



普通高等教育“十三五”规划教材



微电子与集成电路设计系列规划教材

微波集成电路

© 谢小强 徐跃杭 夏雷 编著

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>

普通高等教育“十三五”规划教材
微电子与集成电路设计系列规划教材

微波集成电路

谢小强 徐跃杭 夏雷 编著



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

内 容 简 介

本书为电子科技大学新编特色教材建设与研究成果之一，主要内容包括：绪论、微波集成传输线、微波无源集成电路、微波固态器件、微波混合集成电路、微波单片集成电路等，并提供部分习题参考答案及配套电子课件。

本书可作为高等学校电子、电磁场与微波技术、集成电路、通信、雷达等专业的高年级本科生及研究生教材，也可供相关领域工程技术人员学习和参考。

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

微波集成电路 / 谢小强，徐跃杭，夏雷编著. — 北京：电子工业出版社，2018.7

ISBN 978-7-121-32709-4

I. ①微… II. ①谢… ②徐… ③夏… III. ①微波集成电路—高等学校—教材 IV. ①TN454

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 226972 号

策划编辑：王羽佳

责任编辑：谭丽莎 特约编辑：周宏敏

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

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：20 字数：512 千字

版 次：2018 年 7 月第 1 版

印 次：2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价：55.00 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）88254888，88258888。

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。

本书咨询联系方式：（010）88254535，wylj@phei.com.cn。

前 言

集成电路已经在各行各业中发挥着非常重要的作用,可以说电路集成技术是现代信息社会发展的基石。作为集成电路的重要组成部分,始于20世纪50年代的微波集成电路已在航空航天、雷达、导航、制导、通信、测量、气象探测、工业检测、智能交通、机场异物检测等军事和民用领域获得了广泛的应用。在这些微波无线应用系统中,微波信号通常作为信息和能量的载体,微波电路部分往往位于系统前端,用于处理这些微波信号。因此,微波电路对微波信号处理的技术水平就成为决定微波无线应用系统性能的关键因素。可以说,微波无线系统性能的决定因素在于高性能微波电路的设计与实现。因此,随着微波无线技术在民用领域的广泛开展,对于相关领域的科学研究者、设计者和工程应用者来说,高性能、高集成度、高可靠性和低成本的微波电路集成技术显得极其重要。

另外,随着微波电路集成技术及应用需求的发展,新材料、新工艺和新技术逐步在微波集成电路领域的采用与推广。微波集成电路在工作频率、带宽、信号质量、低噪声性能、输出功率能力、功能、功耗、小型化、可靠性和低成本等方面取得了革命性的进步。微波集成技术的发展促进了微波无线系统在灵敏度、作用半径/距离、信息容量、反应速度、准确性和精度等系统性能的显著提高,并拓展了系统功能和应用领域。反过来,系统需求与应用领域的扩展又进一步推动了现代微波电路集成技术在器件、电路、集成方式和集成规模等方面不断地发展与革新。可以说,现代微波集成技术及其应用发展,彰显了新一代信息技术正在经历的持续、快速的革命进程。

本书是电子科技大学规划教材,是作者在微波集成电路多年科研和教学的经验基础上逐年积累编写而成的。在当前微波集成技术与系统应用背景下,为适应当前高等学校开展的课程体系与教学内容改革,及时反映微波集成电路教学基础内容与最新研究成果,我们编写了这本微波集成电路基础教材。本书以培养基础理论与基本方法为目标,紧跟现代微波电路集成新技术与新方法,从先进性和实用性出发,遵循基础教学内容与工程实现和应用并重的原则,较全面地介绍微波集成电路的概念和设计方法。

本书具有如下特色:

① 根据研究型教学理念,采用研究型学习的方法,即“提出问题—解决问题—归纳分析”的问题驱动方式,突出学生主动探究学习在整个教育教学中的地位和作用。

② 在内容及描述上,我们注重对概念和原理上的理解和描述。首先从集成电路概念出发,从实际工艺和实现方法入手,然后基于一定的工艺技术进行相应的集成电路设计,最后采用实际设计案例,加深对每一个概念的理解。

③ 本书的基本思路是分两步走。首先,以微波集成电路的组成为一条主线,围绕这条主线介绍微波集成电路基础知识、基本原理和功能特点,同时拓展知识面,介绍各种部件的原理和相关技术。其次,以材料和工艺技术为另一条主线,介绍混合集成电路、多芯片组件和单片集成电路的基本知识、基本原理和设计技术,并通过实例加深不同材料和工艺下设计方法的区别。上述两条主线是一个有机的整体,是相辅相成的,其实质是理论知识与实践应用、传统集成工艺和新兴集成技术完美结合的一条综合知识中轴线。

④ 本书注重将微波集成电路的最新发展适当地引入到教学中来,保持教学内容的先进性。本书源于微波集成电路的科研和教学实践,凝聚了工作在第一线的科研教师和任课教师多年的教学经验与科研成果。

本书语言简明扼要、通俗易懂,具有很强的专业性、技术性和实用性。通过学习本书,你可以:

- 了解微波集成电路的概念和应用背景;
- 掌握微波集成电路设计方法;
- 了解当前最先进的微波集成电路技术。

本书共 6 章,参考学时为 32~64 学时。教学中,可根据教学对象和学时等具体情况对书中内容进行删减和组合,也可以进行适当扩展。

本书可作为高等学校电子、电磁场与微波技术、集成电路、通信、雷达等专业的高年级本科生及研究生教材,也可供相关领域工程技术人员学习和参考。

本书第 1 章、第 2 章、4.1 节和 4.2 节由谢小强副教授编写,第 3、6 章由徐跃杭教授编写,4.3~4.5 节和第 5 章由夏雷研究员编写。全书由谢小强副教授统稿。

本书的编写参考了大量近年来出版的国内外相关技术资料,以及电子科技大学微波毫米波电路与系统教研室的研究成果,吸取了许多专家和同仁的宝贵经验,在此向他们深表谢意。

在本书的编写过程中,本教研室赵翔、吴永伦、周睿、毛书漫,刘伶、肖玮、董月红等研究生,以及电子工业出版社王羽佳编辑为本书的撰写和出版做了大量工作,在此一并表示感谢!

由于微波集成电路发展迅速,作者学识有限,书中误漏之处难免,望广大读者批评指正。

编 者
2018 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2 微带集成电路中的不连续性	63
1.1 集成电路概述	1	3.2.1 概述	63
1.2 微波频率简介	2	3.2.2 微带线的截断端	64
1.3 微波集成电路的发展和应用	4	3.2.3 微带线的阶梯跳变	66
1.3.1 微波集成电路的起源	5	3.2.4 微带间隙	68
1.3.2 微波混合集成电路	6	3.2.5 微带线拐角	69
1.3.3 微波单片集成电路	7	3.2.6 微带线 T 形接头	71
习题	10	3.2.7 微带线十字接头	71
参考文献	10	3.2.8 微带线实现集总元件	72
第 2 章 微波集成传输线	11	3.3 耦合微带线定向耦合器	76
2.1 微波集成传输线概述	11	3.3.1 耦合微带线	76
2.2 微波集成传输线分析方法	12	3.3.2 平行耦合微带线定向耦合器	80
2.2.1 概述	12	3.3.3 Lange 耦合器	86
2.2.2 传输线分布参数元件的定义	14	3.4 微带线三端口功分器	86
2.2.3 微波集成传输线分布参数等效 电路	17	3.4.1 概述	86
2.2.4 微波集成传输线材料及特性	20	3.4.2 微带 Wilkinson 功分器	88
2.3 微带线	24	3.5 微带分支线电桥和微带环形电桥	90
2.3.1 概述	24	3.5.1 概述	90
2.3.2 微带线中的主模和高次模	25	3.5.2 带分支线电桥	90
2.3.3 微带线的特性阻抗和相速	28	3.5.3 微带环形电桥	92
2.3.4 微带线的损耗	38	3.6 微波集成滤波器	94
2.3.5 微带线的品质因数	45	3.6.1 概述	94
2.3.6 微带线的色散特性	47	3.6.2 低通原型滤波器及其转换	95
2.4 其他类型的微波集成传输线	51	3.6.3 微波滤波器的实现	105
2.4.1 带状线	51	3.6.4 小型化滤波器设计	113
2.4.2 悬置微带和倒置微带	54	习题	121
2.4.3 槽线	55	参考文献	121
2.4.4 共面波导	56	第 4 章 微波固态器件	123
2.4.5 鳍线	58	4.1 半导体物理基础	123
2.4.6 介质集成波导	59	4.1.1 晶体的能带结构和导电机理	123
习题	61	4.1.2 半导体电磁场基本方程	126
参考文献	61	4.2 微波固态器件基础	128
第 3 章 微波无源集成电路	62	4.2.1 微波半导体材料特性	128
3.1 概述	62	4.2.2 pn 结	129
		4.2.3 金属-半导体接触	135

4.3	二极管	137	5.6.2	转换接头	203
4.3.1	肖特基二极管	137	5.6.3	偏置电路	206
4.3.2	变容二极管	139	5.6.4	隔直(DC-block)	209
4.4	双极晶体管	139	5.6.5	微波电路中固体器件的安装	211
4.4.1	双极型晶体管	139	5.7	微波多芯片组件技术	218
4.4.2	异质结双极晶体管(HBT)	148	5.7.1	概述	218
4.5	场效应晶体管(MESFET、HEMT、pHEMT)	149	5.7.2	低温共烧陶瓷多层集成电路技术(LTCC)	219
4.5.1	金属半导体场效应晶体管(MESFET)	149	5.7.3	微波LTCC电路	228
4.5.2	异质结场效应晶体管(HEMT、pHEMT)	155	5.7.4	LTCC在微波毫米波系统中的应用	233
	习题	160		习题	236
	参考文献	160		参考文献	237
第5章	微波混合集成电路	161	第6章	微波单片集成电路	239
5.1	概述	161	6.1	概述	239
5.2	微波混合集成晶体管放大器	161	6.2	元部件技术	241
5.2.1	微波晶体管放大器理论	162	6.2.1	无源元件	242
5.2.2	微波晶体管放大器的设计	171	6.2.2	有源器件	247
5.3	微波振荡器	182	6.2.3	MMIC设计流程	257
5.3.1	微波振荡器基本原理	182	6.3	MMIC工艺	258
5.3.2	二极管振荡器	183	6.3.1	衬底材料生长和晶圆生长	259
5.4	微波混频器	186	6.3.2	典型MMIC工艺步骤	262
5.4.1	微波混频器原理	186	6.4	MMIC电路设计实例	264
5.4.2	单端混频器	188	6.4.1	MMIC低噪声放大器设计	264
5.4.3	平衡混频器	189	6.4.2	四次谐波镜像抑制混频器MMIC设计	278
5.5	微波倍频器	193	6.5	版图	288
5.5.1	微波倍频原理	193	6.6	MMIC测试	292
5.5.2	二极管倍频器	196		习题	295
5.5.3	FET倍频器	199		参考文献	295
5.6	微带混合集成技术	200		部分习题参考答案	297
5.6.1	屏蔽箱体	200			

第1章 绪 论

1.1 集成电路概述

微波集成电路是集成电路(IC, Integrated Circuit)的形式之一。通常认为,集成电路是为了达到在成本、尺寸、重量及可靠性等方面优于电子管、波导、同轴线等立体电路的目的,将电路中所需的器件(包括有源器件和无源器件,如晶体管和二极管)、无源元件(如电阻、电容和电感)、无源电路等互连一起,制作在一片或多片半导体基片或介质基片上,实现一定功能的微型电子电路或部件。集成电路中有源器件是固态器件;电路可以封装在一个管壳内,也可以是一块裸露的芯片。显然,与由真空电子有源器件、波导、同轴传输线构成的“立体电路”相比较,集成电路中所有元器件在结构上组成一个整体,电路体积大大缩小,电路引出线和焊接点数目也大为减少,使系统向着微小型化、低功耗和高可靠性方面迈进了一大步。

通常,按照集成电路制作工艺的不同,可以分为3种类型:单片集成电路,薄膜或厚膜集成电路,混合集成电路。

(1) 单片集成电路:将有源和无源电路元件集成在一片半导体衬底上,形成完整电路功能的集成电路。

(2) 薄膜或厚膜集成电路:在绝缘介质基片衬底上淀积电阻或导电膜,并在衬底上产生一定图形构成完整功能的电路网络。一般来讲,膜厚度 $\geq 10\mu\text{m}$,为厚膜集成电路;膜厚度在 $1\sim 10\mu\text{m}$ 之间,称为薄膜集成电路。

(3) 混合集成电路:前两种电路的自然扩充,将有源或无源器件(包括分立器件和单片集成电路器件)组合在同一绝缘衬底上互连而成的具有完整功能的电路或系统。

按照集成电路的功能不同,又可以大致分为:数字集成电路,线性集成电路,微波集成电路。

(1) 数字集成电路:用数字信号完成对数字量进行算术运算和逻辑运算的电路。由于它具有逻辑运算和逻辑处理功能,所以又称数字逻辑电路。现代数字电路由半导体工艺制成的若干数字集成器件构造而成。

(2) 线性集成电路:线性集成电路是一种以放大器为基础的集成电路,主要包括放大器、稳压器、乘法器、调制器等。由于处理的信息都涉及到连续变化的物理量(模拟量),人们也把这种电路称为模拟集成电路。

(3) 微波集成电路:微波集成电路指由微波集成传输线和微波固体器件构成,完成一定微波电路或系统功能的集成电路。在微波集成电路尚未成熟之前,集成电路只有数字集成电路和模拟集成电路两种类型。由于微波集成电路所处理的信号频率更高,属于分布参数电路,具有独立的电路设计原理和分析方法,并需专用的微波有源器件实现,因而本书将微波集成电路与数字、模拟电路并列,列为第三种集成电路。

另外,集成电路按照集成度的不同,可以分为中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)。对模拟集成电路,由于工艺要求较高、电路又较复杂,目前还没有超大规模的模拟集成电路出现。所以对模拟集成电路来说,一般认为集成50个以下的元器件为小规模集成电路;集成50~100个的元器件为中规模集成电路;集成100个以上的元器件为大规模集成电路。对

于数字集成电路,一般认为集成 1~10 个等效门/片或 10~100 个元件/片为小规模集成电路;集成 10~100 个等效门/片或 100~1000 个元件/片为大规模集成电路;集成 100~10 000 个等效门/片或 1000~100 000 个元件/片为大规模集成电路;集成 10 000 个以上等效门/片或 100 000 个以上元件/片为超大规模集成电路。表 1.1-1 给出了不同集成规模的集成电路所包含的元件数量。

表 1.1-1 不同集成规模的集成电路

集成度		小规模 (SSI)	中规模 (MSI)	大规模 (LSI)	超大规模 (VLSI)
模拟集成电路	元器件数	≤50	50~100	≥100	—
数字集成电路	逻辑门数/元件数	1~10/ 10~100	10~100/ 100~1000	100~10 000/ 100~100 000	>10 000/ >100 000

总之,集成电路是朝着小型化、高度集成化、高可靠性、低功耗、低成本、大规模产业化和大批量应用方向发展的。集成电路的这一发展趋势也是微波集成电路的发展方向。但相对于数字和低频线性集成电路,微波集成电路工作于更高频率,电路具有分布参数特性,集成电路形式多采用薄膜工艺实现,并且电路集成度远远低于数字和低频模拟电路。另外,微波集成电路对材料、器件、工艺和设计方法都具有特殊要求,发展相对缓慢。

1.2 微波频率简介

微波集成电路所工作的频率——微波频率,属于无线电频率中的一部分。与长波、中波与短波相比,微波频率对应的波长要“微小”得多。微波是指波长范围为 1m~0.1mm (或频率范围为 300MHz~3000GHz) 的电磁波。微波频谱可粗略地分为:分米波 (300~3000MHz),厘米波 (3~30GHz),毫米波 (30~300GHz),亚毫米波 (300~3000GHz)。就目前工程应用和学术界来说,通常认为分米波、厘米波频段为微波频段;30GHz 以上称为毫米波频段;对于毫米波频段高端 (≥100GHz),已进入太赫兹 (THz) 频段 (波长 3~0.03mm) 低端了。表 1.2-1 给出了整个无线电波的波段名称。可见,广义的微波频率涵盖了超高频 (UHF)、特高频 (SHF) 和极高频 (EHF) 3 个波段。一般我们说的微波频段则是指 UHF 和 SHF, EHF 为毫米波频段。

表 1.2-1 无线电波的波段

频率范围	波长范围	波段名称	
		英文	中文
0.03~0.3Hz	$10^7 \sim 10^6$ km	ULF (Ultra Low Frequency)	超低频
0.3~3Hz	$10^6 \sim 10^5$ km		
3~30Hz	$10^5 \sim 10^4$ km		
30~300Hz	$10^4 \sim 10^3$ km	ELF (Extremely Low Frequency)	极低频
300~3000Hz	$10^3 \sim 10^2$ km		
3~30kHz	100~10km	VLF (Very Low Frequency)	甚低频
30~300kHz	10~1km	LF (Low Frequency)	长波
300~3000kHz	1000~100m	MF (Medium Frequency)	中波
3~30MHz	100~10m	HF (High Frequency)	短波
30~300MHz	10~1m	VHF (Very High Frequency)	甚高频
300~3000MHz	100~10cm	UHF (Ultra High Frequency)	超高频
3~30GHz	10~1cm	SHF (Super High Frequency)	特高频
30~300GHz	10~1mm	EHF (Extremely High Frequency)	极高频
300~3000GHz	1~0.1mm	SMMW (Submillimeter Wave)	亚毫米波

首先,微波有着不同于其他电磁波谱的重要特点。它自被发现以来,就不断得到发展与应用。微波技术的应用与微波频谱所具有的特点密不可分。首先,微波具有似光性。微波波长短,当照射在某些物体上时,将产生显著的反射和折射现象。微波的传播特性也和几何光学相似,能像光线一样地直线传播并易于集中。利用微波的似光性,可研制方向性好、体积小的天线设备,用于定向发射和接收(反射)微波信号,确定和探测地面、宇航空间各种物体的方位和距离,比如为雷达、导航等系统所应用。

其次,微波具有穿透性。微波的穿透性主要表现在当其照射在介质物体时,能深入物体内部。微波能穿透生物体,可作为医学热疗、安检探测的重要手段。微波能够穿透电离层,是人类探测外层空间的“宇宙窗口”。同时,利用微波这一性能,可实现卫星-地面通信,也可用于远程导弹或航天器重返大气层时实现末制端导和通信的手段。

第三,微波具有信息性。微波频率高,信息容量大,即便是很小的相对带宽,其可用的频率带宽也是很宽的。绝大多数无线通信系统都工作在微波频段。微波信号还可提供相位信息、极化信息、多普勒频率信息,可广泛用于探测、遥感、目标特征分析等系统中。近来,随着无线通信需求业务的增长,利用微波通信的频率逐步提高,特别是以5G(第五代移动通信)通信为代表的现代无线通信系统应用。

第四,非电离性。微波的量子能量不够大,不会改变物质分子的内部结构或破坏物质分子的化学键,微波与物体间的作用是一种非电离作用。另外,由物理学可知,分子、原子和原子核在外加周期电场作用下,所呈现的共振现象几乎发生在微波频段范围内。因此,可利用微波这一特性来探索物质的内部结构和基本特性。

基于以上这些特性,使得微波技术广泛应用于雷达、通信、探测、科学研究、生物医学、微波能等众多领域。雷达和通信是微波频率应用的两个主要领域。

工作于微波频率的雷达,具有天线尺寸小、波束窄、分辨率高等特点。微波雷达不仅用于军事,也用于民用,如导航、气象探测、大地测量、工业检测、智能交通、汽车防撞雷达、机场异物检测等等。历史上,根据雷达设备或系统的大概工作频段,微波-毫米波频段又粗略地被分为若干个波段——雷达波段,并用不同的英文字母来表示。并且,不同国家、不同应用专业领域的划分情况和表示方法也不尽相同。这种根据历史应用情况而形成的对微波频段的传统划分方式,目前已在工程应用和科研领域内被广泛采用,表1.2-2给出了最常用的微波频段划分情况。

表 1.2-2 常用微波频段划分

波段名称	波长范围 (cm)	频率范围 (GHz)
P	60~30	0.5~1
L	30~15	1~2
S	15~7.5	2~4
C	7.5~3.75	4~8
X	3.75~2.4	8~12
Ku	2.4~1.67	12~18
K	1.67~1.13	18~26.5
Ka	1.13~0.75	26.5~40
Q	0.9~0.6	33~50
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
D	0.27~0.176	110~170
G	0.215~0.136	140~220
R	0.136~0.09	220~325

在微波无线通信领域，微波宽频带大信息容量特征体现突出，可满足多路高速数据传播；同时由于微波直线传播特性，可通过中继接力方式实现长距离通信。利用微波对电离层的穿透特性，实现地面-卫星长距离通信。比如，利用外层空间的 3 颗互成 120° 角的同步卫星，就能实现全球通信和电视实况转播。

全球卫星定位系统也是利用微波可穿透电离层特性实现的。我国自行研制的全球卫星导航系统——中国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System)，是继美国全球定位系统 (GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS) 之后，世界第三个成熟的卫星导航系统。与 GPS 类似，我国的“北斗”卫星导航定位系统在军事应用领域可实现部队指挥与管制及战场管理，在民用领域，可提供个人位置服务、气象应用、交通运输、应急救援、农用（如智能放牧）等等。

1.3 微波集成电路的发展和应用

微波集成电路的概念是相对于立体结构微波电路而言的，是伴随着微波固态器件的发现以及微波平面电路的发展而产生的。20 世纪 40 年代出现的微波电路是立体电路结构，无源电路采用波导/同轴传输线、波导/同轴元件、谐振腔等，有源电路为真空电子器件。这时的微波信号产生、微波功率获取代价高，效率低。微波电路设计主要靠经验，很少进行综合分析，计算的主要工具是计算尺，微波电路相关技术发展极其缓慢。20 世纪 60 年代以来，在军事应用需求背景前提下，在半导体工艺技术、半导体材料科学与技术以及先进电子计算机科学技术发展推动下，微波电路领域出现了两个重大的技术变革：一是微波平面传输线的深入研究和应用开展，特别是以微带线等为主要传输媒介的微波平面集成电路的研究和应用；二是研制出了许多微波半导体有源器件，特别是用于微波混频、振荡、放大的二极管类和三极管类器件的成功研制。和数字、低频大规模集成电路发展模式一样，这些技术革新和应用需求驱动了微波电路由波导类立体电路向小型化、高集成度和低成本的微波集成电路发展。

就微波集成电路的发展历程和电路集成方式来说，微波集成电路有两大类：微波混合集成电路 (HMIC, Hybrid Microwave Integrated Circuits) 和微波单片集成电路 (MMIC, Monolithic Microwave Integrated Circuits)。通常，早期微波立体电路称作第一代微波电路，微波混合集成电路属于第二代微波电路，微波单片集成电路属于第三代微波电路。与由立体波导、同轴线和真空电子器件实现的微波立体电路相比，由平面传输线和半导体有源器件构成的微波电路——微波混合集成电路，凸显出了低成本、小型化、重量轻、低电压、高可靠性、长寿命等优势，并且易与波导器件、铁氧体器件连接，可以适应当时迅速发展起来的小型微波固体器件，因而迅速地应用于各类微波整机系统，并且在提高军用电子系统的性能和小型化方面起到了显著作用。随着半导体材料、器件工艺及微波 CAD (Computer-Aided Design) 技术的发展，进一步推动了微波集成电路在小型化、高集成度和低成本等方面的技术革新，促成了由微波混合集成电路向微波单片集成电路的过渡，使微波集成电路与数字、低频集成电路一样，可以将无源元件和有源器件制作在同一块半导体芯片上，实现了一个完整的电路甚至系统功能。与第二代的微波集成电路——HMIC 相比较，微波单片集成电路——MMIC 具有体积更小、寿命更长、可靠性高、噪声低、功耗小、工作频率更高、带宽更宽等优点。更为重要的是，由于大规模批量化生产，MMIC 的低成本、高生产效率的优势凸显，带动了微波技术领域的工业化革命，并使得微波电路从昂贵的军事应用领域向商业化民用领域扩展。

过去 60 多年来，微波集成电路得到了迅猛发展，其应用几乎涉及人们生活的各个领域，包括雷达、电子对抗、无线通信、医疗电子、智能交通、无线监测、测量、成像、遥感等等。特别地，在 MMIC 产业化带动下，近年来微波集成电路及相关技术在民用通信应用领域取得了突飞猛进的发展，包括无线广播 (Radio)、寻呼 (Pagers)、移动电话 (Mobile Phone)、视距无线通信 (Line-of-Sight

Communication Links)、卫星通信 (Satellite Communications)、无线局域网 (WLAN, Wireless Local Area Networks)、蓝牙 (Bluetooth)、区域多点传输服务 (LMDS, Local Multipoint Distribution Service)、全球定位导航 (GPS, Global Position System) 等等。

1.3.1 微波集成电路的起源

现代微波集成电路是在早期的微波印制电路基础上发展起来的。随着微波平面传输结构的出现和使用, 20 世纪 60 年代初出现了类似数字、低频印制电路的微波平面电路——微波印制电路 (MPC, Microwave Printed Circuit), 采用微波平面传输线实现各种各样的微波无源电路 (microwave passive circuits) 功能, 如功率分配/合成器 (power distribution/combination)、滤波器 (filter)、耦合器 (coupler)、巴伦 (balun) 以及平面印制天线 (printed antenna) 等。与数字电路和低频印制电路不同, 微波印制电路采用的微波平面传输线是分布参数传输线, 其传播特性通常由 4 个基本参数来表征: 特性阻抗 (characteristic impedance), 相速 (phase velocity) 或有效介电常数 (effective dielectric constant), 衰减常数 (attenuation constant), 功率容量 (power-handling capability)。这些参数由传输线结构 (横截面形状和尺寸)、介质基片特性以及导体材料特性决定。常用的微波平面传输线有: 带状线 (stripline), 微带线 (microstrip)、耦合微带线 (coupled microstrip)、槽线 (slotline)、共面波导 (coplanar waveguide) 和鳍线 (finline) 等。图 1.3-1 为常用微波平面传输线结构示意图。

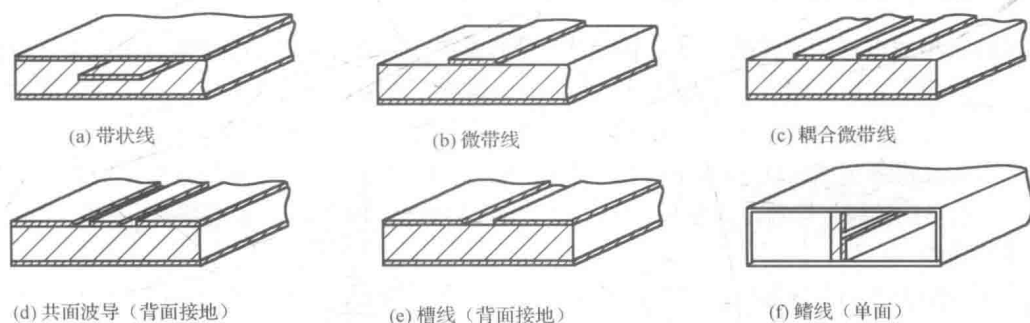


图 1.3-1 常用微波平面传输线

这些平面传输线中, 大多都传播 TEM 波 (Transverse Electromagnetic Wave, 横电磁波)。其中, 就传播特性来说, 传播标准 TEM 波的带状线是最具代表性的, 也是早期微波集成电路研究工作最先开展的一种平面传输线, 当时的研究工作主要针对带状线的特性阻抗、不连续性以及耦合带线等内容展开。根据这些研究成果, 1956 年, R. W. Peters 等人总结出了第一本带状线设计手册 *Hand Book of Tri-Plate Microwave Components*。

由带状线实现的无源电路中, 耦合器是最为常见的一种电路, 通常是利用 TEM 波传输线边缘耦合效应实现定向耦合功能 (TEM-line edge-coupled directional couplers), 属于弱耦合, 耦合度范围一般为 8~40dB。但对于紧耦合需求, 比如 3dB 耦合器, 这类耦合电路由于工艺限制而难以实现。采用三层介质的宽边耦合带状线结构 (broadside coupled striplines) 可实现这种紧耦合功能。对于窄带情况, 可采用分支线耦合器 (branch coupler) 实现。基于带状线滤波器的常用结构有: 高低阻抗低通滤波器 (low-high impedance low pass filter), 端耦合 (end-coupled) /发夹线 (hairpin-line) /平行耦合线 (parallel-coupled lines) /交指 (interdigital) /梳状线 (comblines) 带通滤波器, 等等。基于带状线的微波印制电路是微波集成电路的最初形式, 对其的研究工作为微波集成电路的产生和发展奠定了基础, 其电路原理、分析方法、设计思想, 甚至电路拓扑结构均被后来其他类型的微波集成电路广泛采用, 特别是微波混合集成电路 HMIC 和微波单片集成电路 MMIC 中的微带电路采用。1974 年, H. Howe

系统地总结出了第一本带状线电路设计著作——*Stripline Circuit Design*。图 1.3-2 给出了这类微波集成电路中常用的无源电路结构。

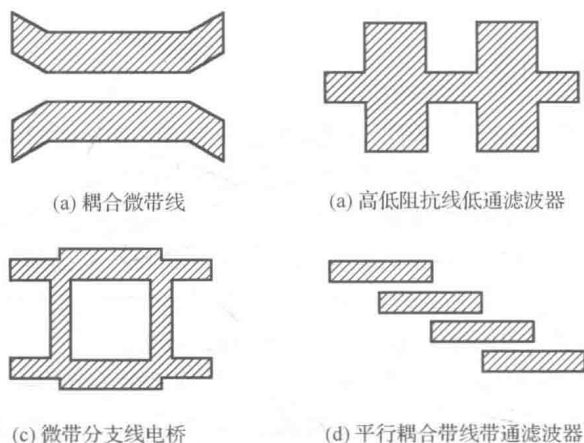


图 1.3-2 微波集成电路中的常用无源电路

1.3.2 微波混合集成电路

微波混合集成电路是现代微波集成电路的主要形式之一。通常来说，微波混合集成电路是指将有源器件、无源分立元件与刻蚀于绝缘介质基板上的电路相互连接，组合成具有完整功能的微波集成电路。有源器件可以是封装式晶体管或无封装管芯，有独立功能的半导体芯片（比如 MMIC）等。无源分立元件多为片式或小型分立元件，如片式电感、电容和电阻等。刻蚀在介质基板上的电路是微波无源电路，它由早期的微波印制电路发展而来，属于分布参数平面电路，可实现滤波、耦合、功率分配、功率合成等功能。

适用于微波混合集成电路的分布参数平面传输线，除了便于实现各种无源电路功能外，更重要的是，它要便于与这些有源器件和无源分立元件相互连接，实现较为完整的电路或系统功能。具有半开放空间结构、传播准 TEM 波的微带线显然更易满足这些要求。微带线的出现是微波混合集成电路产生和发展的重要条件之一。在 20 世纪 60~70 年代，科研人员们对微带线的特性阻抗、相速、色散特性、不连续性、耦合微带线、微带天线以及其他类型的平面传输线做了大量的研究。

在高性能介质基板、高性价比的金属化薄膜工艺和高精度电路光刻等技术的推动下，并随着微波半导体器件技术的发展，特别是 GaAs MESFET 器件的成功研制和应用，使得微波混合集成电路得到迅猛发展，并在 20 世纪 70 年代中期趋于成熟。微波混合集成技术的采用，使得在一个小的封装内几乎可以实现对微波信号处理的所有功能，包括放大器、振荡器、混频器、倍频器、开关、相移器等单一功能电路和发射模块、接收模块等多个功能的电路和子系统。图 1.3-3 是一个 X 波段多功能组件实物照片。

微波混合集成电路的成熟带动了微波技术领域的第一次工业革命，使得微波电路规模化批量化生产成为可能，大批规模化生产厂商应运而生，同时又带动了相关产业的巨大发展和应用，包括半导体材料、半导体器件工艺、计算机自动化仿真设计、微波测试等。

微波混合集成电路采用的是平面集成电路工艺。通常存在两种平面电路工艺：薄膜工艺和厚膜工艺。薄膜工艺由激光溅射和光刻实现，加工精度高，电路性能重复性好。采用薄膜工艺的微波集成电路可用于较高的工作频率（比如毫米波频段），且具有宽频带工作特性。高频率小型化的微波电路多采用这种工艺实现。厚膜电路采用丝网印刷工艺实现，成本低，但加工精度也低，仅适用于较低的微波频率。随着微波小型化技术的发展，20 世纪 90 年代出现了一种新型的微波厚膜电路技术：低温共

烧陶瓷技术 (LTCC, Low-Temperature Cofired Ceramic)。它是一种多层陶瓷印制技术,可高度集成微波无源元件,比如电容、电阻、电感、传输线和直流偏置电路等;并且可形成多种类型的微波传输结构,比如微带线、带状线、共面波导、矩形同轴线等。图 1.3-4 给出了一个毫米波 LTCC 前端组件及典型结构示意图。

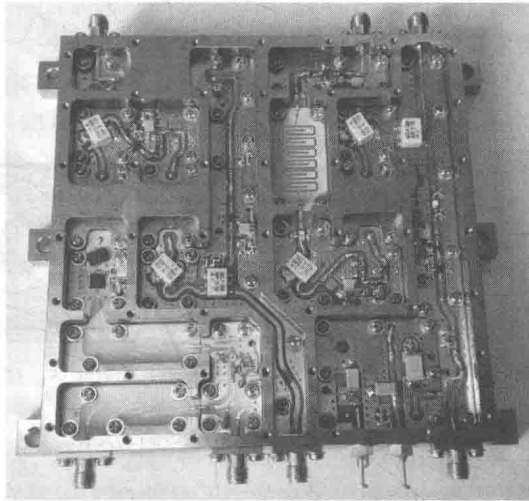


图 1.3-3 X 波段多功能组件实物照片

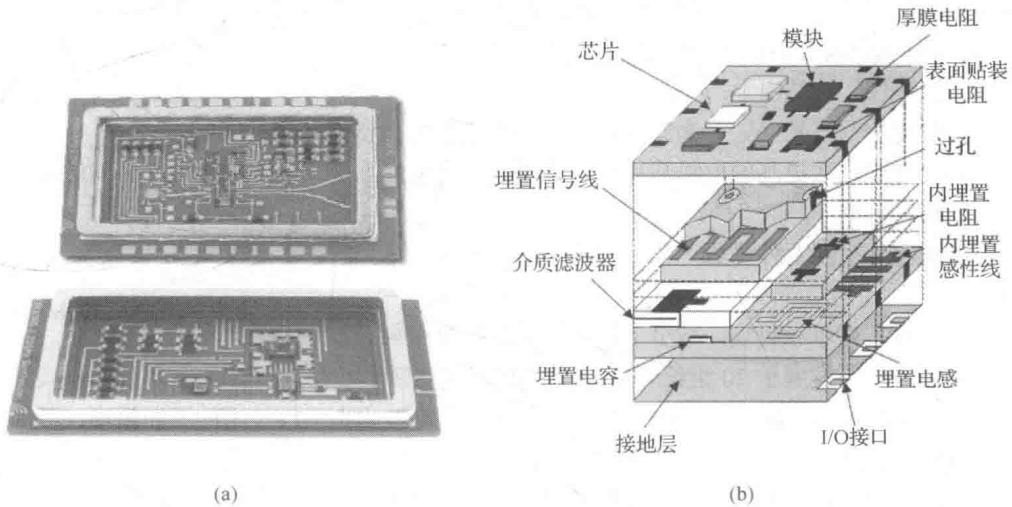


图 1.3-4 (a) 德国 IMST 公司 19GHz LTCC 频综系统 (用于卫星数据链系统); (b) 微波 LTCC 的典型结构示意图

微波混合集成电路的发展趋势是在一个微小的封装内集成更多的元器件,实现更多的电路/系统功能,以满足大规模批量化生产,达到降低系统成本的目的。在较低的微波频率,多采用厚膜集成工艺实现低成本。LTCC 工艺多用于实现高密度集成。在 20 世纪 90 年代后期出现的多层系统封装技术 (SOP, System-On-Package) 则适合于微波高性能系统功能。

1.3.3 微波单片集成电路

微波单片集成电路是指把无源电路、无源元件、有源器件都制作在同一半导体芯片上,形成完整电路或系统功能的微波集成电路。图 1.3-5 给出了一个 MMIC 功率放大器以及 MMIC 典型结构示意图。

微波单片集成电路是在微波混合集成电路基础上发展起来的一种新型集成电路形式,实现了下列目标:

- (1) 通过批量生产以降低成本;
- (2) 更高的可靠性和更好的可再生产性;
- (3) 尺寸更小、重量更轻;
- (4) 电路设计的灵活性和多功能性;
- (5) 更宽的工作频带, 以实现多倍频程。

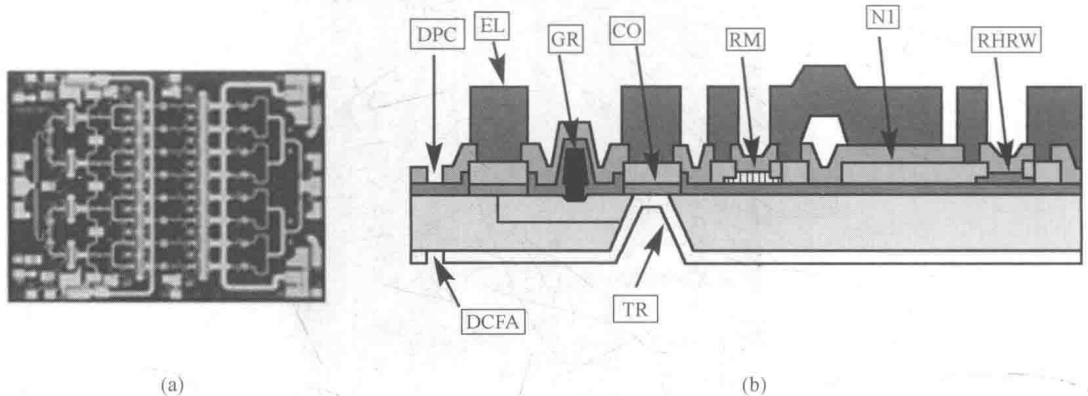


图 1.3-5 (a) 典型 MMIC 功率放大器芯片(Triquint 公司 TGA4516 芯片技术手册); (b) MMIC 典型结构示意图 (UMS PDK 手册)

与数字、低频集成电路一样,前 4 个目标满足了大规模生产、低成本、小型化、多功能的要求,从这方面来说,MMIC 技术是数字、低频集成技术向微波领域的扩展。与微波混合集成电路相比,MMIC 具有宽频带工作特性,这是由于:

- (1) MMIC 电路尺寸更小,分布参数特性不太显著,电路寄生电抗效应小;
- (2) 更薄、介电常数更高的电路基片使得电磁能量更集中于金属条带与接地面之间的半导体材料内,信号传输模式更单一;
- (3) 无源电路和有源器件构成一体,消除了混合集成电路中的很多连接头点(焊点)带来的寄生参量影响;
- (4) 有源器件不再单独封装,减少了管壳等分布参数影响。

微波单片集成电路发展于 20 世纪 60 年代末 70 年代初期,并在 20 世纪 90 年代中期实现成熟应用。20 世纪 60 年代中旬,随着半导体工艺的不断成熟,微波固态器件技术的不断提高,数字计算机技术突飞猛进并在微波 CAD 领域中成功应用,在这一系列技术背景下,为满足军事应用目的,美国等政府资助了相关企业和高等院校展开微波单片集成电路的研究工作。当时,基于 Si 工艺的数字和低频半导体集成技术已经十分成熟,最初的 MMIC 研究计划也是在 Si 工艺上开展的,目标是实现一个机载相控阵雷达 T/R 组件(transmit-recvie module)。但由于半导体 Si 经过高温扩散工艺后(制作有源器件 BJT),绝缘性能下降,基片损耗过大,难以满足微波无源电路对基片损耗的要求,最初的研究计划未能达到预期的效果。不过,该研究计划却得出了重要的结论:微波集成电路和数字、低频集成电路一样,是可以将有源器件、无源电路都集成在同一块半导体芯片上实现的。

后来,基于 III-IV 族化合物 GaAs 半导体的研究工作解决了半导体基片微波损耗高的难题,并成为 MMIC 的主要基板材料。1968 年,出现了第一个基于 GaAs 的 MMIC 二极管电路。同时,微波固态三端器件金属肖特基栅场效应晶体管(MESFET, Metal Schottky-gate Field-Effect Transistors)的出现,突破了 Si BJT 的工作频率限制,为 MMIC 制作各种有源电路奠定了基础。GaAs MESFET 的成功

研制为 MMIC 技术的快速发展奠定了基础。早期对 GaAs MMIC 可行性的成功验证加速了世界各国在此领域的研究投入,包括高质量的 GaAs 材料制备、GaAs MMIC 工艺、GaAs MMIC 设计方法、MMIC 测试技术等,并实现了低噪声放大器、功率放大器、振荡器、混频器、倍频器等单一功能的 GaAs MMIC 电路,甚至包括直接广播卫星接收机(DBSR, Direct Broadcast Satellite Receivers)、高度计(altimeter)等 GaAs MMIC 多功能芯片和子系统。随着 MMIC 技术的发展,电路越来越复杂,功能越来越多,而电路芯片尺寸却越来越小。

就设计方法来说,MMIC 电路设计的复杂程度已经远远超出了仅仅由简单 Smith 圆图可以实现的范围了。并且 MMIC 电路一经设计投版加工后,就不能像 HMIC 那样还能进行后期调试工作。MMIC 电路的调试是在设计过程中利用计算机辅助设计(CAD, Computer-Aided Design)软件完成的。更重要的是,这些 MMIC CAD 软件应包括各种元器件模型库,并能实现模型更新,电路原理图仿真和优化,二维半、三维空间电磁场仿真和优化,以及热仿真等功能。可以说,没有微波 CAD 软件,就没有 MMIC 的快速发展,也就没有目前 MMIC 产业化的出现。

MMIC 的迅猛发展很大程度上归功于美国国防部(DOD, Department of Defense)自 20 世纪 60 年代以来在此领域的一系列巨额资助。DOD 认识到要实现 MMIC 在研究和生产领域达到一定经济规模并形成成熟产业,必须开展与数字大规模集成电路一样的宏伟发展规划,集中精力解决基板材料、器件技术和生产工艺难题,突破设计方法和 CAD 软件等方面的限制,而所有这些都超出了单个企业或公司的承受能力。在 1986 年, DOD 启动了微波毫米波集成电路研究计划(MIMIC, Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuit program),并主导了 MMIC 进入黄金十年的发展期。该研究计划将系统应用、MMIC 工艺、微波 CAD 软件公司以及半导体器件物理特性和模型研究实验室组织在一起,目的是制造出价格合适的微波毫米波单片集成电路,形成完整的 MMIC 产业,以满足大量的军用微波电子需求。参与的公司有 Hughes、GE、ITT、Martin、Raytheon、TRW 等。解决了如下问题:

- (1) 实验室研究成果进一步向工程应用转化;
- (2) 创办了足够多的半导体晶片生产厂家;
- (3) CAD 模型和相应软件有实质性的提高;
- (4) 设计过程与生产过程标准化;
- (5) 芯片设计满足军事应用要求;
- (6) MMIC 可靠性保证;
- (7) 自动化测试;
- (8) 推广产品应用,以达到 MMIC 的高产量和低成本。

经过数十年的努力,MMIC 由实验验证阶段发展到了高产量、低成本、自动化生产的 MMIC 产业化成熟阶段,并将进一步向前发展。MMIC 已成为微波工业的主要组成部分,凸显了低成本、小尺寸、轻重量、更高工作频率和更宽工作频带等优势,并逐步成为了 HMIC 的强有力的替代者。在基片材料方面根据不同需求,引入了 Si、InP、GaN、SiC、SiGe 等;在有源器件方面出现了 HEMT (High Electron-Mobility Transistors, 高电子迁移率晶体管)、pHEMT (Pseudomorphic High Electron-Mobility Transistor, 赝晶高电子迁移率晶体管)、HBT (Heterojunction Bipolar Transistor, 异质结双极晶体管)、MOSFET 等;在 CAD 设计手段方面,出现了一系列功能完备的商业化 MMIC CAD 仿真设计软件: Agilent ADS、Ansoft HFSS、Cadence、MSIM 等。MMIC 性能更可靠,并逐步向多功能,甚至完整的系统功能(SOC, System-on-Chip)方向发展。同时,MMIC 应用领域也从智能武器、电子对抗、雷达和通信等军事领域向商业应用领域扩展,包括个人通信、DBS 系统、星际通信、智能交通系统等。

近来,基于第三代半导体——宽禁带半导体材料的 GaN、SiC 微电子器件正成为当前引领微波毫米波固态功率器件发展的牵头动力。由于宽禁带半导体材料的独特性能和 AlGaN/GaN 异质结综合性

能的优势,使得继 GaAs 之后,固态微波功率器件的发展达到一个新高度。目前 GaN HEMT 工作频率已覆盖 110GHz 以下频率,并展现出向 THz 固态功率器件扩展的发展趋势。宽禁带半导体 AlGaIn/GaN 异质结具有相对低的本征载流子产生率、高的击穿场强 ($\geq 3\text{MV/cm}$)、高的二维电子气浓度 ($1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)、高的电子饱和速度 ($> 2 \times 10^7 \text{cm/s}$);同时,AlGaIn/GaN 异质结生长于宽禁带半导体 SiC 衬底上,其良好的导热性能(热导率 $3.3\text{W/cm}\cdot\text{K}$)有利于器件高功率工作。在相同工作频率下,GaN HEMT 功率/密度比 Si 和 GaAs 微波器件要高出 10 倍。另外,AlGaIn/GaN 异质结具有高温工作的特点,在高达 600°C 下工作后回到常温时,仍能保持其基本性能;宽禁带半导体材料原子间的键合力强,具有良好的抗辐照性能。基于以上优势,使得 GaN 功率器件展现出了良好的高功率、高效率特性和环境适应性;同时针对 GaN 器件特有的电流崩塌和高频稳定性等可靠性问题的研究也均获得较大进展。近来,针对微波毫米波 GaN 功率器件在高效率、宽频带、高功率、MMIC 和先进热管理等方面均有长足的进步,国外 Cree、Triquint、HRL、Gotmic 等公司在 Ka 频段已推出了 10W 以上的功率单片,国内中电集团相应的研究所也推出了相应的商用产品。

习 题

1. 集成电路按制作工艺的不同可以分为哪几类?各自的特点是什么?
2. 比较立体波导电路、微波混合集成电路和微波单片集成电路的优缺点。

参 考 文 献

- [1] Edward C. Niehenke, Robert A. Pucel, and Inder J. Bahl, "Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. MTT-50, pp.846-857, March 2002.
- [2] 清华大学微带电路编写组. 微带电路. 人民邮电出版社, 1975.
- [3] 吴万春. 集成固体微波电路. 国防工业出版社, 1981.
- [4] 赵正平. 发展中的 GaN 微电子. 中国电子科学研究院学报, 第三期, 2016.