

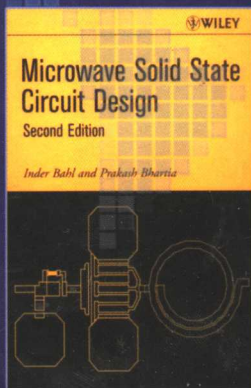
国外电子与通信教材系列



# 微波固态电路设计

## (第二版)

Microwave Solid State Circuit Design  
Second Edition



[美] Inder Bahl 著  
Prakash Bhartia

郑新 赵玉洁 刘永宁 潘厚忠 等译



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 微波固态电路设计(第二版)

**Microwave Solid State Circuit Design(Second Edition)**

【美】 Inder Bahl Prakash Bhartia 著

郑新 赵玉洁 刘永宁 潘厚忠 等译

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是一本关于微波固态电路分析与设计的专著。本书共分为 15 章,其主要特点是:广泛覆盖无源和有源射频和微波电路设计技术;介绍了微波电路包括制造技术方面的具体问题处理经验,以及异质结构和宽禁带器件;综述 MEMS 技术;提供一些小型化和低成本电路设计方法;收集了较多的设计曲线和表格,便于读者使用。

本书结构紧凑,内容简练,由浅入深,既可作为电子信息工程、通信工程等相关专业本科生和研究生的教材,也可供从事电子信息技术行业的工程技术人员学习参考。

Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Inc. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2004-0909

### 图书在版编目(CIP)数据

微波固态电路设计:第二版/(美)巴尔(Bahl, I.), (美)巴希尔(Bhartia, P.)著;郑新等译. —北京:电子工业出版社, 2006. 2

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Microwave Solid State Circuit Design: 2nd edition

ISBN 7-121-01867-5

I. 微… II. ①巴… ②巴… ③郑… III. 微波电路: 固态电路—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 122879 号

责任编辑: 杨丽娟 特约编辑: 明足群

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 42 字数: 1075 千字

印 次: 2006 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 68.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。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。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

- |     |            |  |
|-----|------------|--|
| 主任  | 吴佑寿        | 中国工程院院士、清华大学教授   |
| 副主任 | 林金桐<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长<br>中国通信学会常务理事    |
| 委员  | 林孝康        | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
|     | 徐安士        | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                |
|     | 樊昌信        | 西安电子科技大学教授、博士生导师<br>中国通信学会理事、IEEE会士                          |
|     | 程时昕        | 东南大学教授、博士生导师<br>移动通信国家重点实验室主任                                |
|     | 郁道银        | 天津大学副校长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员                 |
|     | 阮秋琦        | 北方交通大学教授、博士生导师<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长                     |
|     | 张晓林        | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员     |
|     | 郑宝玉        | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                  |
|     | 朱世华        | 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员       |
|     | 彭启琮        | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员   |
|     | <b>徐重阳</b> | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员        |
|     | 毛军发        | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员            |
|     | 赵尔沅        | 北京邮电大学教授、教材建设委员会主任   |
|     | 钟允若        | 原邮电科学研究院副院长、总工程师   |
|     | 刘彩         | 中国通信学会副理事长、秘书长   |
|     | 杜振民        | 电子工业出版社副社长   |

## 译者序

电磁波频谱是一种资源,微波在其中占有十分重要的地位,许多电子信息系统都采用微波作为载频。微波在国民经济和国防建设中发挥着不可替代的作用。近二三十年来,微波的服务领域不断扩大,新器件、新技术,特别是新系统的不断出现,进一步推动了微波技术的发展,微波固态电路技术已成为现代电子信息系统中重要的组成部分。许多电子信息系统,如卫星通信、移动通信、雷达、微波遥感、全球定位系统(GPS)、遥控遥测系统、电子战系统等都离不开微波固态技术。因此从事电子信息系统与技术领域的高校师生、研究人员和工程技术人员必须具备系统的微波固态技术知识,掌握该领域的基本器件知识、基本原理和实际分析方法是十分必要的。多年来,中国电子科技集团第十四研究所在从事现代电子信息系统的研制中,也十分注意学习国外先进电子技术,注意引进国外先进技术,组织翻译国外先进电子信息系统技术文献著作并学习吸收,提高工程技术研究人员的技术水平,并应用到工程实践中。

《微波固态电路设计》第一版是在1988年出版的,全书共有17章,当时受到了国内从事微波系统与技术研究的工程技术人员和高校师生的广泛欢迎。时隔15年后,Bahl和Bhartia两位专家又推出了《微波固态电路设计》第二版,在第一版的基础上进行了认真修订,重点放在了保留和详细阐述那些目前和将来重要的主题,删减了一些内容过时的或用途不大的材料或整个章节,特别是对于新知识的介绍,增加了专门一章介绍了基于微电子机械系统(MEMS)的器件在微波系统中的应用,MEMS器件在降低功率需求、缩小尺寸和减轻重量方面具有的优势明显。修订后,《微波固态电路设计》第二版共有15章。

《微波固态电路设计》第二版继承了第一版的优点,广泛覆盖了无源和有源射频和微波电路设计技术,对其进行了全面和系统的介绍,对其关键技术进行了深入的阐述;介绍了微波电路包括制造技术方面的具体问题处理经验,提供了一些小型化和低成本电路设计方法,还收集了较多的设计曲线和表格,便于使用,一目了然。同时对微波技术的新发展、新趋势,如MEMS器件、宽禁带器件也进行了介绍,反映了微波技术今后的技术走向,具有一定的前瞻性。

本书由中国电子科技集团公司第十四研究所组织翻译,郑新研究员、赵玉洁研究员主持翻译。译稿初稿第1~6章由马以亮、张西昆、张毅、任志国、傅友华译,第7~11章由刘永宁译,第12~15章由潘厚忠译,郑新研究员、赵玉洁研究员对全书进行了统译和审校。本书在翻译出版过程中,得到了中国电子科技集团公司副总经理左群声研究员、中国电子科技集团公司第十四研究所所长罗群研究员、电子工业出版社文宏武社长、电子工业出版社王志刚书记的大力支持,以及第十四研究所科技委秘书处张坚、石凯军同志的大量帮助,在此一并表示感谢。

对于翻译中的错误与不当之处,敬请指出,不胜感激!以便今后改正。

译者

# 前 言

15年前出版了本书第一版。多年来实际情况证明本书得到了研究工作者、教育工作者和设计师非常好的利用,技术也取得了显著的进展,特别是在诸如微电子机械系统(MEMS)、光电子和纳米技术领域。目前,这些领域仍然在发展,一些基于MEMS的器件已处于商用阶段。基于光学的技术已广泛应用于通信和其他基于射频的系统中,但纳米技术仍处于早期阶段。因此,在修订本书时,重点放在了保留和详述那些目前和将来重要的主题,删减或删除那些过时的或用途不大的材料或整个章节。很多读者的反馈意见给了我们很大的帮助,本书的内容反映了这些信息。由于在无线通信领域、射频(RF)和微波技术的商业应用增长迅猛,本书大多材料倾向于这方面的应用。

开始必须确定本书采用什么样的基本结构和组成形式比较合理。为了保证本书的完整性,采纳收到的建议,微波网络理论放在第1章。其余章节根据需要加以修订。例如,在第2章,删除了同轴线和矩形波导不连续性方面的论述,其余部分则根据适用于集总参数电感的公式加以更新。关于第3章谐振器,删除了关于不常用谐振器的章节,增加了诸如高Q值、可调的、有源谐振器等较通用的谐振器。第4章是关于阻抗变换技术,进行了完全修订,由一位新的作者撰写,这一章是全新的。第5章关于混合接头和耦合器,具有30%的新内容,这反映了当前的实际应用情况。同样,第6章删除了多工器,增加了紧凑型滤波器,滤波器调谐以及滤波器的电磁仿真。虽然第7章和第8章的大部分材料仍可通用,但我们认为进行详细修订和增加关于异型结构和宽带缝隙器件的信息是合适的。第9章关于振荡器则包含了用于无线电通信电路的振荡器,关于放大器的章节也包含了无线电放大器设计方法和设计示例。

第11章是新的,包括诸如低温混频器和自激振荡混频器这样的主题。第12章和第13章也进行了修订,考虑有很多数量的计算机软件包和关于这个问题的书籍,所以删除了本章,由关于未来更加流行的MEMS的新章节取而代之。很多研究者和公司从事该领域的工作,基于MEMS的器件在降低功率需求、缩小尺寸和减轻重量方面的优势明显。最后插入关于电路制造技术的新章节作为第15章,本章汇入了第一版第15章中一些仍然重要的问题,同时也汇入了现代印制电路制造、混合集成电路、微波单片集成电路方面的实践。

总之该修订版有三章全新的章节,两章有较大改动,还有十章有25%的改动。每章都含有设计公式、表格、图,以及为学生准备的一套习题。

我们相信本版将像第一版一样受到广大教师、学生、设计师和研究者的喜爱。就像第一版一样,我们希望本书能让学生对学科的理解变得简单,使设计师对电路、器件的设计变得容易。就像第一版一样,本书是大家的共同努力和广泛协作的成果,特别是增加了几位新的作者。我们感谢所有作者为准备文稿资料所做出的辛勤努力,同时代表他们感谢那些在幕后对本书出版做了大量工作的人。最后,我们感谢家人在本书准备过程中的支持与理解。

Inder Bahl  
Prakash Bhartia



## 作者介绍

Inder Bahl, M/A-COM 公司杰出技术专家

Prakash Bhartia, DREO 主任

Edward Griffin, M/A-COM 公司生产线经理

K C Gupta, 美国科罗拉多州大学电机工程系教授

Robert G Harrison, Carleton 大学电子系教授

A P S Khanna, Agilent 技术公司研发部经理

Protap Pramanick, KL 微波公司高级专家

Ramesh Ramadoss, 美国科罗拉多州大学电机工程系教授

Arvind Sharma, TRW 公司电子与技术分部高级工程师

Prasad N. Shastry, Bradley 大学电机与计算机工程系教授

Robert J Trew, 维吉尼亚技术大学 Willis G Worcester 工程教授, ECE 系主任

# 目 录

<b>第 1 章 引言</b> .....	(1)
1.1 微波/毫米波特性 .....	(1)
1.2 微波平面电路的发展史 .....	(2)
1.3 微波平面电路的应用 .....	(3)
1.4 微波网络理论 .....	(4)
1.4.1 等效电压和等效电流的概念 .....	(4)
1.4.2 导纳和阻抗矩阵 .....	(6)
1.4.3 散射矩阵 .....	(7)
1.4.4 参考平面平移引起散射矩阵的变换 .....	(9)
1.4.5 链矩阵( <i>ABCD</i> )表示法 .....	(12)
参考文献 .....	(15)
<b>第 2 章 传输线和集总参数元件</b> .....	(16)
2.1 传输线 .....	(16)
2.1.1 普通传输线结构特性 .....	(17)
2.1.2 平面传输线特性 .....	(20)
2.1.3 各种 MIC 传输媒介的比较 .....	(29)
2.2 耦合线 .....	(29)
2.3 不连续性 .....	(34)
2.4 集总参数元件 .....	(37)
2.4.1 集总参数元件的设计 .....	(37)
2.4.2 电感器的设计 .....	(38)
2.4.3 电容器的设计 .....	(43)
2.4.4 电阻器的设计 .....	(45)
参考文献 .....	(47)
习题 .....	(51)
<b>第 3 章 谐振器</b> .....	(53)
3.1 引言 .....	(53)
3.2 谐振器参数 .....	(53)
3.2.1 谐振频率 .....	(53)
3.2.2 品质因数 .....	(54)
3.2.3 相对带宽 .....	(54)
3.2.4 有载品质因数 .....	(54)
3.2.5 阻尼因子 .....	(54)
3.2.6 耦合 .....	(55)
3.3 腔体谐振器 .....	(55)
3.3.1 同轴谐振器 .....	(55)
3.3.2 凹状同轴腔体谐振器 .....	(56)

3.3.3	矩形波导谐振器 .....	(57)
3.3.4	圆波导谐振器 .....	(58)
3.3.5	椭圆波导谐振器 .....	(60)
3.4	平面微带谐振结构 .....	(60)
3.4.1	矩形微带谐振器 .....	(61)
3.4.2	圆盘微带谐振器 .....	(62)
3.4.3	圆环微带谐振器 .....	(64)
3.4.4	三角形微带谐振器 .....	(64)
3.4.5	高Q谐振器 .....	(69)
3.4.6	可调谐振器 .....	(70)
3.5	介质谐振器 .....	(74)
3.5.1	材料 .....	(75)
3.5.2	谐振频率 .....	(76)
3.5.3	MIC中介质谐振器与电路的耦合 .....	(77)
3.5.4	寄生模 .....	(80)
3.5.5	频率调谐 .....	(81)
3.6	YIG(钇铁石榴石)谐振器 .....	(82)
3.6.1	谐振频率和品质因数 .....	(82)
3.6.2	耦合和等效电路 .....	(83)
3.6.3	磁路 .....	(83)
3.7	谐振器的测量 .....	(84)
3.7.1	单端口谐振器 .....	(85)
3.7.2	两端口谐振器 .....	(87)
	参考文献 .....	(88)
	习题 .....	(91)
<b>第4章</b>	<b>阻抗变换技术 .....</b>	<b>(93)</b>
4.1	引言 .....	(93)
4.2	窄带变换技术 .....	(93)
4.2.1	分布元件技术 .....	(94)
4.2.2	集总参数元件技术 .....	(99)
4.2.3	集总参数与分布参数元件组合技术 .....	(107)
4.2.4	T型和 $\pi$ 型网络技术 .....	(109)
4.3	宽带变换技术 .....	(109)
4.3.1	Bode-Fano 准则 .....	(110)
4.3.2	多节四分之一波长变换器 .....	(112)
4.3.3	渐变传输线变换器 .....	(118)
4.3.4	集总参数和分布参数元件匹配网络 .....	(120)
4.3.5	镜像阻抗终端负载 .....	(122)
	参考文献 .....	(123)
	习题 .....	(124)
<b>第5章</b>	<b>混合接头与耦合器 .....</b>	<b>(127)</b>
5.1	引言 .....	(127)
5.1.1	混合接头与耦合器的基本原理 .....	(127)

5.1.2	混合接头和耦合器的类型	(128)
5.1.3	应用	(130)
5.2	混合接头的设计	(130)
5.2.1	90°混合接头	(130)
5.2.2	环形分支线混合接头	(132)
5.2.3	匹配T形混合接头(鼠笼式混合接头)	(132)
5.2.4	尺寸压缩的准集总式方形混合接头	(135)
5.2.5	改进的鼠笼式混合接头	(137)
5.3	耦合线定向耦合器	(141)
5.3.1	孔耦合线的定向耦合器	(141)
5.3.2	TEM线定向耦合器	(149)
5.3.3	多导体耦合器	(156)
5.3.4	分布式耦合器	(158)
5.3.5	Wilkinson耦合器、功率分配器和合成器	(160)
5.3.6	其他耦合器	(165)
5.4	设计考虑	(171)
5.4.1	混合接头的损耗	(171)
5.4.2	定向性的改善	(172)
	参考文献	(173)
	习题	(174)
<b>第6章</b>	<b>滤波器</b>	(176)
6.1	引言	(176)
6.1.1	滤波器参数定义	(177)
6.1.2	基本形式	(180)
6.1.3	应用	(181)
6.2	滤波器测量	(181)
6.2.1	插入损耗和回波损耗	(181)
6.2.2	S参数	(182)
6.3	滤波器综合	(182)
6.3.1	通过低通滤波器综合进行滤波器设计	(182)
6.3.2	特殊响应滤波器的综合	(187)
6.3.3	滤波器变换	(189)
6.3.4	阻抗和导纳变换器	(192)
6.4	设计滤波器的实验方法	(194)
6.5	滤波器建模	(199)
6.5.1	窄带近似	(199)
6.5.2	滤波器分析	(199)
6.5.3	数值方法	(201)
6.6	电磁仿真	(202)
6.6.1	电磁仿真方法	(202)
6.6.2	滤波器示例	(203)
6.7	滤波器实现	(205)
6.7.1	印制电路滤波器	(205)

6.7.2	介质谐振器滤波器	(211)
6.7.3	陶瓷板滤波器	(211)
6.7.4	紧凑型滤波器	(214)
6.7.5	集总元件滤波器	(216)
6.8	实际考虑	(216)
6.8.1	体积、重量和成本	(216)
6.8.2	有限Q值	(217)
6.8.3	功率容量	(218)
6.8.4	温度影响	(218)
6.8.5	群延时	(220)
6.8.6	机械调节滤波器	(220)
6.9	电调滤波器	(221)
	参考文献	(223)
	习题	(227)
<b>第7章</b>	<b>有源器件</b>	(229)
7.1	引言	(229)
7.2	半导体器件的基本方程	(229)
7.3	材料参数	(230)
7.4	双极晶体管	(233)
7.4.1	晶体管基本工作过程	(234)
7.4.2	电流增益	(236)
7.4.3	限制和二阶效应	(238)
7.4.4	微波晶体管	(238)
7.4.5	等效电路	(240)
7.4.6	噪声系数分析	(243)
7.4.7	异质结双极晶体管	(245)
7.5	场效应晶体管	(246)
7.5.1	基本工作原理	(246)
7.5.2	MESFET模型	(251)
7.5.3	小信号模型	(253)
7.5.4	等效电路和优值	(256)
7.5.5	噪声系数分析	(259)
7.5.6	任意掺杂分布模型和深能级	(262)
7.5.7	功率FET	(264)
7.6	HEMT	(267)
7.6.1	HEMT模型	(269)
7.6.2	噪声特性	(270)
7.7	双极晶体管与FET噪声系数的比较	(271)
	参考文献	(271)
	习题	(274)
<b>第8章</b>	<b>无源器件</b>	(277)
8.1	引言	(277)
8.2	pn结	(277)

8.2.1	理想二极管方程	(280)
8.2.2	与理想二极管方程的偏差	(281)
8.2.3	结电容	(283)
8.3	肖特基势垒结	(285)
8.3.1	表面效应	(286)
8.3.2	镜像力的降低作用	(287)
8.3.3	肖特基模型	(288)
8.3.4	结电容	(291)
8.3.5	整流接触材料	(292)
8.3.6	串联电阻	(292)
8.3.7	等效电路	(293)
8.3.8	优值	(293)
8.4	变容二极管	(294)
8.4.1	等效电路	(295)
8.4.2	优值	(297)
8.5	变阻器	(298)
8.6	pin 二极管	(299)
8.6.1	器件的基本物理过程	(299)
8.6.2	开关速率	(301)
8.6.3	等效电路	(301)
8.6.4	优值	(303)
8.7	阶跃恢复二极管	(304)
8.7.1	器件的基本物理过程	(304)
8.7.2	频率限制	(306)
8.7.3	等效电路	(307)
	参考文献	(308)
	习题	(308)
<b>第9章</b>	<b>振荡器</b>	<b>(311)</b>
9.1	引言	(311)
9.2	用于微波振荡器的有源器件	(312)
9.3	负阻的概念	(312)
9.4	晶体管的三端口 S 参数特性	(313)
9.5	振荡和稳定条件	(316)
9.6	晶体管振荡器的类型和结构	(318)
9.7	固定频率振荡器	(319)
9.7.1	谐振器作为串联反馈元件	(320)
9.7.2	谐振器作为并联反馈元件	(324)
9.7.3	串联与并联反馈	(326)
9.7.4	振荡器最大功率输出	(326)
9.7.5	TDRO 的温度稳定度	(327)
9.7.6	TDRO 的调谐	(328)
9.7.7	传输线谐振腔振荡器	(331)
9.8	宽带可调振荡器	(333)

9.8.1	YIG 调谐的振荡器(YTO)	(335)
9.8.2	压控振荡器(VCO)	(338)
9.9	振荡器特性和测量	(342)
9.9.1	调制带宽	(343)
9.9.2	频率和功率牵引	(344)
9.9.3	相位噪声和抖动	(345)
	参考文献	(350)
	习题	(353)
<b>第 10 章</b>	<b>放大器</b>	<b>(354)</b>
10.1	引言	(354)
10.2	放大器特性	(354)
10.2.1	功率增益	(354)
10.2.2	噪声特性	(355)
10.2.3	稳定性	(359)
10.2.4	非线性特性	(361)
10.2.5	动态范围	(364)
10.3	偏置网络	(364)
10.4	小信号放大器设计	(366)
10.4.1	FET 的选择	(366)
10.4.2	窄带低噪声设计	(370)
10.4.3	最大增益放大器设计	(371)
10.4.4	宽带放大器	(372)
10.5	功率放大器	(375)
10.5.1	器件模型:线性和非线性	(377)
10.5.2	负载线模型	(379)
10.5.3	功率放大器的设计	(383)
10.5.4	内匹配功率 FET 放大器的设计	(388)
10.5.5	功率合成技术	(388)
	参考文献	(394)
	习题	(398)
<b>第 11 章</b>	<b>检波器和混频器</b>	<b>(400)</b>
11.1	引言	(400)
11.1.1	检波和混频的基本原理	(400)
11.1.2	检波器和混频器的应用	(402)
11.1.3	用于检波和混频的非线性阻性器件	(402)
11.1.4	检波器和混频器的噪声	(404)
11.2	检波器	(406)
11.2.1	工作原理	(406)
11.2.2	检波器灵敏度测量	(406)
11.2.3	小信号检波器理论	(409)
11.2.4	大信号检波器理论	(412)
11.2.5	检波器的设计考虑	(414)
11.3	混频器	(417)

11.3.1	混频器频谱分量 .....	(417)
11.3.2	镜像增强混频器 .....	(418)
11.3.3	转换损耗和转换增益 .....	(419)
11.3.4	理想混频器 .....	(421)
11.3.5	外延二极管混频器 .....	(423)
11.3.6	混频器性能测量 .....	(426)
11.3.7	混频器电路类型 .....	(428)
11.3.8	混频器噪声 .....	(442)
	参考文献 .....	(445)
	习题 .....	(449)
<b>第 12 章</b>	<b>微波控制电路 .....</b>	<b>(451)</b>
12.1	用于控制电路的 pin 二极管和 MESFET 模型 .....	(451)
12.1.1	pin 二极管 .....	(451)
12.1.2	砷化镓 MESFET .....	(451)
12.2	开关设计 .....	(453)
12.2.1	基本结构 .....	(453)
12.2.2	插入损耗和隔离度 .....	(453)
12.2.3	器件电抗补偿 .....	(457)
12.2.4	单刀双掷开关 .....	(458)
12.2.5	串、并联开关结构 .....	(459)
12.2.6	开关速度的考虑 .....	(464)
12.3	移相器设计 .....	(467)
12.3.1	概述 .....	(467)
12.3.2	开关线型移相器 .....	(469)
12.3.3	加载线型移相器 .....	(470)
12.3.4	反射型移相器 .....	(474)
12.3.5	开关网络移相器 .....	(478)
12.3.6	放大器型移相器 .....	(481)
12.4	限幅器电路设计 .....	(484)
12.4.1	用于限幅的各种现象 .....	(484)
12.4.2	pin 二极管限幅器 .....	(487)
12.4.3	微带结构限幅器 .....	(488)
12.5	可变衰减器设计 .....	(490)
12.5.1	pin 二极管衰减器 .....	(490)
12.5.2	MESFET 衰减器 .....	(491)
	参考文献 .....	(493)
	习题 .....	(494)
<b>第 13 章</b>	<b>倍频器和分频器 .....</b>	<b>(497)</b>
13.1	引言 .....	(497)
13.1.1	倍频器和分频器基础 .....	(497)
13.1.2	应用 .....	(498)
13.2	倍频 .....	(502)
13.2.1	倍频器类型 .....	(502)



13.2.2	非线性电阻倍频器 .....	(502)
13.2.3	非线性电抗倍频器 .....	(507)
13.2.4	有源倍频器 .....	(522)
13.3	分频 .....	(532)
13.3.1	分频器类型 .....	(532)
13.3.2	参量分频器 .....	(533)
13.3.3	再生(带反馈混频器)分频器 .....	(535)
13.3.4	注入锁相振荡器分频器 .....	(542)
	参考文献 .....	(548)
	习题 .....	(555)
<b>第 14 章</b>	<b>射频微电子机械系统器件和电路应用 .....</b>	<b>(557)</b>
14.1	引言 .....	(557)
14.2	RF MEMS 制造和组装 .....	(557)
14.2.1	制造加工 .....	(557)
14.2.2	组装和包装技术 .....	(559)
14.3	射频 MEMS 传动装置 .....	(562)
14.3.1	传动结构 .....	(562)
14.3.2	静电传动装置 .....	(562)
14.4	RF MEMS 器件 .....	(569)
14.4.1	开关 .....	(569)
14.4.2	变容管 .....	(581)
14.5	射频 MEMS 电路的应用 .....	(587)
14.5.1	移相器 .....	(587)
14.5.2	滤波器 .....	(592)
14.5.3	阻抗调谐器 .....	(594)
14.5.4	振荡器 .....	(596)
14.5.5	放大器 .....	(597)
14.5.6	MEMS 机械谐振器和滤波器 .....	(598)
14.5.7	微机械元件和电路 .....	(600)
	参考文献 .....	(607)
	习题 .....	(611)
<b>第 15 章</b>	<b>电路制造技术 .....</b>	<b>(614)</b>
15.1	引言 .....	(614)
15.1.1	材料 .....	(614)
15.1.2	掩膜设计 .....	(617)
15.1.3	掩膜制造 .....	(617)
15.2	印制电路板 .....	(618)
15.2.1	PCB 制造 .....	(619)
15.2.2	PCB 的实例 .....	(619)
15.3	微波印制电路 .....	(620)
15.3.1	MPC 制造 .....	(622)
15.3.2	MPC 例子 .....	(622)