

权威力作，经典再续

这是一部微带电路设计领域的传奇，数十载的行业影响力，数十万
电子工程师的必备读物，射频行业专家极力推荐

清华

开发者书库



Microstrip Circuit

微带电路

清华大学《微带电路》编写组◎编著

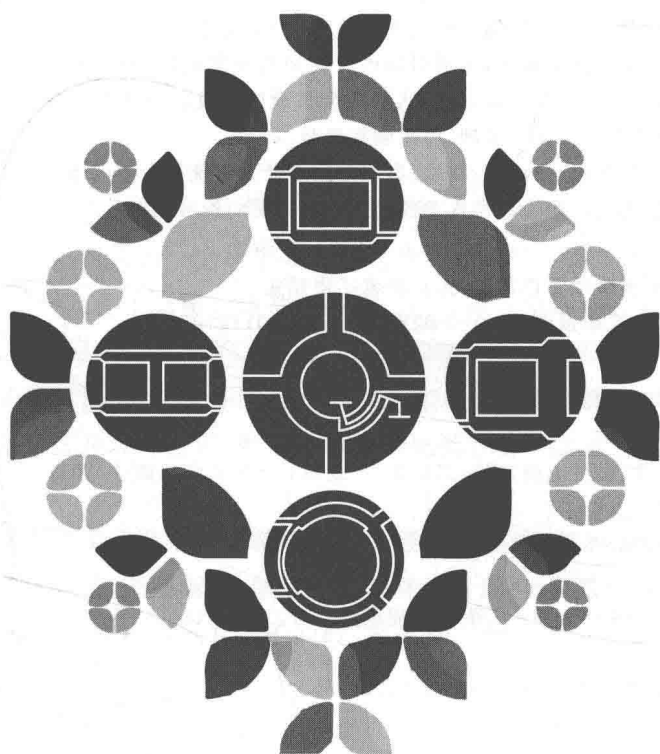
Microstrip Circuit Compilation Group of Tsinghua University

清华大学出版社



清华

开发者书库



Microstrip Circuit

微带电路

清华大学《微带电路》编写组◎编著

Microstrip Circuit Compilation Group of Tsinghua University

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书叙述和分析了微波集成电路系统的无源和有源部分,对电路的核心载体——微带线进行深入细致的分析,涉及微带线的特性、物理机理和参量计算,在此基础上叙述了由微带线构成的单元电路、无源微波集成电路元件、有关的微波半导体器件机理、有源微波集成电路元件乃至电路系统,给出微波集成电路分析设计方法及设计计算实例,介绍其实际应用以及电路实际结构。

本书反映了微波集成电路的概貌,全书引导读者从最基本的电磁场和网络概念出发,由浅入深,逐步深入理解电路机理,掌握分析计算方法,最后达到融会贯通的程度。对微波集成电路知其然,也知其所以然,为从事这一领域的研发工作奠定基础、启迪创新思路。

本书适合作为高等学校电子科学与技术、集成电路设计与系统等专业的本科生与研究生参考教材,也可作为从事微波、天线、集成电路设计等行业的工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

微带电路/清华大学《微带电路》编写组编著. —北京:清华大学出版社,2017
(清华开发者书库)
ISBN 978-7-302-46533-1

I. ①微… II. ①清… III. ①微波集成电路 IV. ①TN454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 030363 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:33.75

字 数:821 千字

版 次:2017 年 5 月第 1 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:79.00 元

产品编号:069557-01

推荐序

FOREWORD

随着高速宽带通信技术的发展,电子设备的频率和速率将会越来越高。电路设计需要应用更多的微带电路理论与知识——从集总参数过渡到分布参数。电子线路的主要载体是电路板,电路板设计离不开微带电路。微带电路是一门实践性很强的技术,虽然目前高校并没有专门开设这门课程,但是它是电子工程设计必备的技术;甚至可以说,如果工程师不具备一定的微带电路基础知识,就没有办法设计出性能优良的射频电路及产品。为了满足当下射频和高速电路电子线路设计需要,系统学习微带电路设计的原理与测量方法已经变得很有必要。

《微带电路》这本书是学习微带电路基础理论的经典教科书,该书系统论述了微带线基础、微波网络基础、耦合线、微带混频器、微带放大器等设计理论,并提供了丰富的工程实例。理论结合实例,可让读者在学习基础知识的同时,直接联系到实际产品的设计与应用,满足读者工程实践的需要。

《微带电路》也是我国第一部比较系统和全面介绍微带电路设计的专著,1976年第1版至今,已经40年整,这本书为一次又一次的电子系统工程师奠定了微带电路设计的基础,广受高校师生和射频工程师的推崇。在射频微带电路设计领域具有很高的价值,影响深远。第1版的《微带电路》纸质版现在只有少部分图书馆珍藏,成千上万的普通读者只能将该书电子文档打印出来,自行装订成册阅读。这本书像良师益友一样伴随每个射频电路工程师的成长,每翻一遍,都有受益。随着科技的进步,当今的微带电路工艺和技术进步已经翻天覆地,但微带电路的基础理论是不变的,现在射频微波、高频高速电路的广泛运用,使得掌握微带原理及技术正在成为新产品研发成败的关键因素之一。

本人从事射频电路设计十余年,致力于PCB微带电路设计与应用,在射频PCB电磁场仿真和实际一致性、微带阻抗控制、铜皮表面粗糙和表面工艺对微带损耗影响、介电常数频率相关性、玻纤效应、无源互调等方面积累了丰富的经验。基于这方面的沉淀,几乎每天都收到全国各地的电子工程师关于微带电路设计方面的咨询。在和同行交流的过程中,本人深感微带电路设计知识与资料的匮乏,于是想到再版《微带电路》一书,可以让更多人更方便系统地学习微带电路设计原理。这个想法得到清华大学出版社盛东亮编辑的积极响应,他联系到此书原作者清华大学微带编写组,已经年登八十的该书主编李征帆教授欣然答应再版,并为本书增加了再版前言和微波集成技术发展概述,修改了原书中的一些错误之处。能促成此事,本人也非常高兴,本书的再版将会让更多人接触到这部经典。最后,本人对李征

帆教授带领的编写组一丝不苟的勘误精神、严谨的学术作风表示非常钦佩,年轻一代应该向他们致敬,感谢他们的辛勤付出!

徐兴福

兴森快捷射频实验室主任

2017年1月于深圳

前言

PREFACE

20 世纪的 60~70 年代,国际上以信息技术为核心的科技革命悄然来临,微波集成电路即是其中之一,它的出现促进了电子设备的小型化、轻量化,提高了系统的性能和可靠性。尽管当时处于非常年代,我国科技人员还是觉察到这一新技术的重要性。国内有相当一部分高校、科研机构和企业投入这一新领域的研究,清华大学也位列其中。

1972 年,本人作为清华大学教师,带领两位新教师和几位学生到成都亚光电子厂开展实践教学,在微波集成领域进行校企合作,结合厂方对多种微波集成电路产品的研制进行新技术攻关。在此过程中,我们向厂方技术人员和工人学到不少有关微波集成技术新的知识,通过实际工作弥补了实践经验的不足。同时大家也深感理论和实践结合的重要,在实际研制产品时,迫切希望有系统性的理论指导。为此,本人从产品研制中提出的问题出发,对微波集成技术的机理和规律,进行系统性的整理和提炼,结合当时所研制的产品和搜集到的国外文献,在厂内开出技术讲座,并将讲稿整理成《微带电路》讲义,颇受欢迎。随后和校内的研究工作结合起来,在讲义的基础上扩展内容,整理成书出版。除本人外,杨弃疾、高葆新、张雪霞、秦士和李永和老师也参加了编写工作。书籍以“清华大学微带电路编写组”署名。

本书全面反映了当时微波集成技术的概貌,并结合相当多的实例叙述了各种具体的微波集成无源和有源电路。但我们认为不能使读者只停留于对这门技术的表面肤浅认识,而应更深入理解这一领域的内在规律,因此涉及微波集成的基本物理机理、理论分析方法乃至必要的数学推导绝不可缺。为此本书从内容安排上注意从浅入深、理论上不故弄玄虚、便于读者入门;同时对必要的较有深度的理论分析和具有一定难度的数学分析方法并不避讳。我们认为从对读者真正负责的角度出发,这样的安排是合理的。

处于那个年代,国内外科技交流甚少。我们尽最大努力,从可能的渠道吸取了不少国外先进知识,引用了许多国外文献,尤其是从 20 世纪 60 年代中期至 70 年代初期《IEEE Transactions, on MTT》的许多论文和数据。当年成书时未列出参考文献,目前再版时因年代久远,难以追忆,仍然空缺,特此说明。

当年,沈肇熙编辑以敏锐的目光,多方捕捉科技作品素材。他主动上门约稿,不顾年迈,几次来到位于山区的清华绵阳分校,和我们共同商讨《微带电路》的全书安排及许多出版细节。没有他的鼓励和推动,本书难以最终出版。在本书再版之际,特向这位敬业的老编辑致以深切的敬意并表达怀念之情。

本书出版以来,承蒙诸多读者的厚爱,使本书在微波集成技术的发展中起了小小的作用。岁月流逝,几十年科技的飞跃发展,本书某些内容已显陈旧,所述微波集成电路的结构和实际电路在许多方面已被发展或更新,计算机辅助设计也代替了原来常规的电路设计方

法,但微波集成理论和技术的许多基本面仍然在书中得以保持,也许这是时至今日尚有部分读者仍在阅读本书的原因。这次应读者要求再版,如做较大的变动恐将使本书变得面目全非,因此除校正部分错字外,不对全书内容再作改动,留作微波集成技术发展史的一个历史记录。为提供读者对迄今为止微波集成技术发展全貌有一概括性的认识,在再版中列入“微波集成技术发展概述”以供参考,至于对本领域最新知识的详细了解,则完全可由当前的许多科技书籍和文献资料得到满足。

数十年岁月,弹指一挥间,世事沧桑,现在作者们有的已故去,有的进入了其他单位。我们生者都已步入老年,已经和业务工作脱离,希望本书由清华大学出版社再版后能为国家科技事业奉献一份余热。

非常感谢深圳兴森快捷射频实验室徐兴福主任对本书再版的积极推动和热情推荐,也感谢清华大学出版社盛东亮编辑和他的同事为本书再版所付出的辛勤劳动,他们对本书的支持和贡献令人永志难忘。

李征帆

2017年1月

编写说明

The Author's Words

微带线和微波固体器件结合起来构成的混合型微波集成电路简称为微带电路,它通常用于分米波段至毫米波段的频率范围。由于微波固体器件和微带线本身的限制,一般只应用于瓦量级以下的中小功率。目前除了做成混频器、倍频器、移相器、调制器、放大器、振荡器、电控开关等单元电路以外,尚可做成微波信号源、微波集成接收机、相控阵雷达单元等微带组件。

微带线作为传输线和电路元件,其在微波电路中的作用,与波导、同轴线等传输线没有本质上的区别,因此基本电路原理有些是相同的。但是,由于微带线有它结构上的特点,使微带电路元件在类型、设计计算等方面又不同于其他微波传输线所构成的元件。这就要求微带电路工作者既要理解一般微波电路的工作原理,又能掌握一些微带电路专门的分析与设计计算方法。为使本书内容不致过分庞大,在编写时主要着重于后面部分的内容,但为了便于较多的读者自学及参考,一般均采用深入浅出的讨论方式,只要读者对分布参数电路及电磁场的物理概念有些基础知识,绝大部分内容阅读起来并不困难。另一方面,由于微带电路的分析、设计计算广泛应用微波网络的方法,为了突出重点,书中不仅有专门一章对此进行详细讨论,并在其他章节中用到网络方法时,也都加了必要的说明。

实用的有源微带电路都是微带线和微波固体器件相结合所构成的。为了方便微带电路的设计与计算,在讨论有源电路的每一章中,均首先以一定的篇幅介绍了各种有关的微波固体器件的特性和相应的物理机理。在讲法上也以通俗易懂、切合需要为主。只要读者具有半导体器件的基本知识,阅读起来也并不困难。

微带电路是最近几年才发展起来的一门新技术,目前还处在继续探索与研究的阶段。对若干问题我们只能与读者共同探讨。尤其是有源部分,还需通过实践、认识、再实践等多次反复过程,方能使内容更加正确。对此,编写时均已分别具体指出。我们这样做,是希望有更多的人和我们一起来解决这些存在的问题,加快微带电路技术前进的步伐。

我们把难度较大、数学推导多的材料都集中在最后,自成一章,以供参考。

本书内容基本上分为两部分:第一部分为无源微带电路,包括均匀微带线、耦合微带线、微带不均匀性等基本知识,以及滤波器、变阻器、电桥、定向耦合器和功率分配器等常用无源元件的原理和设计计算方法,均有实例说明;第二部分为有源微带电路,包括混频器、倍频器、参量放大器、微波晶体管放大器、固体控制电路等常用组件的原理和设计计算,也各附有说明实例。此外,还有“微带元件的构成”和“微带线和微带电路的测量”两章,分别介绍了这两方面的一些实用知识。对微带电路的工艺问题,本书未做详细介绍。

目录

CONTENTS

推荐序	I
前言	III
编写说明	V
第 0 章 绪论——微波集成技术发展概述	1
第 1 章 微带线基础	5
1.1 微带线的发展及其应用	5
1.2 微带线的构成	8
1.3 微带线的特性阻抗和相速	10
1.4 微带线的损耗	20
1.4.1 介质损耗	21
1.4.2 导体损耗	23
1.5 微带线的色散特性	28
1.5.1 波导波型	29
1.5.2 表面波型	30
1.6 其他形式的几种微带线	32
1.7 小结	33
第 2 章 微波网络基础	35
2.1 概述	35
2.2 矩阵的基本运算规则	37
2.3 微波网络的各种矩阵形式	40
2.3.1 阻抗矩阵	40
2.3.2 导纳矩阵	42
2.3.3 A 矩阵(A 、 B 、 C 、 D 矩阵)	43
2.3.4 散射矩阵(S 矩阵)	44
2.4 基本电路单元的矩阵参量	49
2.5 参考面的问题	51
2.6 变压器网络(正切网络)	52
2.7 二口网络的工作特性参量	56
2.8 信号源失配的影响	59
2.9 无损三口网络的特性	62
2.10 魔 T 的特性及其应用	63

2.11	电桥、定向耦合器的特性和应用	68
2.12	小结	72
	附录 A 无损网络 S 参量特性的证明	72
第 3 章	耦合微带线	75
3.1	概述	75
3.2	均匀介质耦合微带线奇偶模激励下的微分方程	77
3.3	非均匀介质的耦合微带线	80
3.4	耦合微带线的奇偶模参量	82
3.5	耦合微带线单元的网络参量和等效电路	87
3.6	小结	95
第 4 章	微带线的不均匀性	96
4.1	概述	96
4.2	微带线截断端的等效电路	97
4.3	微带线间隙的等效电路	99
4.4	微带线的尺寸跳变	101
4.5	微带线直角折弯	103
4.6	微带线 T 接头	104
第 5 章	微带滤波器和变阻器	108
5.1	微带滤波器概述	108
5.2	集总参数低通原型滤波器	112
5.2.1	按最大平坦度特性设计	113
5.2.2	按切比雪夫特性设计	117
5.3	微带半集总参数低通滤波器	122
5.4	滤波器之间的变换关系(相对带宽较窄情况)	130
5.5	滤波器中的倒置转换器	135
5.6	按低通原型设计的窄带宽带通滤波器	140
5.7	带阻滤波器	146
5.7.1	频带较窄时的近似设计	146
5.7.2	带阻滤波器的严格设计	151
5.8	元件损耗的影响	155
5.9	微带变阻器概述	156
5.10	指数渐变线	157
5.11	四分之一波长多节变阻器	160
5.12	变阻滤波器	167
5.13	短节变阻器	175
5.14	小结	183
第 6 章	微带线电桥、定向耦合器和分功率器	185
6.1	概述	185
6.2	耦合线定向耦合器	186
6.2.1	基本原理	186
6.2.2	奇、偶模的分析和计算公式	188
6.2.3	微带耦合线定向耦合器的具体问题	192

6.3	分支线电桥和定向耦合器	194
6.3.1	对称分支线定向耦合器及其中心频率设计公式	194
6.3.2	对称分支线定向耦合器的频带特性及考虑频带宽度情况下的设计方法	202
6.3.3	“结电抗”效应的影响及其修正	207
6.3.4	不对称的分支电桥和定向耦合器	212
6.4	环形电桥和定向耦合器	217
6.4.1	一般形式	217
6.4.2	宽频带环形电桥	224
6.5	分功率器(功率分配器)	227
6.5.1	二等分分功率器	228
6.5.2	不等分的二分支分功率器	230
6.5.3	宽频带等分分功率器	233
6.5.4	宽频带不等分分功率器	240
6.6	小结	245
第7章	微带电路元件的构成	247
7.1	微带电路的结构及其重要性	247
7.2	屏蔽盒	247
7.3	同轴—微带转换接头	250
7.4	波导—微带转换接头	254
7.5	微带电路中固体器件的安装	258
7.5.1	管壳固定在接地板(热沉)上	258
7.5.2	梁式引线二极管	259
7.5.3	管芯直接焊接法	260
7.5.4	陶瓷片封装法	260
7.6	偏压电路和隔直流方法	261
第8章	微带固体控制电路	264
8.1	概述	264
8.2	PIN管	265
8.2.1	基本原理	265
8.2.2	PIN管的等效电路	268
8.2.3	PIN管的参数	269
8.3	微带线开关	272
8.3.1	单刀单掷开关(微波调制器)	273
8.3.2	单刀双掷开关(微波换接器)	278
8.4	微带限幅器和可变衰减器	282
8.5	微带二极管数字移相器	285
8.5.1	概述	285
8.5.2	开关线移相器	287
8.5.3	负载线移相器	288
8.5.4	混合型移相器	291
8.5.5	高通—低通型移相器	297

8.6 小结	298
第9章 微带混频器	300
9.1 概述	300
9.2 表面势垒二极管	300
9.2.1 基本原理	300
9.2.2 等效电路及参量	304
9.2.3 表面势垒二极管的结构	305
9.3 表面势垒二极管的噪声温度比和混频电导	305
9.3.1 二极管的噪声温度比	306
9.3.2 混频电导	306
9.4 二极管混频器	308
9.4.1 基本原理	308
9.4.2 二极管微带混频器	311
9.4.3 镜像回收和镜像抑制	317
9.5 微带混频器的设计和调试	320
9.5.1 方案考虑	320
9.5.2 混频器微带电路的设计	321
9.5.3 混频器电指标的估算	323
9.5.4 混频器的性能及其测试	324
第10章 微带倍频器	328
10.1 概述	328
10.2 变容管的基本特性	329
10.3 变容管低次倍频器	332
10.3.1 基本原理	332
10.3.2 设计表格	333
10.4 微带变容管倍频器设计实例	338
10.5 阶跃恢复二极管的基本特性	345
10.6 阶跃管倍频器的工作过程及设计方法	349
10.6.1 阶跃管脉冲发生器	349
10.6.2 谐振电路	354
10.6.3 输出带通滤波器	356
10.6.4 偏压电路	357
10.6.5 倍频效率	358
10.7 微带阶跃管倍频器的设计实例及调测	359
10.7.1 400~2000MHz 五倍频器	360
10.7.2 1000~5000MHz 五倍频器	364
10.8 小结	366
第11章 微带参量放大器	367
11.1 概述	367
11.2 参量放大器的基本原理	367
11.2.1 非线性电抗中的能量关系	367
11.2.2 参放变容二极管	370

11.2.3	非简并参放的等效电路	372
11.2.4	参量放大器的增益	375
11.2.5	参量放大器的通频带	375
11.2.6	参放噪声系数	376
11.3	微带单回路参放设计	379
11.3.1	基本设计原则	379
11.3.2	微带参放电路设计	379
11.4	微带宽频带参量放大器	384
11.4.1	展宽频带的物理概念	384
11.4.2	宽频带参放电路原理	386
11.4.3	宽频带参放设计	389
第 12 章	微波晶体管放大器	395
12.1	概述	395
12.2	微波晶体管小信号等效电路	397
12.3	噪声系数	402
12.4	S 参量分析	410
12.4.1	定义和物理意义	410
12.4.2	晶体管放大器的增益	414
12.4.3	晶体管放大器的稳定性	419
12.5	小信号微波放大器的设计	427
12.5.1	单向化设计	427
12.5.2	绝对稳定情形下的设计	430
12.5.3	潜在不稳定情形下的设计	432
12.6	小结	434
附录 A	微波晶体管小信号等效电路的解	435
附录 B	S 参量与 y 、 h 、 z 参量转换公式	437
第 13 章	微带参量及微带电路的测量	438
13.1	微带系统测量的特点	438
13.2	微带线的相速和特性阻抗的测量	439
13.3	微带线的损耗和微带电路 S 参量的测量	442
13.4	微带转换接头插入驻波比的测量	447
13.5	微带系统阻抗的测量	450
13.6	微带系统的相位测量问题	453
13.7	微带不均匀性的测量	457
13.7.1	微带终端效应的测量	457
13.7.2	微带弯曲参量的测量	458
13.7.3	微带线结效应的测量	460
第 14 章	分析微带参量的一些数学方法	461
14.1	概述	461
14.2	横电磁波(TEM 波)的横向分布	461
14.3	用保角变换法求分布电容的一般原理	463
14.4	无厚度空气微带线特性阻抗略解	468

14.5	多角形变换	472
14.6	无厚度空气微带线特性阻抗 Z_0^a 的严格解	478
14.7	无厚度空气微带线特性阻抗的近似变换解法	483
14.8	有效介电常数	489
14.9	耦合微带线特性阻抗的保角变换解法	492
14.10	格林公式和部分镜像法	499
14.11	用格林公式求微带线分布电容	503
14.12	方块导体片的电容	506
14.13	微带线截断端的等效电容	509
14.14	微带线间隙的等效电容	512
14.15	用格林公式求耦合微带线特性阻抗	513
附录	雅可比椭圆函数简述	517

绪论

——微波集成技术发展概述

20 世纪 50 年代以来,电子设备(包括通信、雷达、导航、遥控遥测等)多数已工作于微波波段,缩减系统的伸展尺寸和复杂度是主要原因之一。但即使如此,设备的体积重量仍是一个严峻问题,尤其对于军事电子设备,更需要机动灵活性,对设备的小型化和轻量化提出很苛刻的要求。在电子设备中,电子管和电阻、电容、电感等元件本身的尺寸已经不小,它所构成的系统当然更大。而对于高频部分,通常包括发射、接收、微波传输线及滤波器、天线等无源元件,尤其发射中用于振荡的磁控管、接收中用于高放的行波管和用于本振的速调管,连同产生强磁场的设备和电源都具有较大的体积重量,而且由金属波导和同轴线所构成的电路同样颇具体积和重量。以上种种因素,对电子设备的小型化和轻量化构成极大的限制。

从 20 世纪 50 年代后期至 60 年代,一场巨大的革命来临。半导体器件投入应用,尺寸紧凑、耗电量低使其构成的系统在小型化和轻量化方面迈进一步。继而很快地又由分立元件晶体管电路迈向集成电路,更走出实质性一步。

当时科技和工艺水平还比较低,使得器件工作频率受限,半导体器件和集成电路只能作为一般低频和数字电路应用。以微波频率工作的系统高频部分,小型化和轻量化仍然未能解决。

从 20 世纪 60 年代后期起,微波集成技术开始兴起,当时具备了两个条件:其一是各种微波固体器件出现,包括有微波晶体管、肖特基势垒二极管、变容管、PIN 管、阶跃恢复二极管、体效应管、雪崩管等。它们具有一般半导体器件同样紧凑的尺寸,却能工作于微波波段,同时又具有各种不同功能,适应高频系统各部分对有源器件的要求。其二是作为微波传输和电路且适合于微波集成结构的微带线确立了主体地位,其紧凑的印刷形式结构便于集成,工艺条件也已完满具备,而其特性参数的精确计算已在 20 世纪 60 年代得到基本解决。二者的结合构成了多种类型的微波集成电路,使体积重量较原高频系统有明显减少。

在微波集成技术发展初期,以微波固体分立元件和微带线在介质基片上构成微波混合集成电路为主,传输线的形式除标准微带线外,特殊情况下也可采用缝隙波导和共面波导,仍然可构成混合微波集成电路。至于电路元件,则可采用分布参数和集中参数两种形式,其中前者较后者具有较高的品质因数,但布图面积较大。和一般数字和模拟集成电路类似,也可以制作单片微波集成电路(MMIC),可将器件和电路集成于同一芯片上,其集成度显然优于微波混合集成电路。但由于芯片尺寸的限制,单片集成电路的无源部分一般由集中参数元件构成,较低的无源元件品质影响整体电路性能,况且在当时只有少数类型微波固体器件,如工作频率不很高的微波晶体管可在芯片上和其他部分集成,限制了微波单

片集成电路的应用范围,因此在当时实际应用中以微波混合集成电路为主。

到了 20 世纪 70 年代后期,一种极为优异的微波固体器件——砷化镓场效应管出现,其优异的微波特性,即其频率可高至毫米波段,并能和其他部分集成于砷化镓芯片上,由于砷化镓介质衬底具有较小损耗,使芯片上无源元件品质得以改进。更主要的是对场效应管可开发其多种功能,因此多功能的单片微波集成电路,如低噪声放大器、功率放大器、振荡器、混频器、倍频器、开关、移相器及它们的组合,均能在同一芯片上得以集成。其不足之处在于高 Q 值、低寄生参数的高品质无源元件仍难以在芯片上实现,某些方面的电路如滤波器等仍需借助于混合集成电路实现。

从 20 世纪 90 年代起,由于深亚微米技术的发展,硅基片上的 MOS 器件工作频率迅速提高,甚至直达毫米波段。从高性价比角度考虑,此时价格低廉、工艺成熟的硅微波单片集成电路再次得到发展。除有源器件部分外,着重改善相配合的无源元件性能,重点是片上电感,通过改进衬底、更新结构、采取新的绕线方式等措施提高电感元件的 Q 值和截止频率,最终使整体电路性能有所提高,使得电路性能和类似砷化镓微波单片集成电路相接近,而成本大幅度降低,得到较广泛应用。

在单片微波集成电路发展的同时,混合集成电路仍然在发展中,其集成度虽逊于单片,但由于其无源电路元件的布图面积受限较少,常可选择分布参数元件,因此其电路性能非单片可比,例如微波集成滤波器这一重要电路部件基本上都实现于混合电路。混合微波集成电路的多年发展中也不乏创新,例如介质腔的引入和缺陷接地结构的应用都颇具创意。前者采用高介电常数低损耗的小型介质体和微带线结构相贴近,由此可得到高稳定度的振荡器和高选择性低损耗的滤波器。而缺陷接地结构则是通过接地导体板上挖出各种图形的窗口而开发出各种较高性能的微波电路。上述两种创意都取得很好效果,但有时某些创意未必能取得预想效果。例如一段时间较为热门的集成介质波导,将条状介质敷于导体板上构成毫米波介质波导集成电路,其本意在于发挥介质波导低损耗的优势,但除了当时出现的部分电路样品外,后续追随者甚少,显然是某些因素限制其实际应用。但无论成功与失败,探索是第一位的,没有探索和创新,科技事业根本不可能得到发展。

混合微波集成电路的无源元件通常为分布参数电路构成,它比集中参数元件具有更低的损耗和更小的寄生参量,但具有较大的布图面积。当系统由许多分布参数元件组成时,过大的版图面积将影响系统的小型化。因此在 20 世纪 80 年代出现三维或立体微波集成电路,即采取多层介质和导体层结构,将各个无源元件分置于各导体层面,沿厚度方向籍通孔(Via)实现层间连接。某些场合甚至可将一个元件分置于多个导体层,再将各部分组合成整个元件。例如平衡-不平衡转换器(Balun)及电桥均已有多层组合实例。由于三维微波集成电路将二维的平面布图尺寸转移到第三维的厚度,通常厚度尺寸均较小(每一介质层厚度仅为 0.1mm 量级,10 层以上布线层的厚度仅为几毫米),而平面版图面积则有效减少,对小型化非常有利。三维微波集成电路在应用多层陶瓷烧结(LTCC)的结构美观时,取得很好的效果。

20 世纪 90 年代后期开始,微波集成电路还出现了一些新的技术研究和应用方向。例如微机械系统(MEMS),试图用半导体微机械开关减小半导体开关的损耗,也容易和微带线结合,但是寿命和速度较差仍是难题。另一个重要发展是超导技术与微带电路结合,有效地解决了一般微带滤波器的损耗较高、滤波特性不够理想的难题。用高介电常数基片

(LaAlO_3 , MgO , Al_2O_3) 的高温超导微带滤波器置于 78K 的微型制冷盒中, 可以获得的通带陡峭度几乎是矩形特性、带外衰减超过 70dB, 带内损耗 0.1dB 量级。用于移动通信可以极大地减少相邻频道互扰, 增加通信频道数量, 缓解频谱资源的匮乏。可见跨学科的发展是值得重视的方向。还值得一提的是, 随着微带天线技术的发展, 微波集成的电路向天线扩展的趋势, 逐步实现内部功能电路和辐射部分集成的一体化, 进一步推动了系统的小型化和紧凑化, 目前在移动通信设备中已取得很好的成效。

整个集成电路技术日新月异的发展有力地推动了提高集成度的进一步要求。以致 20 世纪 90 年代推出了系统芯片(System on Chip, SoC), 允许将整个电子系统的各个部分整体性的集成于一块芯片内, 集成度达到空前。这种高集成度是受到以深亚微米技术为核心的整体先进半导体工艺所支撑的。理论上由于微波单片集成已可在硅片上实现, 将微波集成部分嵌入系统芯片内应无问题, 这样就实现了包括数字和微波整个大系统的集成, 这当然是理想状况。但对同一硅基片, 微波电路和数字电路的半导体器件材料和结构参数有所差别, 工艺处理也有所不同, 况且微波部分也包括版图面积相当大的无源元件, 将微波和数字部分组合成一体将引起工艺难度增加、电路质量降低和成品率下降, 未必得到预期效果。

进入新的世纪后, 一项新的技术试图解决上述问题, 即系统封装(System in Package, SiP), 它在三维微波集成电路及多芯片组件(MCM)基础上产生, 即同样采用多层布线结构。在其最上层, 放置多块微波单片集成芯片和数字电路芯片, 构成整体电子系统。其中某些层可布置一些集中和分布参数无源微波元件, 由于此类元件和芯片上元件相比较, 其尺度可允许较大, 因此可保证其较优的电路性能。另一些层提供数字电路芯片间的互连线网, 底层一般作为馈电网, 层间籍通孔连接。由于当前数字信号已高达 Gb/s 的数量级, 其互连线网将产生延时、畸变和互扰等效应, 为保证通过传输的高速脉冲信号不产生畸变, 必须用高速电路信号完整性理论和方法分析。由于高速信号为宽频谱, 而频谱高端进入微波范围, 因此在高速电路信号完整性和微波电路分析之间, 存在千丝万缕的联系。

SiP 将包括微波的各类芯片组合在一个封装结构中, 实现了系统集成。其集成度虽逊于系统芯片 SoC, 但可行性较强, 整体系统也比较紧凑, 代表了微波集成技术的新方向。

最后值得一提的是, 微波集成技术的发展不能忽视计算机辅助设计(CAD)的推动, 尤其在 20 世纪 80 年代以后, 计算机性能快速提高, 机助设计成为微波集成电路分析设计不可缺少的工具和手段。微波集成电路看似在电路规模上远比不上一般集成电路, 但其机理复杂, 电路形状和尺寸对电路特性影响极大, 分布参数连同某些寄生参数如微带不均匀性分析都很繁杂, 有时非一般数学分析方法所能解决, 只能采用数值方法。面对大规模的复杂数值计算, 计算机的应用必不可免。高性能的计算机、高效的数值方法再和合理的结构设计相结合, 成为解决微波集成电路的利器。

微波集成 CAD 一般分建模、仿真和优化三部分: 将器件和微带局部结构的物理机理在计算机上建立定量的关系称为建模或参数提取; 由建模得到的参数通过计算机上电路分析得到单元或整体电路的特性称为仿真; 手动或自动调整参数使局部或整体电路的特性在一定约束条件下达到最佳状态称为优化。如果建模足够精确、电路分析合理, 则在计算机上所得的结果和实际颇为接近。尤其是电磁场仿真软件, 可以对电路中每一细节部分以电磁场计算方法建模, 整体合成后可获得较精确的结果。在构想一个滤波器的初步版图后, 可通过对版图形状和尺寸细节的反复调整, 最终获得微波集成滤波器的最佳设计结果。合乎要求