



丛书

微波固态电路 设计

机械电子工业部第十四研究所

微波固态电路设计

I.J.BAHL P.BHARTIA

顾墨琳 总校

序	华海根	第九章	王平孙译	曾俭恭校	
前言	顾墨琳译	第十章	黄川东译	曾俭恭校	
第一章	顾墨琳译	曾俭恭校	第十一章	毛仁麟译	陈树铮校
第二章	赵道纯译	毛仁麟校	第十二章	莫家铭译	阮馨远校
第三章	张祖舜译	曾俭恭校	第十三章	王平孙译	曾俭恭校
第四章	杨乃恒译	阮馨远校	第十四章	阮馨远译	杨乃恒校
第五章	杨乃恒译	阮馨远校	第十五章	王宝善译	曾俭恭校
第六章	阮馨远译	杨乃恒校	第十六章	相正平译	毛仁麟校
第七章	毛仁麟译	华海根校	第十七章	顾墨琳译	曾俭恭校
第八章	毛仁麟译	陈树铮校	附录	曾俭恭译	顾墨琳校

机械电子工业部第十四研究所

内 容 简 介

本书是关于微波固态电路分析与设计方面的一本较详尽的参考书，其内容相当广泛，包含了现代微波工程师所需的各方面知识。全书共十七章，除第一章引言，最末章是作为结束语对未来进行瞻望外，其余十五章分属五个领域，第二至第六章属平面传输线及不连续性、集总元件、谐振器、阻抗匹配网络、耦合结构及滤波器等，第七至第八章属两端器件和三端器件，第九至第十三章属振荡器、放大器、混频器、检波器、控制电路、倍频器及分频器，十四至十五章属微波 CAD 技术、HMIC 与 MMIC 的设计与制造，第十六章属微波与光、声、静磁波之间的互作用。

本书还收集了较多的设计曲线和表格，便于使用又一目了然。书中还涉及较多的微波前沿技术。

本书适于用作高等学校高年级生或研究生教材，也可作为从事微波技术工作的研究人员、工程师的参考书，或作为短训班教材。

Microwave Solid State Circuit Design

Inder Bahl, Prakash. Bhartia

A Wiley-Interscience Publication, 1988 ISBN 0-471-83189-1

固态微波电路设计

总 校 顾墨琳

责任编辑 曾俭恭

《SSS》丛书编辑部出版

十四研究所印刷厂印刷

850 × 1092 1/16 印张 $50\frac{1}{3}$ 1200 千字

1991 年 12 月第一版 印数: 1-800 册

内部书号: SSS-005 定价: 38 元

序

尽管目前微波固态电路 (Microwave Solid State Circuit) 已被广泛应用, 但对它却未有一个明确的定义。就其范畴而言是微波固态器件 (即微波半导体器件) 与微波平面电路的结合。微波固态电路技术是与微波集成电路技术密切相关的。

六十年代后期随着各种微波半导体器件的出现及迅速发展, 平面传输线理论和薄膜工艺趋于成熟, 微波集成电路 (MIC) 以混合微波集成电路 (HMIC) 的形式出现并得到广泛应用, 目前已出现高度集成的多功能 HMIC。而随着半导体多层工艺的成熟, 以及 GaAs 肖特基场效应晶体管发展为多用途器件, 七十年代后期开始出现单片微波集成电路 (MMIC), 并得到大力的研究与开发。

目前雷达、电子战、通讯和导航等电子设备中微波电路“微型化”的呼声甚高, 而全球定位系统和直播卫星接收站等民用设备的射频前端则还要求批生产、价格低, 这些都是微波固态电路的潜在应用市场。

以 MIC 为基础的微波固态电路技术内容颇为广泛。通过对该领域中各有关专题的研究将对电磁场理论、器件物理、元器件定模、电路设计、分析、综合、优化、测试、制造等各方面不断地提出新的要求, 因此可以认为固态电路的研究与开发极大地丰富了微波理论与技术本身。

近年来国内外已发表了众多的微波书籍, 但是这些书籍往往仅局限于某一专题, 而本书却是关于微波固态电路分析与设计方面的一本较详尽的著作, 其内容相当广泛, 包含了现代微波工程师们所需的多方面知识。

本书由分别属于各个领域的十二位专家执笔, 正因各章由不同的作者执笔, 故其侧面难免有所不同。总的来说, 本书的撰写较多地基于经典的理论和设计概念, 略去一些较深的理论细节, 书中给出的闭解大多可以直接应用或纳入 CAD 软件包, 而若干严格解法亦已通过所引参考文献给出。本书还收集了较多的设计曲线和表格, 便于使用又一目了然。书中还涉及较多的微波前沿技术, 稍感欠缺的是尚未纳入已广泛应用的或富有潜力的几种新兴固态有源器件, 如 HEMT 或 HBT 等, 对当前结合计算机辅助设计、辅助制造和辅助测试为一体的 CAE 的概念亦未论及。

参与本书译、校的同志都是长期从事微波技术研究工作的老同志, 我们还聘请了从事微波技术研究工作达四十年的研究员高级工程师顾墨琳同志担任全书总校, 对于他们为本书付出的辛勤劳动, 表示诚挚的谢意。

机电部十四所副总工程师
兼地面雷达部主任 华海报

一九九一年十一月

前 言

过去的十年内，微波电路技术已从普通的波导和同轴线元器件和系统转移到采用平面电路。这种电路的特点是能够把它们蚀刻在适当的介质衬底上，通常被称作微波集成电路(MIC)。混合微波集成电路(HMIC)是把封装式的或芯片式的有源和无源分立元件(例如晶体管、二极管、电容器、电阻等)外接于蚀刻的电路板上。而在单片微波集成电路(MMIC)所有元件是用淀积法和蚀刻法制造的，因而没有分立元件，这种电路现正迅速地日益普及。

至今，还没有一本教科书对无源电路，固态器件和微波固态电路作过全面介绍。目前使用的教科书只谈到某一个特定领域，例如有源或无源器件或半导体器件等，很少有(如果有的话)设计资料，特别是反映当前电路技术水平的资料，也没有提到计算机辅助设计(CAD)技术或微波集成电路。这些教科书不能给学生或见习工程师提供真正足够的背景知识，以便能在生产岗位上开展工作。设计能力只能在工作过程中通过经验的传授来获得，通常要经过很多年才能基本胜任工作。本教科书主要是为了填补这一空白而编写的。

本书不同于其它教科书，后者侧重于分析而忽略了综合，本书则兼顾了两者，从而使学生和设计人员对电路具有分析、综合直至制造的能力。由于系统和结构可能是多种多样的，系统的设计又主要取决于设计人员的创造力，故本书没有提及系统设计，只介绍了大多数微波元件的设计。

本书各章分别由大学教授和从事实际工作的工程师撰写。他们在各自的领域内具有专门的知识 and 才能，能对各种特定元器件的设计指出具体的要点。由于在撰写本书时作过适当的协调和统一，诸如符号表示等，全书编辑中的难题得以避免。本书适于用作电气工程专业高年级生的课程，也可用作第一学年研究生的教材。此外，这本书对于工业部门的设计师和工程师也很理想。所附的大量参考书目对研究人员是十分有用的。

本书共有十七章，各章所讨论的材料尽量准确和全面，因而基本上能自成一体。对于不太重要的方面，只给读者推荐了一些易于获得的适用参考资料，书中还包含了供开展预研用的参考资料，并讨论了今后可望开发的领域。各章都有详尽的设计步骤和范例，以帮助 学生解惑和提高他们的设计技能。此外，书中关于各种元器件和电路的技术信息和评论可使读者了解到当前采用最广的微波技术，书中大多数的章都附有练习题。

第1章是本书的引言和评述以及将涉及的议题和领域。第2章介绍了传输线和集总元件的基本原理及其特性。本书的重点是平面电路，所以用了较多篇幅讨论诸如带状线、微带线等平面传输媒体；还介绍了这些媒体的不连续性和耦合性能。本章最后介绍了各种集总元件(如电容器、电感器和电阻器)的设计。

第3章讨论谐振器。本章结合电路模型定义了各种基本参量；重点放在平面媒体谐振器，诸如微带、槽线、介质谐振器等。还介绍了YIG谐振器，谐振器与传输线的耦合方法，以及电调谐和机械调谐方法。

第4章给出了作为微波电路和微波系统基础的阻抗匹配网络，讨论了供窄带和宽带匹配的阻抗匹配电路及其设计技术，以及这些结构的综合方法。最后介绍了实际实现的情况。

由上面各章自然引出了第 5 章的混合接头和耦合器。本章介绍了这两种器件的基本差别，以及它们的设计和分析方法，功率分配器和合成器是耦合电路的一种形式，这里也作了介绍。本章还从制造的角度出发，研究了损耗和宽带问题。

滤波器和多工器是微波系统中极为常用的元件，第 6 章对它们作了充分讨论，介绍了它们的分析方法和综合方法，以及采用集总元件或分布元件时的设计方法。为了加深理解，这里列举了一些设计例子，提出了设计中应该考虑的因素。最后，介绍了多工器的设计方法，并给出了设计实例。

第 7 章和第 8 章分别介绍了有源和无源固态器件。详细探讨了器件的基本原理、器件的特性，它们的用途和限制。三端器件如 GaAsFET 正在迅速成为最常用的固态器件，本章特别从它们在微波电路中用作振荡器、放大器等方面作了深入的讨论。第 8 章介绍的是无源器件，其中有肖特基势垒二极管、pin 二极管、变容二极管等。讨论侧重于设计师所感兴趣的一些特性。

第 9 章以第 7 章的材料为背景，讨论振荡器的设计，这里对这个重要元件作了深入的讨论，首先用整节的篇幅介绍了它的理论，其中包含了诸如调谐技术等多方面的特性。然后讨论 Si 双极晶体管和 GaAs 晶体管振荡器和其设计技术。本章还讨论了日益受到重视和得到广泛应用的介质谐振器 (DRO)，列举了一些设计实例和讨论了诸如器件的温度频率稳定性等重要因素。器件的带宽总是重要的考虑因素之一。介绍了振荡器的各种调谐方法，包括用变容管的、光学的和其它别的方法。

对于其它种种重要元件，本书也详细介绍了它们的分析、设计和制造方法。第 10 章对放大器作了广泛介绍，分析了作低噪声和功率放大用的 GaAsFET 放大器，提出了它的设计程序、典型设计实例和其电路。利用本章提供的材料，读者能在缺乏先验知识的情况下设计出其中任何一种放大器。另外两种元件即检波器和混频器将在下章中介绍。除了介绍基本原理外，还将讨论各种类型的混频器和检波器，以及它们的设计方法。给出了设计实例和注意事项，使设计师和学生避免犯错误并可一次获得较满意的设计。

许多微波电路元件可以归作“微波控制电路”，它们将放在第 12 章中介绍。这里就用它来作这一章的题目。它们是开关、移相器、衰减器和调制器。象前几章一样，本章也侧重介绍这些元件的设计，因而揭示了各类元件可能构成的电路，设计的考虑因素和设计中的限制。对于这些元件都给出了设计示例，以便能更好地理解本章的内容。

第 13 章讨论了最后一种元件即倍频器和分频器的设计。这些电路将日益得到广泛应用，尤其是在电子战、电子对抗和电子支援系统中更是如此。将对倍频器和分频器电路一起讨论，同时介绍它们的设计方法、实现情况和特殊的设计考虑因素。列举了一些新开发电路的示例，但其材料尚不足以得出详细的设计步骤。

随着计算机应用的普及，微波电路的计算机辅助设计 (CAD) 已发展成为一门完善的学科，已经有很多这方面的教科书。第 14 章包括下列基本内容：模型的建立、分析和优化，用 S 矩阵或二维分析法对微波电路进行计算机辅助分析，以及不连续性电抗效应的补偿。还论及采用模式搜索的优化法、梯度的计算和梯度优化法，对于这些方法都有例子说明。这些材料为读者提供了 CAD 方法的足够背景知识，从而能使学生理解和使用已商品化的微波电路 CAD 软件包或则开发他们自己的软件包。

自然希望读者利用前几章的知识能着手制作自己的微波集成电路；但是要真正掌握这

些电路的复杂制造技术，只有经过多年的实践才能取得。第15章介绍了各类MIC，它们的设计考虑因素、制造步骤和设计准则等。本章提供了充分的资料，设计师藉此能为混合微波集成电路和单片微波集成电路正确地选择设计和制造所需的衬底和材料。这里还以已制成的和目前正在生产的MIC为例进行了说明。

第16章介绍了光学、声学 and 静磁器件的飞速进展情况，着重介绍了单片衬底上的光集成。本章旨在促进和鼓励其它领域的技术与微波技术相结合，以取得新的进展。第17章是本书的最后一章，它概括地瞻望了微波/毫米波技术的发展趋势。就在写本书的时候，在一些国家机构和大学实验室里，由于主要得到了军方的资助，正在开展很多这方面的研究计划。现在的主要问题是应把这种技术更多地转为商品化产品。

本书的内容足够大学高年级学生和研究生一学年的课程。只要合理地选择内容，可以用本书来安排一学期、一季度、两学期或两季度使用的教材。有一种方法是把本书内分成有源和无源电路及元件。下表是根据不同授课学时和不同学历水平所推荐的典型课程安排方案。但不管怎样安排课程进度，都应把必要的设计示例安排在内，为了使学生全面了解这个领域，有些章节留作自学。在大多数章结束时都附有习题，这些习题的难度和深度都经过审定，是适合学生水平的。

课程期限	水平	包含的章节	备注
一学期 14周 3小时/周	高年级生	1~6章 8、11、12章的选用材料 13~17章	微波无源 电路课程
一学期 15周 3小时/周	高年级生	1~2章 7.10.14~17章的选用材料 13章	微波有源 电路课程
两学期 30周 3小时/周	高年级生	全书	微波电路 设计课程
一学期 15周 3小时/周	研究生	快速复习1~6章 7~13章讲座 14~17章的选用章节	微波电路 设计课程
两学期 30周 3小时/周	研究生	全书，侧重设计、 指标分配和 系统设计，学期论文	微波电路 设计课程
两学期 30周 3小时/周	研究生	1~6章，12章	微波无源 元件
一季度 10周 3小时/周	高年级生 或 研究生	复习1、2和7章 8~13章讲座	微波有源元件

和大多数教科书的编辑过程一样，本书也要求参与撰写的作者通力合作，感谢他们为了撰写这本内容丰富的教科书，在准备初稿、改稿和抄稿过程中所表现出的耐心，以及他们家庭所给以的理解。尽管书中难免还会有些错误，但是力求做到所有公式正确无误，衷心希望读者提出纠正错误的宝贵意见。

本书的问世还得到过许多人的帮助，虽然这里不可能对他们一一提名，但是我们还是要向给予我们以经常性的鼓励和支持的领导表示衷心感谢。

I.J.Bahl 博士感谢 Dennis Fisher 博士（董事长）和 Ed Donoho 先生（高级经理）在 II/GTC 公司范围提供的各种便利。本书的大部分手稿是由 Gradytene M.Pitzer 女士用打字机熟练地打出的，Gienn Brookman 为插图花费了很多时间。对于他们的贡献，并对曾经帮助过我们的人们致以深深的谢意。最后，我们还要对自己的家庭在整个写作过程中所给予的支持和作出的牺牲表示谢意。

I.J.Bahl

P.Bhartia

1987年

目 录

第 1 章	引言	1
	P.Bhartia	
	1.1 微波 / 毫米波的特性, 1	
	1.2 微波平面电路的发展史, 3	
	1.3 微波平面电路的应用, 3	
	参考文献, 5	
第 2 章	传输线和集总参数元件	6
	I.J.Bahl	
	2.1 传输线, 6	
	2.1.1 传输线的基本特性, 6	
	2.1.2 常规传输结构的特性, 9	
	2.1.3 平面传输线的特性, 11	
	2.1.4 各种MIC传输媒体的比较, 21	
	2.2 耦合线, 24	
	2.3 不连续性, 30	
	2.3.1 同轴线的不连续性, 33	
	2.3.2 矩形波导的不连续性, 35	
	2.3.3 带状线的不连续性, 35	
	2.3.4 微带的不连续性, 36	
	2.3.5 不连续性的补偿, 41	
	2.4 集总参数元件, 41	
	2.4.1 集总参数元件的设计, 42	
	2.4.2 电感器的设计, 42	
	2.4.3 电容器的设计, 47	
	2.4.4 电阻器的设计, 50	
	参考文献, 52	
	习 题, 56	
第 3 章	谐振器	58
	A.K.Sharma 和 A.P.S.Khanna	
	3.1 引言, 58	
	3.2 谐振器参量, 58	
	3.2.1 谐振器频率, 58	
	3.2.2 品质因数, 59	

- 3.2.3 相对带宽, 59
- 3.2.4 有载品质因数, 59
- 3.2.5 阻尼因子, 60
- 3.2.6 耦合, 60
- 3.3 腔体谐振器, 61
 - 3.3.1 同轴谐振器, 61
 - 3.3.2 凹状同轴谐振器, 62
 - 3.3.3 矩形波导谐振器, 64
 - 3.3.4 圆波导谐振器, 65
 - 3.3.5 椭圆波导谐振器, 68
- 3.4 平面微带谐振结构, 68
 - 3.4.1 矩形微带谐振器, 69
 - 3.4.2 圆盘微带谐振器, 69
 - 3.4.3 圆环微带谐振器, 72
 - 3.4.4 三角形微带谐振器, 75
 - 3.4.5 正六边形微带谐振器, 78
 - 3.4.6 椭圆盘微带谐振器, 80
 - 3.4.7 互耦谐振结构, 82
- 3.5 鳍线谐振结构, 83
- 3.6 介质谐振器, 87
 - 3.6.1 材料, 88
 - 3.6.2 谐振频率, 89
 - 3.6.3 MIC中介质谐振器与电路的耦合, 91
 - 3.6.4 寄生模, 94
 - 3.6.5 频率调整, 96
- 3.7 YIG (钇铁石榴石) 谐振器, 97
 - 3.7.1 谐振频率, 98
 - 3.7.2 工作频率与品质因数, 99
 - 3.7.3 等效电路, 103
 - 3.7.4 寄生模, 104
 - 3.7.5 磁电谐电路, 105
- 3.8 谐振器的测量, 106
 - 3.8.1 单端口谐振器, 107
 - 3.8.2 两端口谐振器, 110
- 参考文献, 111
- 习题, 114

P.Wahi

- 4.1 引言, 116
 - 4.1.1 意义和应用, 116
 - 4.1.2 单端口和两端口网络, 116
 - 4.1.3 传输线匹配电路, 117
- 4.2 无耗匹配网络, 123
 - 4.2.1 传递函数, 123
 - 4.2.2 网络理论, 125
 - 4.2.3 梯形网络, 127
 - 4.2.4 近似解, 133
- 4.3 阻抗匹配电路, 136
 - 4.3.1 阻抗变换: 集总式或分布式, 136
 - 4.3.2 增益-带宽极限, 142
 - 4.3.3 实频率技术, 145
- 4.4 网络综合和优化, 145
 - 4.4.1 插入损耗综合, 147
 - 4.4.2 拓扑选择/包含寄生元件, 149
 - 4.4.3 微波实现, 150
- 4.5 计算机辅助设计工具, 152
- 参考文献, 153
- 习 题, 154

P.Bhartia 和 P.Pramanick

- 5.1 引言, 155
 - 5.1.1 混合接头和耦合器的基本原理, 155
 - 5.1.2 混合接头和耦合器的类型, 156
 - 5.1.3 应用, 158
- 5.2 混合接头的设计, 159
 - 5.2.1 90° 混合接头, 159
 - 5.2.2 环形分支线混合接头, 159
 - 5.2.3 匹配混合T接头 (鼠笼式混合接头), 162
- 5.3 耦合线定向耦合器, 167
 - 5.3.1 采用孔耦合线的定向耦合器, 167
 - 5.3.2 TEM线定向耦合器, 177
 - 5.3.3 多导体耦合器, 186
 - 5.3.4 分布式耦合器, 188

- 5.3.5 Wilkinson耦合器、功率分配器和合成器, 190
- 5.3.6 其它耦合器, 198
- 5.4 设计考虑, 205
 - 5.4.1 混合接头的损耗, 205
 - 5.4.2 定向性的改善, 205
- 参考文献, 208
- 习 题, 209

第 6 章 滤波器和多工器

211

E.L.Griffin 和 I.J.Bahl

- 6.1 引言, 211
 - 6.1.1 滤波器参数定义, 213
 - 6.1.2 基本型式, 216
- 6.2 滤波器测量, 217
 - 6.2.1 插入损耗和回波损耗, 218
 - 6.2.2 S参数, 219
- 6.3 滤波器综合, 219
 - 6.3.1 通过低通滤波器综合进行滤波器设计, 220
 - 6.3.2 特种响应滤波器的综合, 224
 - 6.3.3 滤波器变换, 227
 - 6.3.4 阻抗和导纳倒量器, 233
- 6.4 设计滤波器的实验方法, 236
- 6.5 滤波器定模, 241
 - 6.5.1 窄带近似, 241
 - 6.5.2 滤波器分析, 242
- 6.6 数值方法, 245
- 6.7 滤波器实现, 246
 - 6.7.1 印制电路滤波器, 246
 - 6.7.2 介质谐振器滤波器, 252
- 6.8 实际考虑, 255
 - 6.8.1 体积、重量和成本, 255
 - 6.8.2 有限Q值, 256
 - 6.8.3 功率容量, 256
 - 6.8.4 温度影响, 258
 - 6.8.5 群延时, 260
 - 6.8.6 电调滤波器, 260
- 6.9 多工器, 260
 - 6.9.1 多工技术, 261
 - 6.9.2 双工器设计, 265

6.9.3 多工器实现, 265

参考文献, 265

习 题, 268

第 7 章 有源器件

269

R.J.Trew

7.1 引言, 269

7.2 半导体器件的基本方程, 269

7.3 材料参数, 271

7.4 双极晶体管, 274

7.4.1 基本晶体管工作, 276

7.4.2 电流增益, 279

7.4.3 限制和二阶效应, 281

7.4.4 微波晶体管, 282

7.4.5 等效电路, 285

7.4.6 噪声系数分析, 288

7.5 场效应晶体管, 291

7.5.1 基本工作原理, 291

7.5.2 MESFET模型, 297

7.5.3 小信号模型, 301

7.5.4 等效电路和优值, 305

7.5.5 噪声系数分析, 309

7.5.6 任意掺杂分布模型和深能级, 314

7.5.7 功率FET, 317

7.6 双极晶体管与 MESFET 噪声系数的比较, 320

参考文献, 325

习 题, 327

第 8 章 无源器件

330

R.J.Trew

8.1 引言, 330

8.2 PN 结, 330

8.2.1 理想二极管方程, 334

8.2.2 与理想二极管方程的偏差, 336

8.2.3 结电容, 338

8.3 肖特基势垒结, 340

8.3.1 表面效应, 342

8.3.2 镜像力的降低作用, 344

8.3.3 肖特基模型, 345

- 8.3.4 结电容, 349
- 8.3.5 整流接触材料, 350
- 8.3.6 串联电阻, 350
- 8.3.7 等效电路, 353
- 8.3.8 优值, 353
- 8.4 变容二极管, 353
 - 8.4.1 等效电路, 354
 - 8.4.2 优值, 356
- 8.5 变阻器, 358
- 8.6 pin 二极管, 359
 - 8.6.1 器件的基本物理过程, 360
 - 8.6.2 开关速度, 363
 - 8.6.3 等效电路, 363
 - 8.6.4 优值 (品质因数), 364
- 8.7 阶跃恢复二极管, 366
 - 8.7.1 器件的基本物理过程, 366
 - 8.7.2 频率极限, 369
 - 8.7.3 等效电路, 370
- 参考文献, 371
- 习 题, 373

第 9 章 振荡器

374

A.P.S.Khanna

- 9.1 引言, 374
- 9.2 负阻的概念, 375
- 9.3 振荡器的三端口 S 参数特性, 376
- 9.4 振荡和稳定条件, 378
- 9.5 固定频率振荡器, 382
 - 9.5.1 振荡器的设计, 382
 - 9.5.2 DRO 的温度稳定度, 394
 - 9.5.3 TDRO 的调谐, 397
- 9.6 宽带可调振荡器, 399
 - 9.6.1 YIG 调谐的振荡器 (YTO), 402
 - 9.6.2 压控振荡器 (VCO), 404
- 9.7 振荡器测量, 409
 - 9.7.1 用网络分析仪进行测量, 409
 - 9.7.2 牵引特性的测量, 413
 - 9.7.3 调频噪声的测量, 415
- 参考文献, 420

习 题, 422

第 10 章 放大器

424

I.J.Bahl 和 E.L.Griffin

10.1 引言, 424

10.2 放大器特性, 426

10.2.1 功率增益, 426

10.2.2 噪声特性, 427

10.2.3 稳定性, 432

10.2.4 非线性特性, 435

10.2.5 动态范围, 437

10.3 偏置网络, 438

10.4 线性放大器设计, 438

10.4.1 FET的选择, 441

10.4.2 窄带低噪声设计, 444

10.4.3 最大增益放大器设计, 445

10.4.4 宽带放大器, 447

10.5 功率放大器, 451

10.5.1 功率FET的选择, 452

10.5.2 大信号特性, 454

10.5.3 功率放大器设计, 459

10.5.4 内匹配功率FET放大器的设计, 461

10.5.5 功率合成技术, 462

参考文献, 470

习 题, 472

第 11 章 检波器和混频器

474

J.Irvine

11.1 引言, 474

11.1.1 视频和外差的基本检波原理, 475

11.1.2 应用, 479

11.2 检波器, 479

11.2.1 基本原理, 479

11.2.2 检波器的类型, 492

11.2.3 检波器器件, 493

11.2.4 设计考虑, 494

11.2.5 检波器设计举例, 495

11.3 混频器, 499

11.3.1 基本原理, 500

- 11.3.2 混频器的类型, 506
- 11.3.3 分析方法, 515
- 11.3.4 设计考虑, 520
- 11.3.5 混频器设计举例, 521

参考文献, 524

习 题, 525

第 12 章 微波控制电路

528

K.C.Gupta

- 12.1 用于微波控制电路的器件, 528
 - 12.1.1 pin二极管, 528
 - 12.1.2 GaAs MESFET, 529
- 12.2 开关的设计, 531
 - 12.2.1 基本形式, 531
 - 12.2.2 插入损耗和隔离度, 533
 - 12.2.3 器件电抗的补偿, 536
 - 12.2.4 单刀双掷开关, 539
 - 12.2.5 串并联开关形式, 540
 - 12.2.6 开关速度问题, 547
- 12.3 移相器的设计, 551
 - 12.3.1 概述, 551
 - 12.3.2 开关线移相器, 551
 - 12.3.3 加载线移相器, 554
 - 12.3.4 反射式移相器, 560
 - 12.3.5 开关网络移相器, 571
 - 12.3.6 放大器式移相器, 574
- 12.4 限幅器电路的设计, 581
 - 12.4.1 用于限幅的各种现象, 581
 - 12.4.2 pin二极管限幅器, 585
 - 12.4.3 微带形式的限幅器, 587
- 12.5 可变衰减器的设计, 588
 - 12.5.1 pin二极管衰减器, 588
 - 12.5.2 MESFET衰减器, 591

参考文献, 592

习 题, 593

第 13 章 倍频器与分频器

597

R.G.Harrison

- 13.1 引言, 597

- 13.1.1 倍频与分频的基础, 597
- 13.1.2 用途, 598
- 13.2 倍频器, 605
 - 13.2.1 倍频器的类型, 605
 - 13.2.2 用二极管实现的无源倍频器, 606
 - 13.2.3 采用变容管的参量倍频器, 609
 - 13.2.4 用GaAs FET实现的有源倍频器, 619
- 13.3 分频器, 633
 - 13.3.1 分频器的类型, 633
 - 13.3.2 用变容管实现的参量分频器, 634
 - 13.3.3 用带反馈的混频器作分频器, 647
 - 13.3.4 数字式分频器, 654
- 参考文献, 659
- 习 题, 665

第 14 章 计算机辅助设计

667

K.C.Gupta

- 14.1 CAD 的基本内容, 667
- 14.2 电路元件的定模, 667
- 14.3 计算机辅助分析技术, 671
 - 14.3.1 通用散射矩阵分析法, 672
- 14.4 电路优化, 676
 - 14.4.1 模式搜索优化法, 677
 - 14.4.2 共轭梯度法, 679
- 14.5 非线性电路的 CAD, 683
 - 14.5.1 线性和非线性子网络, 683
 - 14.5.2 谐波平衡法, 684
 - 14.5.3 非线性电路的优化, 685
- 14.6 超级计算机的应用, 686
- 参考文献, 687

第 15 章 微波集成电路

689

M.Kumar, I.J.Bahl

- 15.1 引言, 689
- 15.2 材料, 689
 - 15.2.1 衬底材料, 690
 - 15.2.2 导体材料, 690
 - 15.2.3 介质材料, 692
 - 15.2.4 电阻薄膜, 693