雷达系统、微波遥感遥测等各个方面。在可以预见的将来，微波集成电路有望继续保持当前的增长率；而对于设计者而言，显然除了需要领悟微波电路基本工作原理外，还要不断应对持续增长的电路设计方面的挑战。

自从本书第一版出版并获得多家高等院校选用做教材已经过去 7 年了。尽管物理学和数学的基本原理并没有改变，当今技术条件的不断发展仍给我们提供了难得的机遇来提高微波固态电路的设计水平。本书第二版仍保留原来的内容编排，全书共七章。根据教学应用的情况并采纳使用者的建议，在第二章增加了微波滤波器内容，并对微波集成传输线、微波单片集成电路及阻抗变换部分进行了修改。第三章微波放大器部分增加了例题，第五章改为微波倍频器和分频器，删减了原教材中阶跃恢复二极管倍频器部分的内容，增加了微波分频器的内容。对第六章微波振荡器进行了部分内容的修改，增加了微波锁相源和频综部分的内容。

微波集成电路技术已经基本成熟，部件和电路原理在很多教材和专题科技书中都有详细论述，所以本书抛弃了冗长的数学推导，只着重于阐明微波电路的基本物理概念、设计原则，并结合部分当前国内外微波、毫米波器件和电路的最新发展状况及我们的一些科研成果进行了介绍，使学生能通过本书的阅读了解到微波电路的设计过程。本书仍以讲授微波集成电路为主，选材集中在微波有源固态电路，并兼顾了微波与毫米波，将器件内部工作机理与外部电路理论很好地结合，体现了传统设计理论与技术和现代 CAD 应用软件的结合。前者是基础，有利于确定科学合理的电路拓扑和完成初步设计，后者可以在前者基础上考虑到各种实际因素，例如宽频带、寄生参量、参数漂移、制造公差等影响，使电路性能达到最佳。

本书除了可用于微波固态电路的教学外，也可为从事相关研究项目的工程技术人员提供参考，因此除了讲述主要概念和方法外，书中还介绍了典型不同类型的电路。为了使读者能通过本书的学习而积累较为丰富的设计经验，本书在原有例题的基础上又增加了部分例题，通过这些例题来详细地讨论了各种设计方法的基本原理及难点。针对当今大多数微波工程师从事的是平面结构元件和集成电路设计，常借用微波 CAD 软件进行设计、仿真和验证，而现在最为流行的微波 CAD 软件就是 ADS 了，因此本教材仍选择的是用 ADS 软件来对部分典型例题专门进行仿真和验证，这部分内容仍然放在附录中供参考。

本书第二章由张小川老师编写，第五和第七章由李桂萍老师编写，其余部分由喻梦霞老师编写。在本书的完成过程中，很多人给予了极大的帮助，特别是使用过本书第一版的教师和学生，在此对他们表示感谢。本书在出版的过程中得到了杨宏春老师的鼎力支持，最后还要感谢电子科技大学出版社罗雅编辑的支持，正是有了你们的大力支持才使得本书得以顺利出版。

编 者

2015 年 10 月于电子科技大学



目 录

第 1 章 引言.....	1
§1.1 微波/毫米波频段.....	1
§1.2 微波电路的发展.....	3
§1.3 微波集成电路的应用.....	4
第 2 章 微波集成电路基础.....	5
§2.1 微波集成传输线.....	5
2.1.1 概述.....	5
2.1.2 介质基片与导体材料.....	12
§2.2 微波单片集成电路.....	12
2.2.1 概述.....	12
2.2.2 微波单片集成电路材料和加工技术.....	13
2.2.3 微波单片集成电路常用的元器件.....	13
2.2.4 MMIC 技术及应用.....	15
§2.3 微带电路的不连续性.....	16
2.3.1 微波电路不连续性.....	16
2.3.2 微带元件.....	18
§2.4 阻抗变换.....	20
2.4.1 并联导纳型（或串联阻抗型）的匹配网络.....	21
2.4.2 阻抗变换型的匹配电路.....	22
§2.5 功率分配器和耦合器.....	24
2.5.1 Wilkinson 功率分配器.....	24
2.5.2 耦合器.....	27
§2.6 微波滤波器.....	31
2.6.1 滤波器的基本类型和主要技术指标.....	32
2.6.2 低通原型滤波器.....	32
2.6.3 阻抗和频率变换.....	38
2.6.4 滤波器的设计.....	42
第 3 章 微波晶体管放大器.....	45
§3.1 引言.....	45
§3.2 微波双极结型晶体管.....	46
3.2.1 微波硅双极型晶体管.....	46
3.2.2 异质结双极晶体管（HBT）.....	52
§3.3 微波场效应晶体管.....	53
3.3.1 GaAs MESFET.....	53
3.3.2 高电子迁移率晶体管（HEMT）.....	58
§3.4 微波晶体管放大器特性.....	59

3.4.1	微波晶体管的 S 参数	59
3.4.2	微波晶体管放大器的增益	61
3.4.3	微波晶体管放大器的稳定性	66
3.4.4	放大器的稳定措施	71
3.4.5	微波晶体管放大器的噪声特性	72
§3.5	小信号微波晶体管放大器的设计	75
3.5.1	高增益设计	75
3.5.2	固定增益电路	82
3.5.3	低噪声设计	86
3.5.4	多级放大器晶体管选择	88
3.5.5	微波宽带放大器	90
3.5.6	微波晶体管放大器 CAD 工具简介	92
§3.6	微波晶体管功率放大器	93
3.6.1	功率放大器的特性	94
3.6.2	晶体管的大信号特性	97
3.6.3	用小信号 S 参数设计功率放大器	98
3.6.4	功率合成技术	101
习题		104
第 4 章	微波混频器和检波器	106
§4.1	引言	106
§4.2	肖特基势垒二极管和检波二极管	106
4.2.1	肖特基势垒二极管	106
4.2.2	检波二极管	111
§4.3	微波混频器工作原理	113
4.3.1	非线性电阻混频原理	113
4.3.2	微波混频器严格理论分析	115
4.3.3	混频器指标	120
§4.4	微波混频器的基本电路	123
4.4.1	单管混频器	123
4.4.2	单平衡混频器	124
4.4.3	双平衡混频器	131
4.4.4	双双平衡宽带混频器	133
4.4.5	微带平衡混频器设计举例	133
§4.5	镜像回收混频器	135
4.5.1	滤波器式镜像回收混频器	135
4.5.2	平衡式镜像回收混频器	136
§ 4.6	毫米波混频及谐波混频	137
4.6.1	毫米波集成平衡混频器	138
4.6.2	谐波混频器 (subharmonic mixer)	140
§ 4.7	微波集成检波器	142
4.7.1	检波器的工作原理	142

4.7.2 检波器主要技术指标.....	144
4.7.3 检波器电路.....	149
习题	151
第 5 章 微波倍频器和分频器	153
§5.1 引言.....	153
§5.2 倍频器.....	154
5.2.1 倍频器基础与技术指标.....	154
5.2.2 用途.....	155
5.2.3 倍频器的类型.....	156
5.2.4 倍频器的噪声.....	156
§5.3 变容二极管.....	157
§5.4 倍频器基本理论.....	161
5.4.1 非线性电阻倍频理论.....	161
5.4.2 非线性电抗倍频理论.....	163
5.4.3 二极管平衡倍频电路原理.....	165
5.4.4 计算机辅助设计倍频电路分析方法简介.....	166
§5.5 变容二极管倍频器.....	168
5.5.1 变容二极管结电容在激励电压作用下的特性研究.....	168
5.5.2 变容管倍频器电路.....	170
§5.6 肖特基势垒二极管倍频器.....	183
5.6.1 肖特基二极管倍频原理.....	183
5.6.2 肖特基二极管倍频电路.....	184
§5.7 微波三极管倍频器.....	187
5.7.1 FET 倍频原理.....	187
5.7.2 晶体管倍频器电路.....	190
§5.8 微波分频器.....	192
5.8.1 分频器的技术指标.....	192
5.8.2 分频器类型.....	193
5.8.3 分频器原理及电路.....	193
习题	200
第 6 章 微波振荡器	202
§6.1 引言.....	202
§6.2 负阻二极管与振荡晶体管.....	203
6.2.1 雪崩渡越时间二极管.....	203
6.2.2 转移电子器件-体效应二极管.....	205
6.2.3 振荡晶体管.....	207
§6.3 负阻二极管振荡器.....	207
6.3.1 负阻二极管振荡器的一般理论.....	207
6.3.2 负阻振荡器电路.....	216
6.3.3 负阻二极管振荡器的频率稳定.....	219
6.3.3.1 提高频率稳定度的一般方法.....	219

§6.4 负阻二极管振荡器的调频和调幅噪声	226
6.4.1 负阻二极管振荡器调频和调幅噪声的形成	226
6.4.2 调频和调幅噪声的表示法	227
§6.5 微波晶体管振荡器	229
6.5.1 负阻振荡器和反馈振荡器的振荡条件	229
6.5.2 小信号 S 参数设计法	230
6.5.3 固定频率振荡器设计举例	233
6.5.4 介质谐振器稳频的 FET 振荡器	237
§6.6 锁相环	238
§6.7 频率合成器	252
习题	254
第 7 章 微波控制电路	256
§7.1 引言	256
§7.2 PIN 二极管的基本特性	256
7.2.1 PIN 二极管结构	256
7.2.2 PIN 结特性	256
7.2.3 PIN 二极管管芯等效电路	258
7.2.4 封装 PIN 二极管等效电路	258
§7.3 微波开关	259
7.3.1 单刀单掷开关 (SPST)	260
7.3.4 MESFET 微波开关	264
§7.4 微波电压控制移相器	268
7.4.1 引言	268
7.4.2 几种常用移相器的工作原理	270
§7.5 微波电调衰减器	278
7.5.1 衰减器的主要技术指标	278
7.5.2 PIN 二极管衰减器	280
7.5.3 场效应管电调衰减器	285
§7.6 微波限幅器	286
7.6.1 限幅器的主要技术指标	286
7.6.2 微波限幅器原理及电路	287
习题	291
附录 I 用 ADS 设计高增益放大器	293
附录 II 用 ADS 设计低噪声放大器	305
附录 III 用 ADS 设计功率放大器	313
附录 IV 用 ADS 设计混频器	323
附录 V 使用 ADS 软件设计 VCO	328
附录 VI 变容管倍频器设计表格	337
参考文献	340

第1章 引言

1864年,詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)总结和提出了电磁现象的基本规律和电磁特性。所有电磁理论的应用,包括无线电、电视和雷达,它们的存在都归功于麦克斯韦的理论工作。由于缺少可靠的微波源和其他元件,20世纪初无线电技术的快速发展主要发生在高频(HF)到甚高频(VHF)范围。直到20世纪40年代第二次世界大战期间,雷达的出现和发展才使微波理论和技术得到了人们的根本重视。采用微波技术的通信系统在雷达诞生后不久就开始得到发展,它得益于原本是为雷达系统所做的许多工作。微波系统所具有的许多优点,包括宽频带和视线传播,已经证明对于陆地和卫星通信系统都是关键性的因素,因此对于低价位、小型化微波元件的继续发展提供了推动力。有兴趣的读者可以参考 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 的世纪特刊中关于微波历史发展的精彩论述。

微波电路和系统最具影响且最大应用的领域是通信、雷达、电子战、导航、监视和武器制导系统等,由于这些系统大多属于军事性质,民用系统方面的应用只在近十年才大力开展,因此,微波领域的研发动力落后于电子电路。但近几年,随着无线通信、卫星通信等应用的飞速发展,微波电路和系统也得到了迅速的发展。

§1.1 微波/毫米波频段

微波(microwave)是指频率在300MHz(3×10^8 Hz)到300GHz(3×10^{11} Hz)、对应的电波长在 $\lambda = 1\text{m}$ 和 $\lambda = 1\text{mm}$ 之间的一段电磁频谱。波长在毫米量级的信号,称为毫米波(millimeterwave)。图1.1给出了微波频段在电磁波谱中的位置以及与其余电磁波的相对关系。

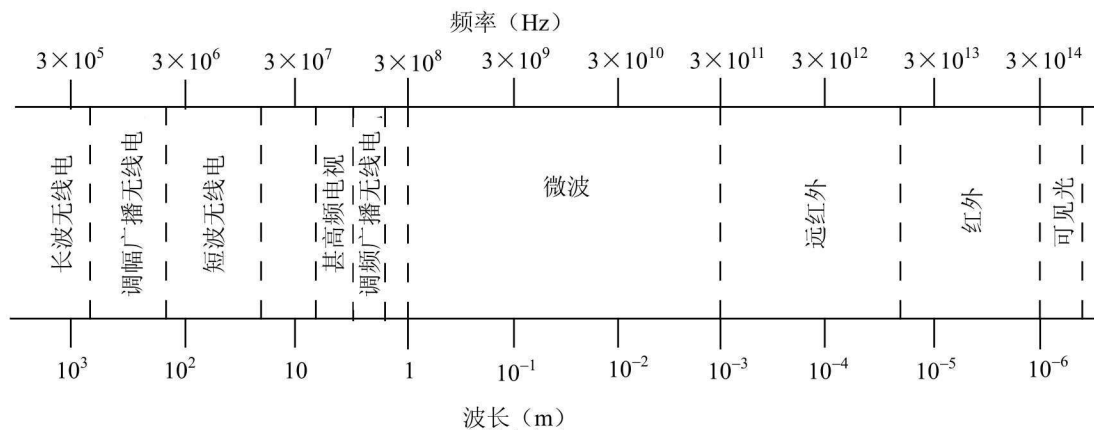


图 1.1 电磁频谱

为了方便起见,工程上在微波/毫米波范围常采用英语字母来表示微波频谱中的某一频段,而且各国所作的规定不尽相同,表 1.1 给出了常用的微波/毫米波范围内的频段代码及其对应的频率范围。

表 1.1 常用微波/毫米波频段划分

波段代号	波长范围 (cm)	频率范围 (GHz)
VHF	300~100	0.1~0.3
UHF	100~30	0.3~1
L	30~15	1~2
S	15~7.5	2~4
C	7.5~3.75	4~8
X	3.75~2.5	8~12
Ku	2.5~1.67	12~18
K	1.67~1.15	18~26
Ka	1.15~0.75	26~40
U	0.75~0.5	40~60
V	0.6~0.4	50~75
E	0.5~0.33	60~90
W	0.4~0.27	75~110
F	0.33~0.21	90~140

微波由于频率高（波长短），常规的电路理论一般不能直接应用于求解微波网络问题。这是因为电路理论的集总电路元件近似在微波频段是不成立的。微波元件常常是分布元件，由于器件的尺度与微波波长为同一数量级，所以其电压或电流的相位在器件的物理尺度内有明显的变化。在极低的频率下，其波长足够大，以至于在贯穿一个元件的线度范围内，其相位也没有明显的变化。

微波/毫米波还有其他一些特点值得注意，例如，波长随频率的升高而缩短，相应的元件尺寸减小，能使系统紧凑。同时，在同样口径天线条件下，波长短容易实现窄波束、低副瓣，这使得雷达对目标跟踪时具有更高的分辨率和精度。至于另一个重要而又令人感兴趣的特点是在整个频段内的自由空间传播衰减特性，影响微波/毫米波传播的主要是氧分子和水蒸气，这些气体的谐振将会对微波/毫米波频率产生选择性吸收和散射，如图 1.2 所示。

在毫米波频段，电磁能量在大气中传播时与大气中气体、悬浮微粒以及含水物质的相互作用要比它们与微波能量的相互作用强得多，这些相互作用通过三种机理，即通过吸收、散射和折射产生。由图 1.2 可见，由氧分子谐振引起的吸收峰出现在 60GHz 和 120GHz 附近，而由水蒸气谐振引起的吸收峰则出现在 22GHz 和 183GHz 附近。同时也看到，在整个毫米波频段有四个传播衰减相对较小的大气“窗口”，它们的中心频率在 35GHz，94GHz，140GHz 和 220GHz 附近。其相应波长分别为 8.6mm，3.2mm，2.1mm 和 1.4mm。这些“窗口”的对应带宽分别为 16GHz，23GHz，26GHz 和 70GHz。这就说明，任何一个毫米波“窗口”的可用带宽几乎都可以把包括微波频段在内的所有低频频段容纳在内。这些宽带特性，在雷达中可用窄脉冲和宽带调频技术获得目标的细部特征。在通信系统中能传送更多的信息，大大拓宽了现已十分拥挤的通信频谱，为更多用户提供互不干扰的通道。宽带特性也能为各种系统提供高质量的电磁兼容特性。同样，对应波长 5mm、2.5mm 和 1.6mm 的波吸收峰或高衰减带也有很大带宽，这就为军用保密通信和雷达隐藏工作提供了相对好的条件。

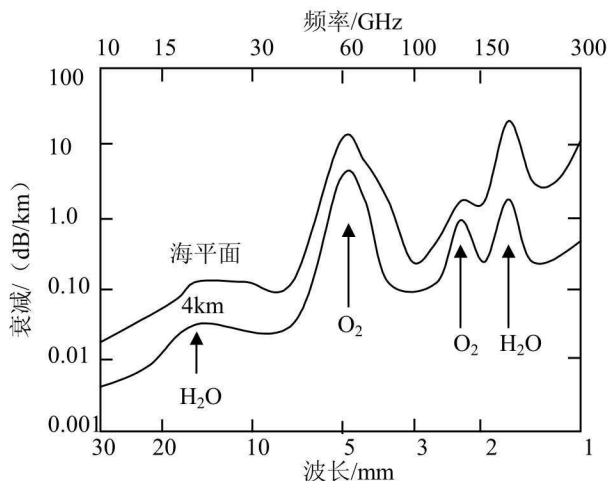


图 1.2 微波/毫米波水平传输时的平均大气吸收特性

§1.2 微波电路的发展

微波电路在许多方面的发展都遵循着低频电子电路的发展历程，由最初的电子管向固态化发展，由大型元件向小型元件、集成电路、器件方向发展，同时开发出新系统。目前微波技术的发展趋势是朝着电路小型化、高度集成化、高可靠、低功耗、大批量应用方向发展。元件尺寸和性能是卫星通信、相控阵雷达系统、电子战以及其他军事应用等电子系统设计需要考虑的主要因素，而小体积和低成本则会进一步推动着消费市场的发展。满足上述要求的方法是基于砷化镓的微波单片集成电路（MMIC——Microwave Monolithic Integrated Circuit）技术以及 RF 微机电系统（RF MEMS——RF Micro-Electro-Mechanical System），在信息传输、通信、汽车和娱乐等消费电子系统中正起着越来越大的作用。利用半导体批生产技术，将电路中所有的有源元件和无源元件都制作在一块砷化镓（GaAs）衬底上的电路称为微波单片集成电路。采用 MMIC 技术，既可以制作单个具有简单功能的芯片，也可以将一个典型的微波系统制作在单个芯片上，而且制造成本可以控制在较低范围内。目前制造的 MMIC 工作频率已覆盖整个微波频段直至毫米波频段（MMW）（30~300GHz）。单片技术可以消除传统混合结构上连接分立元件的键合线所带来的寄生效应，对毫米波应用将起到积极的推动作用。而 RF MEMS 的集成和实现为工程师提供了又一种集成选择，使他们的设计能做到性能好、尺寸小和价格低。

微波集成电路（MIC——Microwave Integrated Circuit）最早出现于 20 世纪 60 年代初期。常规波导和同轴线的第一次演变始于 Rumsey 和 Jamieson 所采用的平面带状同轴传输线，后来逐渐与印刷电路技术相融合，形成“微波印刷电路”（MPC），不久又发表了印刷电路波导手册。在 Barrett 和 Barnes 报道了微波印刷电路后不久，联邦通信研究室宣布制成微带。此后，微波集成电路的平面传输线主要采用微带电路，同时也配合使用槽线与共面线。

微波半导体器件和平面传输线构成的微波集成电路以其小型化、重量轻、耗能少而受到重视，在 20 世纪 60 年代里获得了迅速发展。70 年代，随着微波半导体器件的成熟、性能的提高、成本的降低，MIC 开始进入成熟阶段。而此时随着微波半导体器件工艺加工技术的改进，以及砷化镓材料设备的完善，使微波单片集成电路的概念逐渐形成，其研究已具备实现的条件。自 20 世纪 60 年代中期提出了微波单片集成电路的设想后，由于精细微电子工艺和 CAD 技术的巨大进展，新型

高效、大功率毫米波功率源、介质天线、集成天线、低噪声接收机芯片等相继问世，在相控阵雷达收发组件、卫星广播接收站高频头等大批量的产品方面获得成功，成本价格已低于 MIC。从 1990 年开始一批军用和民用 MMIC 产品已陆续进入市场，成本逐年下降。在 MMIC 发展的同时，MIC 也在不断改进技术，其体积尺寸不断减小，成本大幅降低。在品种、性能、规格繁多的微波部件中，生产批量往往不可能很大，而 MIC 少量生产时成本低，设计周期短，适于多种微波部件，因此在微波电路领域中，MIC 仍将在很长的时期占据主导地位。

§1.3 微波集成电路的应用

现在，微波电路正经历着巨大的变化，由不计成本、不问可制造性但求最好性能的军事应用向以商业和消费应用为主导方向发展。其主要应用范围遍及通信、雷达、环境遥感和医学系统。对微波集成电路而言，它可以取代通信、电子战、雷达和武器系统等领域中各种常规形式的微波电路，除了功率容量外，一般来说很少有制约。为了能在获得高功率的同时保持高成品率，仍需要用混合微波集成电路（HMIC）和常规波导与同轴技术。在许多要求高功率的场合，如天基雷达中，其有源相控阵采用成千上万个固态收发组件进行功率合成，因而采用 MMIC 或 MIC。T/R 组件的大量应用可望使 MMIC 的价格比混合 MIC 或常规电路低得多。

微波集成电路得到大量应用的另一个领域是电子战。特别是一次使用的系统，如一次使用的干扰机和采用无源辐射计型或有源雷达型微波/毫米波制导的智能武器装备，价格低、重量轻的微波集成电路使这些系统受益。至于卫星系统，由于火箭发射每公斤有效载荷的价格非常高，重量是十分重要的问题，因此微波集成电路的应用使其受益匪浅。

目前，大多数正在生产中的雷达采用混合集成电路，这种电路需要经过微调才能实现最佳性能。微波集成电路具有体积小、重量轻、价格低、可靠性高、频带宽、功能再制性好等优点。这些优点有利于研制具有快速波束捷变、多功能、高可靠的有源相控阵雷达。

通信、电子支援措施、电子对抗和电子通信或信号情报等系统中的接收机和发射机均大量使用微波/毫米波电路和器件。当电子设备由于电子威慑的性质而变得更加复杂时，硬件的复杂性增加了，从而使设备变得更大、更重。采用平面工艺特别是 MMIC 将有助于使其体积减小、重量减轻，因而有可能将这些系统方便地安装在对空间和功率的限制非常苛刻的飞机上。

除了在军事和空间应用中采用微波/毫米波集成电路会得到很大的好处外，在很多商用系统中，譬如卫星电视、无线通信、智能交通、自主巡航控制、汽车防撞雷达以及用于微波加热和干燥的微波传感器系统中，采用多功能微波/毫米波集成电路同样也会得到降低价格和减小体积的效果。

微波/毫米波集成电路的进展结合目前电子光学、磁光学、微波光学和微波声学正取得的进展，预示着未来十年中工程和科研方面令人鼓舞的前景。特别是这些领域将对消费类电子产品和小型装置产生强力的推动，同时还将对诸如机器人、智能武器、卫星技术及容量、飞机的智能蒙皮、光子学及智能机内测试设备等领域做出重要贡献。

第2章 微波集成电路基础

§2.1 微波集成传输线

微波电路中的传输线能将能量和信息从一个点传送到另一个点,并可用作滤波器、阻抗变换器、耦合器、延迟线和平衡-不平衡变压器之类的元件。微波集成电路的无源电路部分大都采用微带线构成的分布参数电路,这是因为在频率较低的电子线路中所用的分立式集总参数元件(电阻、电容和电感)的尺寸与微波的波长可比拟。对适合在微波集成电路中作为电路元件的传输线结构而言,其主要要求之一是这种结构必须是“平面”的。平面几何形状意味着元件的特性可以由单一平面内的尺寸来确定。采用“平面”传输线的一种或几种所组成的电路与常规微波电路相比,具有重量轻、尺寸小、性能优越、可靠性高、可复制性好且价格低廉等优点,同时,它们也适合和固态芯片器件配合使用。

2.1.1 概述

在微波频率内,使用了名目繁多的各类传输线和波导结构。而在微波集成电路(MIC)中使用的具有代表性的平面传输线有微带线、倒置微带线、悬置微带线、带线、槽线、共面波导和鳍线,图2.1列出了这些常用平面传输线的截面图。

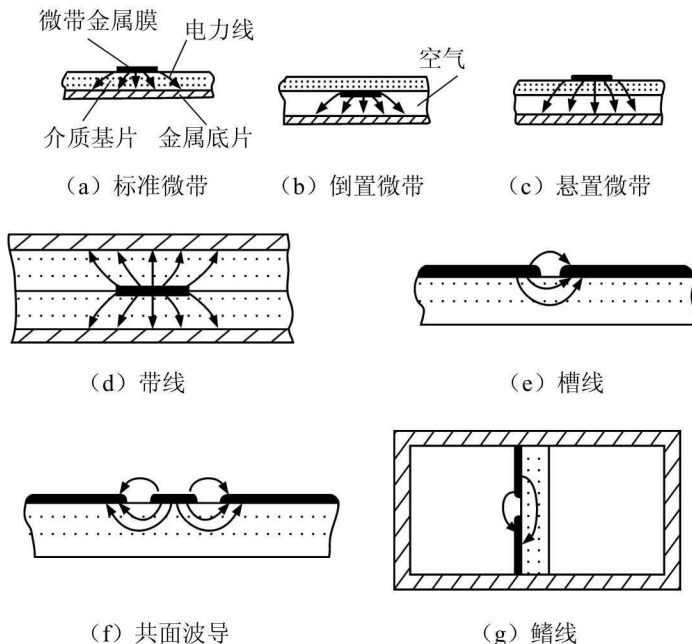


图 2.1 MIC 常用的微波传输线

微带线

微带线是微波集成电路中最流行的平面传输线,主要是因为它可以用照相印制工艺来加工,而

且它易于与其他无源和有源的微波器件集成，是 MMIC 电路中主要的微波传输线，因此本书介绍的电路将以微带电路为主。微带线是在低损耗介质板上制作的薄膜带条，它的结构可以理解为由同轴传输线演变而产生。图 2.2 (a) 是同轴传输线，图中实线箭头代表电力线，虚线是磁力线。如果把外导体金属筒切开展成平板，内导体改为薄带，则构成对称的三板带状线，如图 2.2 (b) 所示。上、下两平板为接地板，处在同一电位，中间薄膜带条夹在两片介质板中。若去掉上介质板和金属板，就构成了微带线，又称为标准微带线，如图 2.2 (c) 所示。

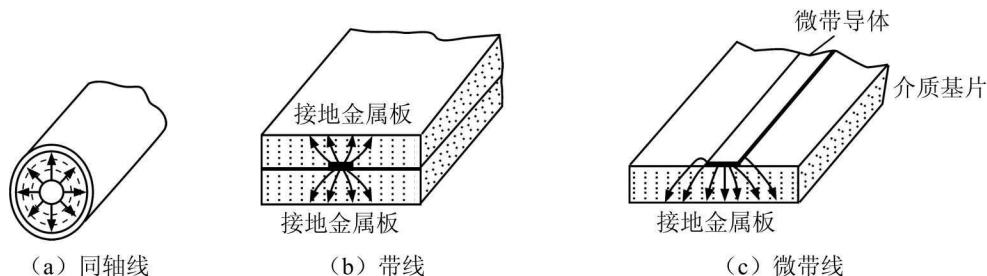


图 2.2 同轴线和微带线

微带线基板厚度为 h ，相对介电常数为 ϵ_r ，当介电常数远大于空气介电常数 ϵ_0 ，而且频率较低时，电磁场基本上存在于介质基板内。此时的电磁场模式可认为是 TEM 波。但实际上总会有一小部分电磁场存在于空气中，在空气和基板交界面处出现电磁场的不连续状态，因此微带线中传播的电磁波不是纯 TEM 波，还包含一定成分的纵向分量，称之为准 TEM 波。

实际上，微带线的严格场解是由混合 TM-TE 波组成的，需要复杂的分析技术。有大量文献对这种传输媒质进行了研究，给出一些解析法和数值法。这些方法中，准静态法大概是最简单的，但有效范围有限；全波法则完整而严格。在准静态法中，传播模式被看成纯 TEM 的，而传输线的特性参数是根据其传输结构的静电电容计算的。由于在绝大多数实际应用中，介质基片是非常薄的 ($h \ll \lambda$)，因此其场是准 TEM 的。换言之，场基本上与静态情形时相同，因此相速、传播常数和特性阻抗可以由静态或准静态解获得。在准静态法中，传输特性参数是根据下列两个电容的值计算的。一个是 C_a ，它是对应于单位长度微带线将其介质材料换为空气而求得的电容；另一个是 C ，是对应有介质材料的单位长度微带线计算出的。特性阻抗 Z_0 和相位常数 β 可用这两个电容表示，形式如下：

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{CC_a}} \quad (2.1)$$

$$\beta = k_0 \left(\frac{C}{C_a} \right)^{1/2} = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.2)$$

式中

$$\epsilon_e = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 = \frac{C}{C_a}, \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2.3)$$

λ_0 是自由空间波长，而 λ_g 是波导波长。有效介电常数 ϵ_e 考虑到了空气区域的电场和磁场。有效介电常数的数值是由电磁场分布决定的。如果电磁场全部处于介质中，则 $\epsilon_e = \epsilon_r$ ，但是由于电磁场的一部分存在于 $\epsilon_0 = 1$ 的空气中，因此 $\epsilon_e < \epsilon_r$ ， ϵ_e 的严格计算是比较复杂的，不仅微带中电磁场分布不规则，而且随着频率的升高，电磁场的纵向分量增加，磁场纵向分量增长比电场纵向分量增长还要快，因此 ϵ_e 也随频率变化，传播波长和微带特性阻抗都随之而变，这就是色散现象。一

般情况下, 频率低于 4~5GHz 时, 色散现象不严重。随后 ε_e 将随频率增加而增加。求解微带线特性参数的数值方法需要大量计算。为了对微带电路进行优化设计和计算机辅助设计, 需要闭合表达式。下面给出关于微带线特性的闭合表达式。不考虑色散的特性阻抗 Z_0 的公式为

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{W'} + 0.25\frac{W'}{h}\right) & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_e}} \left[\frac{W'}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W'}{h} + 1.444\right) \right]^{-1} & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

其中, $\eta_0 = 120\pi\Omega$, W 为微带线宽度, h 为介质基片厚度, t 是微带线金属导体厚度。

$$\frac{W'}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{4\pi W}{t} \right) \quad \left(\frac{W}{h} \leq \frac{1}{2\pi} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{W'}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad \left(\frac{W}{h} \geq \frac{1}{2\pi} \right) \quad (2.6)$$

不考虑色散的有效介电常数 ε_e 的公式为

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} F \left(\frac{W}{h} \right) - \frac{\varepsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{W/h}} \quad (2.7)$$

其中,

$$F\left(\frac{W}{h}\right) = \begin{cases} \left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-1/2} + 0.04\left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \left(1 + 12\frac{h}{W}\right)^{-1/2} & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

考虑色散的有效介电常数 ε_e 和特性阻抗 Z_0 的公式为

$$\varepsilon_e(f) = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_r} - \sqrt{\varepsilon_e} + \sqrt{\varepsilon_e}}{1 + 4F^{-1.5}} + \sqrt{\varepsilon_e} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$Z_0(f) = Z_0 \frac{\varepsilon_e(f) - 1}{\varepsilon_e - 1} \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_e(f)}} \quad (2.10)$$

f 是工作频率。

其中,

$$F = \frac{4h\sqrt{\varepsilon_r - 1}}{\lambda_0} \left\{ 0.5 \left[1 + 2 \lg \left(1 + \frac{W}{h} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.11)$$

微带线的最高工作频率受到许多因素的限制, 如寄生模的激励、较高的损耗、严格的制造公差、处理过程中的脆性、显著的不连续效应、不连续处的辐射引起低的 Q 值等。当工作频率很高时, 不仅色散严重, 而且将出现非 TEM 波的其他电磁场模, 统称为高次模。高次模的出现将破坏电路正常工作。最低次的 TM 表面波的截止频率理论上为零, 即任何频率都可能存在 TM 表面波, 但只有在某一频率上, 其相速和准 TEM 波主模相速接近时, 两个模将产生强烈耦合, 这时才可能激发起 TM 表面波。式 (2.12) 为准 TEM 波和最低表面波寄生模之间产生强耦合时的频率。

$$f_T = \frac{150}{\pi h} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r - 1}} \tan^{-1}(\varepsilon_r) \quad (2.12)$$

式中, f_r 的单位是 GHz, h 的单位是 mm。因此当用砷化镓 (GaAs) 作衬底 ($\epsilon_r \approx 12.9$) 设计 100GHz 的微带电路时, 其最大厚度应小于 0.3 mm。最大厚度还要受到微带线不连续处高辐射损耗的限制, 例如, 开路端、间隙、裂缝、宽度跃变、拐弯等不连续点。对于半波长的谐振器, 辐射 Q 值可近似表示为

$$Q_r = \frac{3\epsilon_r Z_0 \lambda_0^2}{32\eta_0 h^2} \quad (2.13)$$

对于较厚的衬底, $Q \approx Q_r$, 因而 Q 是正比于 $1/(fh)^2$ 而变化的。例如, GaAs 衬底上的 50Ω 谐振器的 $Q_r \approx 1.44 \times 10^4 / (fh)^2$, 式中, f 的单位是 GHz, h 的单位是 mm。在 100GHz 频率工作时, 为使 Q_r 大于 100, 衬底的厚度要小于 0.125mm。而这样量级的衬底厚度要引起约 1dB/cm 的衰减。制造公差及诸如光刻技术这类工艺限制了最小微带线宽度, 而且在耦合线的情况下限制了相邻带线之间的距离。在厚度为 0.125mm 的 GaAs 衬底上实现 100Ω 左右的高阻抗线, 要求带线宽度为 0.01 mm 左右, 微带线的工作频率也因低的辐射 Q_r 受到限制。

悬置式微带线和倒置式微带线

悬置式微带线和倒置式微带线具有比微带高的 Q 值 (500~1500)。这两种传输媒介可以实现很宽范围的阻抗值, 因而它们特别适用于滤波器。当 $t/h \ll 1$ 时, 特性阻抗和有效介电常数的公式为

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left[\frac{f(u)}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u}\right)^2} \right] \quad (2.14)$$

式中

$$f(u) = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[-\left(\frac{30.666}{u}\right)^{0.7528} \right] \quad (2.15)$$

对于悬置式微带线, $u = W/(a+b)$, 其中 $a = h$ 为介质基片厚度, b 为介质基片与接地面间的距离; 而对于倒置式微带线, 则 $u = W/b$ 。

悬置式微带线的有效介电常数 ϵ_e 可由下式求出

$$\sqrt{\epsilon_e} = \left[1 + \frac{a}{b} \left(a_1 - b_1 \ln \frac{W}{b} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2.16)$$

式中

$$a_1 = \left(0.8621 - 0.1251 \ln \frac{a}{b} \right)^4 \quad (2.17)$$

$$b_1 = \left(0.4986 - 0.1397 \ln \frac{a}{b} \right)^4 \quad (2.18)$$

而倒置式微带线的有效介电常数可由下式求得

$$\sqrt{\epsilon_e} = 1 + \frac{a}{b} \left(\bar{a}_1 - \bar{b}_1 \ln \frac{W}{h} \right) (\sqrt{\epsilon_r} - 1) \quad (2.19)$$

式中

$$\bar{a}_1 = \left(0.5173 - 0.1515 \ln \frac{a}{b} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$\bar{b}_1 = \left(0.3092 - 0.1047 \ln \frac{a}{b} \right)^2 \quad (2.21)$$

当 $1 < W/h \leq 8$, $0.2 \leq a/b \leq 1$ 时, 式(2.20)和式(2.21)的精确度在 $\varepsilon_r \leq 6$ 的情况下小于 $\pm 1\%$; 而 $\varepsilon_r \approx 10$ 时, 小于 $\pm 2\%$ 。

带 线

带线是在无源微波集成电路使用最广泛的传输线之一。带线的主模是 TEM, 通过静电场分析的方法, 例如保角变换, 可以获得其设计所需要的数据。当 $t=0$ 时特性阻抗 Z_0 的精确公式为

$$Z_0 = \frac{30\pi K'(k)}{\sqrt{\varepsilon_r} K(k)}, \quad k = \tanh \frac{\pi W}{2b} \quad (2.22)$$

式中, K 表示第一类完全椭圆函数, K' 表示它的余函数。 K/K' 的近似公式 (精确到 8×10^{-6}) 为

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \left[\frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right) \right]^{-1} & 0 \leq k \leq 0.7 \\ \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right) & 0.7 \leq k \leq 1 \end{cases} \quad (2.23)$$

式中, $K'(k) = K(k')$, $k' = \sqrt{1-k^2}$ 。

当 $t \neq 0$, 对于 $W'/(b-t) < 10$, 特性阻抗 Z_0 的公式为式 (2.24), 其精度在 0.5% 内。

$$Z_0 = \frac{30 \ln}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left\{ 1 + \frac{4b-t}{\pi W'} \left[\frac{8b-t}{\pi W'} + \sqrt{\left(\frac{8b-t}{\pi W'} \right)^2 + 6.27} \right] \right\} \quad (2.24)$$

其中,

$$\frac{W'}{b-t} = \frac{W}{b-t} + \frac{\Delta W}{b-t} \quad (2.25)$$

$$\frac{\Delta W}{b-t} = \frac{x}{\pi(1-x)} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{x}{2-x} \right)^2 + \left(\frac{0.0796x}{W/b+1.1x} \right)^m \right] \right\} \quad (2.26)$$

$$m = 2 \left[1 + \frac{2}{3} \frac{x}{1-x} \right]^{-1}, \quad x = \frac{t}{b} \quad (2.27)$$

总损耗可以用来确定一个 $\lambda/2$ 的谐振器的品质因数 Q 。

$$Q = \frac{8.68\pi\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda_0\alpha_T} \quad (2.28)$$

式中, α_T 是衰减常数。

槽 线

在需要高阻抗线、串联短线、短路电路, 以及采用微波集成电路的混合电路中, 槽线是非常有用的。槽线的传播模式是非 TEM, 其性质基本是横电波 (TE)。在下面所列的一组参数范围内, 给出的槽线特性阻抗和波长的闭合型表达式的精度约为 2%。

在 $9.7 \leq \varepsilon_r \leq 20$, $0.02 \leq \frac{W}{h} \leq 1.0$, $0.01 \leq \frac{h}{\lambda_0} \leq \left(\frac{h}{\lambda_0} \right)_c$ 的范围内, 其中 $(h/\lambda_0)_c$ 是槽线上 TE_{10}

表面波模的截止值, 并由式 (2.29) 给出