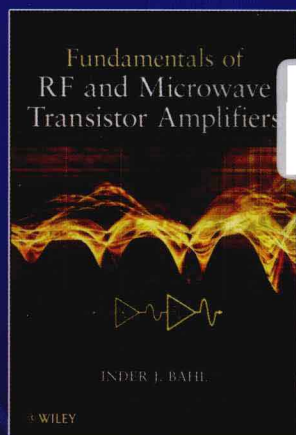


国外电子与通信教材系列

WILEY

# 射频与微波 晶体管放大器基础

## Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers



[美] Inder J. Bahl 著

鲍景富 孙玲玲 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

# 射频与微波晶体管放大器基础

Fundamentals of RF and Microwave  
Transistor Amplifiers

[美] Inder J. Bahl 著

鲍景富 孙玲玲 等译



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

## 内 容 简 介

本书全面讲解了射频与微波晶体管放大器的各种类型,包括低噪声、窄带、宽带、线性、高功率、高效率、高压放大器,以及离散、单片集成与混合集成放大器。主要的研究主题包括晶体管建模、分析、设计、表征、测量、封装、热设计及制造技术。本书特别强调理论与实践的结合,读者将了解并学会解决与放大器相关的各类设计问题,从放大器的匹配网络设计、偏置电路设计到稳定性分析等。超过 160 道的习题有助于提高读者对基本的放大器和电路设计技巧的掌握。

本书注重理论、联系实践,可作为高等院校电子信息工程专业的高年级本科生或研究生的教材,也可作为广大教师、科研工作者和从事相关工作的专业技术人员的参考手册。

Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers, Inder J. Bahl

Copyright ©2009 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, INC.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-8185

## 图书在版编目(CIP)数据

射频与微波晶体管放大器基础/(美)巴尔(Bahl,I.J.)著;鲍景富等译.—北京:电子工业出版社,2013.3  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers

ISBN 978-7-121-19639-3

I. ①射… II. ①巴… ②鲍… III. ①晶体管-功率放大器-高等学校-教材 IV. ①TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 031578 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

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:32 字数:901 千字

印 次:2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价:75.00 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。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 译 者 序

放大器是射频电子系统中的关键部件，也是有源电路体系中最早的电路之一，经过长期的发展，从真空管放大器到半导体器件再到集成电路，已经发展得相当成熟。现代功率放大器技术已不再是单纯的类似于早期的功率放大器，而是一个浓缩的电子系统，不仅包含模拟电路，也包含数字电路、基带电路的处理，调制和解调，还有软件算法等。尽管在放大器技术方面已有大量的文章和书籍及各种会议论文，但是还没有一本内容全面且理论与实践相结合的参考书籍，而这本书弥补了这个空白。

本书的内容包括：放大器的基本知识、放大器的定义、放大器的分类等；晶体管及模型；匹配网络电路的基础元件，如微带线、共面线分布元件及电容、电阻、电感等集总元件；阻抗匹配技术，如窄带匹配和宽带匹配技术，高效放大技术，宽带放大技术，线性化技术，高压放大技术，混合放大器设计，单片式放大器设计，热设计稳定性分析，偏置电路设计，功率合成，可集成放大器技术，放大器的封装，以及晶体管和放大器的测试技术。书中给出了超过 160 道的习题，可以帮助读者检测自身对于放大器的理解和电路设计的熟练程度，并且一半以上的习题都反映了实际中常见的问题。

本书适用于各个层次的读者，包括高年级的本科生，业余无线电爱好者，也可以作为教师使用的高频电路课程的教学辅导书；对于企业中的科技开发人员和工程技术人员，也可以通过本书拓宽射频与微波晶体管放大器的知识面。

本书的全部翻译工作由鲍景富和孙玲玲负责。在翻译过程中，许多研究生也参与了翻译工作，他们是张东旭、张韧、李晨阳、陶莲娟、王方圆、董华飞、邓成、金绍春、寇波等。在出版过程中得到了教育部射频电路与系统重点实验室及浙江省电路与系统重中之重学科的支持，也得到了电子工业出版社编辑的帮助和支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，文字、语句不通或者不正确的地方难免出现，敬请读者批评指正。

# 前 言<sup>①</sup>

放大器的使用是解决高性能、低成本的射频和微波前端系统至关重要的方案。到目前为止，有关放大器知识的文献有很多，它们大多出现在各种技术期刊、会议论文、书籍的章节甚至整本书之中。然而，还没有一本将放大器理论和工作实践相结合的综合书籍，为了填补这个不足，我们出版了这本书。

本书总结了作者 30 多年来设计晶体管放大器的各种经验，作者曾经积极推动了放大器从概念到产品形成的各种类型的设计。该书对射频(RF)与微波低噪声放大器和功率放大器电路进行了详细的介绍，包括低噪声、窄带、宽带、线性、高功率、高效率 and 高压放大器，讨论的主题包含建模、分析、设计、封装、热分析和制作工艺。本书各章相互融合，覆盖了放大器理论与实践的各个方面。本书内容丰富，不仅包括具体的实验，而且包含大量方程、表格、图表和设计实例，同时还把放大器电路的理论和实践以独特的方式结合在一起，阐述了与匹配电路、偏置电路和稳定性相关的放大器设计问题。书中的实例(80 个以上已有解决方案)能够使读者很容易地理解放大器的设计概念。

简单的设计方程可以帮助读者理解设计概念，除了书中的很多例子，本书的 160 多道习题有助于测试读者的基本放大器知识和电路设计技能。本书强调理论、设计和实际经验，适合于相关专业的高校生、教师、科研工作者和应用工程师使用。要求学生具有固态电路基础、传输线理论、电路基本理论、本科水平的电磁理论等知识。希望读者通过本书获得益处，理解射频与微波晶体管放大器的电路设计。

本书的特色在于对晶体管放大器的深入研究，给出了大量的设计数学方程和图表，以及实际的放大器电路设计实例和制作技术的描述。本书从更广的角度来分析固态晶体管放大器，各章分别阐述了稳定性分析、高效率放大器、宽带放大器、单片式放大器、高压设计、放大器的偏置、热设计、功率合成、集成放大器和放大器的测量。本书并没有给出任何特定的应用，但是其目的在于用理论和实际的知识给放大器设计提供基本原理的重要背景材料。近几年出版了大量的书籍，论述了采用硅双极型技术和 CMOS 技术来设计 RF 和微波电路已经取得了巨大的进步。由于放大器的设计主要是基于模拟设计的概念并且已有几本有关这方面的著作，所以此书也只能覆盖有限的范围。

本书分为 22 章，每章包含了放大器知识的各个方面。这些章给出了在晶体管放大器中使用的基本原理、分析方法、技术特点和设计思路，提供了 RF 和微波晶体管放大器分析和设计的基础。每章都有放大器的设计步骤和实例，这些方法有助于解答学生的任何疑点及提高设计技能。此外，由于各种元件、设备和电路的技术信息与评论可以丰富读者的微波技术知识，因此在内容的选择和表达方式方面也希望能满足读者的期望。与其他书籍一样，为了使读者深入地理解本书，同样包含或引用了他人的一些富有成效的工作成果。最后，本书列举了一系列的参考文献，并且每章之后都附有一组习题。

第 1 章介绍了晶体管放大器和在商业和军事系统中的应用。第 2 章建立了基本的放大器分

<sup>①</sup> 书中的一些图示、符号、字体沿用了本书英文原版的写作风格，特此说明。

析参数与 RF 和微波网络的表述,介绍了基本多端口网络分析工具,如阻抗、导纳、*ABCD* 参数和散射技术,根据研究者或设计者的熟悉情况建立多端口网络矩阵的转换关系。

第 3 章给出了放大器术语的定义和特征。定义了基本的放大器参数,并简单介绍了可靠性。本章的目的在于定义放大器的特征以备快速参考。第 4 章是关于晶体管的描述,包括硅双极型、GaAs FET 和 GaAs pHEMT、GaAs HBT、Si MOSFET 和 SiGe HBT,这些尽管是有限的讨论,但是对于学生 and 设计工程师还是很有价值的。第 5 章是关于线性和非线性晶体管模型,这些模型确立了等效电路的方程,也是放大器设计的核心。器件模型在低噪声和低功率方面得到了应用,这些器件包括 MESFET、pHEMT、HBT 和 MOSFET 等。等效电路模型、模型规模、源牵引和负载牵引的特征也在这一章得到了详细的介绍。

第 6 章给出了传输线和集总元件的基本原理与特征。由于本书主要是针对平面电路,因此描述了通用的平面传输介质的特点,如微带线、共面波导等,也包含了微带线的不连续性和耦合知识;集总元件设计的电容器、电感器和电阻器在本章最后给出。这些知识很自然地在第 7 章继续讨论,并重点分析阻抗匹配网络,它是微波电路与系统的基础。第 7 章讨论了阻抗匹配电路的窄带和宽带设计技术与应用,最后考虑了实际的实现方法。

第 8 章讨论了各类放大器的通用分析方法,也给出了多种用于高效率应用的放大器的分类比较。高效率放大器可通过工作在 B 类或 C 类的晶体管获得,也可以通过工作在 E 类或 F 类的负载阻抗获得。开关模式的 E 类调谐功率放大器在 RF 低频段方面得到广泛使用,而 F 类放大器的方法可上升到较高的微波频段。实际的高效率放大器设计在以后的各章中会有详细的描述。

接下来的 5 章描述了放大器的设计,第 9 章是关于放大器的多种设计方法。基本的放大器设计方法包括线性和非线性。采用强大的 CAD 工具,通过时域和频域仿真的非线性电路分析对不同应用的功率放大器进行设计和优化,其中的优势包括预测非线性行为的准确性,使复杂的单片微波集成电路(MMIC)设计一次成功,缩短了开发时间并节约了研制成本。本章列出了 GaAs FET、pHEMT、HBT 和 Si CMOS、SiGe HBT 放大器的设计步骤和典型的设计实例。以第 8 章中的资料为背景,第 10 章中讨论了高效率放大器的设计技术,对重要部分进行了深入的描述,从过驱动 A 类放大器到高 PAE 谐波调整技术,讨论了高效率放大器的设计实例和重要的设计思想。

第 11 章介绍了宽带放大器的设计。放大器的带宽也是一个重要的参数,考虑了几种宽带放大器的设计方法,包括电抗/电阻式、反馈、平衡和分布式放大器。讨论了宽带放大器的关键设计考虑,这些电路具有广泛的应用,尤其是在电子战、对抗技术和支持系统中。第 12 章描述了线性放大器的设计,强调了元件在设计过程中的重要性和每个元件在不同电路中的设计考虑及设计限制等。线性化技术同设计过程、实现方法和特殊的要求一起讨论。

第 13 章介绍了高压晶体管,其技术发展飞快并获得了广泛的认可和应用。讨论了基于放大器的高压晶体管的优、缺点,考虑了硅双极型晶体管、LDMOS、GaAs MESFET、pHEMT 和 HBT、SiC MESFET、GaN HEMT 器件及它们的设计技术。描述了混合式和单片式高压放大器,分析了采用数个低压晶体管级联式的高压工作模式。

通过前面章节的学习,希望读者学会微波集成电路(MIC)放大器的设计和制作,基于多年的经验,作者认为这些电路的制作是比较复杂的。第 14 章和第 15 章分别给出了混合式和单片式 MIC 放大器的类型、设计考虑、制作步骤及设计准则,其中列举了大量的资料,希望读者对混合 MIC 和单片 MIC 设计与制作的基底和材料有更好的选择,并列举了混合 MIC 放大器的实例。第 15 章涉及 MMIC 放大器,讨论了放大器的几种类型,并给出了一些 MMIC 实例。

接下来的 4 章主要阐述了几种放大器类型的实际设计,包括热设计、稳定性分析、偏置网络

和功率合成。第16章描述了功率放大器的热设计,讨论了晶体管和放大器的通道温度计算模型及热电阻的现实问题。第17章从理论和实际角度出发,通过几个例子讨论了放大器的稳定性。

第18章介绍了偏置电路,它也是科学设计放大器的另一个重要方面。首先讨论了晶体管的偏置类型,然后是偏置网络的详细描述,以及多级放大器的偏置电路和功率放大器偏置的低频稳定性。第19章概述了功率合成技术。描述了功率合成技术的基本原理,阐述了器件级和电路级合成技术之间的不同点,包含功率合成器、混合器和耦合器的设计与分析方法。其中给出了基于组合 HPA 而形成的多芯片 MMIC 的实例。

当代民用和军事系统中的放大器应用要求有较高的性价比。获得低成本的一种最常用的方法是在单一的 MMIC 放大器芯片或一个封装和组件上集成更多的功能。例如,高集成度的 MMIC 芯片减少了芯片数量和互连线路,进而减小了测试难度,降低了模块和子系统的成本,并增加了可靠性。第20章给出了集成类型的实例,如限幅器/LAN、发射传输链、增益和输出功率可变的放大器、放大器的嵌入功率监控电路、增益温度补偿及输出失配保护。

第21章介绍了放大器的封装。描述了塑料和陶瓷封装,详细介绍了陶瓷封装和腔体设计,简单讲解了芯片焊接和引线键合技术。第22章包含了放大器和晶体管的测量。首先介绍了晶体管的特点,然后是放大器测试,如  $S$  参数、噪声系数、源牵引和负载牵引、电压驻波比、输出和输入功率的关系、PAE、谐波、失真、相位噪声及恢复时间。最后,为了读者的设计方便,本书中增加了一些附录。

对于本科高年级学生或研究生,本书内容足够用于一学年的课程。合理选择特定的章节,可以使本书用于一学期、两学期或半学期的课程。大部分章节的最后给出了习题,并且已经在课堂上测试了习题的难度和复杂度,保证这些习题适用于学生。

感谢那些在微波工程进步中做出了先驱工作的同事们,以及感激指引作者进入微波放大器领域的 Edward L. Griffin 博士,他审阅了本书的原稿并提出了许多宝贵的意见。在 Tyco Electronics 和其他地方的许多朋友和合作者对本书的完整性起到了积极的作用。特别感谢 George Studtmann 先生,他认真审阅和仔细编辑了全部原稿,对修辞的改进提出了许多建议,同时提供了许多 HBT 放大器的例子。对于 Mark Dayton、Andy Peake、Tom Winslow、Jain Zhao、James Perdue 和 Gordon Tracy 的大力支持,作者表示衷心的感谢。为了本书的编写和出版,相关的工作部门和一些赞助个人起到了决定性的作用,他们是 David Conway、Michael Rachlin、Janice Blackwood 和 Neil Alls。Linda Blankenship 熟练地将本书手写稿转化为 Word 文档,在此特别感谢。感谢 Tyco Electronics 的支持和鼓励,此书能够顺利出版还得益于 George Telecki 的大力支持,以及 Lucy Hitz 和 Lisa Morano 等 John Wiley & Sons 公司员工的努力。

最后,要对我的妻子 Subhash Bahl 表示深深的感激,由于她无微不至的关爱和默默无闻的支持,使我得以完成这项艰巨的任务。还要感谢我的女儿 Preeti、女婿 Ashutosh、儿子 Puneet、孙子 Karan 和 Rohan,我们互相鼓励和支持,这些成绩也应更多地归功于他们。

Inder J. Bahl

# 目 录

第 1 章 引言	1	3.10.1 噪声系数	36
1.1 晶体管放大器	1	3.10.2 噪声温度	36
1.2 晶体管放大器的早期历史	2	3.10.3 噪声带宽	36
1.3 晶体管放大器的优点	3	3.10.4 最佳噪声匹配	37
1.4 晶体管	3	3.10.5 等噪声系数圆和等增益圆	37
1.5 放大器的设计	4	3.10.6 输入和噪声同时匹配	38
1.6 放大器制造技术	5	3.11 动态范围	39
1.7 放大器的应用	6	3.12 多级放大器特性	40
1.8 放大器的成本	9	3.12.1 多级放大器 IP3	40
1.9 目前的趋势	10	3.12.2 多级放大器 PAE	41
1.10 本书的结构	10	3.12.3 多级放大器噪声系数	42
参考文献	12	3.13 栅极和漏极的推移因子	43
第 2 章 线性网络分析	14	3.14 放大器的温度系数	44
2.1 阻抗矩阵	14	3.15 平均失效时间	44
2.2 导纳矩阵	16	参考文献	45
2.3 ABCD 参数	17	习题	46
2.4 S 参数	18	第 4 章 晶体管	47
2.4.1 单端口网络的 S 参数	22	4.1 晶体管类型	47
2.5 双端口参数之间的关系	23	4.2 硅双极型晶体管	48
参考文献	24	4.2.1 关键性能参数	50
习题	24	4.2.2 硅双极型晶体管的高频噪声特性	51
第 3 章 放大器特性和定义	26	4.2.3 功率特性	52
3.1 带宽	26	4.3 GaAs MESFET	52
3.2 功率增益	26	4.3.1 小信号等效电路	55
3.3 输入和输出电压驻波比	29	4.3.2 性能参数	56
3.4 输出功率	30	4.3.3 MESFET 器件的高频噪声特性	58
3.5 功率附加效率	30	4.4 异质结场效应晶体管	60
3.6 交调失真	31	4.4.1 HEMT 器件的高频噪声性能	61
3.6.1 IP3	31	4.4.2 磷化铟 pHEMT 器件	61
3.6.2 ACPR	32	4.5 异质结双极型晶体管	63
3.6.3 EVM	33	4.5.1 HBT 的高频噪声特性	65
3.7 谐波功率	33	4.5.2 SiGe 异质结双极型晶体管	66
3.8 峰均比	33	4.6 MOSFET	67
3.9 合成器效率	34		
3.10 噪声特性	35		



参考文献	69	6.4.4 线允许的最大电流	114
习题	71	6.5 宽带电感	114
<b>第5章 晶体管模型</b>	72	参考文献	115
5.1 晶体管模型的类型	72	习题	116
5.1.1 基于物理学/电磁学理论的模型	72	<b>第7章 阻抗匹配技术</b>	117
5.1.2 解析或混合模型	73	7.1 单端口和双端口网络	117
5.1.3 以测量结果为基础的模型	73	7.2 窄带匹配技术	118
5.2 MESFET 模型	77	7.2.1 集总元件匹配技术	118
5.2.1 线性模型	77	7.2.2 传输线匹配技术	122
5.2.2 非线性模型	82	7.3 宽带匹配技术	128
5.3 pHEMT 模型	83	7.3.1 增益-带宽限制	128
5.3.1 线性模型	83	7.3.2 集总元件宽带匹配技术	130
5.3.2 非线性模型	85	7.3.3 传输线宽带匹配网络	132
5.4 HBT 模型	86	7.3.4 巴伦型宽带匹配技术	136
5.5 MOSFET 模型	86	7.3.5 T形桥式匹配网络	139
5.6 BJT 模型	87	参考文献	140
5.7 晶体管模型缩放	88	习题	140
5.8 源牵引和负载牵引数据	89	<b>第8章 放大器分类及分析</b>	142
5.8.1 理论负载牵引数据	89	8.1 放大器的分类	142
5.8.2 测试功率和 PAE 的源牵引和负载牵引	91	8.2 A 类放大器的分析	144
5.8.3 测试 IP <sub>3</sub> 的源和负载阻抗	93	8.3 B 类放大器的分析	146
5.8.4 源和负载阻抗尺度变化	94	8.3.1 单端式 B 类放大器	146
5.9 依赖温度的模型	95	8.3.2 推挽式 B 类放大器	147
参考文献	95	8.3.3 过激励 B 类放大器	149
习题	98	8.4 C 类放大器的分析	150
<b>第6章 匹配电路的元件</b>	99	8.5 E 类放大器的分析	151
6.1 阻抗匹配元件	99	8.6 F 类放大器的分析	154
6.2 传输线匹配元件	100	8.7 不同种类放大器的比较	156
6.2.1 微带线	100	参考文献	159
6.2.2 共面线	105	习题	160
6.3 集总元件	106	<b>第9章 放大器设计方法</b>	162
6.3.1 电容	106	9.1 放大器的设计	162
6.3.2 电感	107	9.1.1 晶体管类型和制造工艺	162
6.3.3 电阻	110	9.1.2 晶体管尺寸的选择	163
6.4 键合线电感	111	9.1.3 设计方法	163
6.4.1 单线	111	9.1.4 电路拓扑	163
6.4.2 地平面效应	112	9.1.5 电路分析和优化	164
6.4.3 多路线	112	9.1.6 稳定性和热分析	164
		9.2 放大器设计技术	165
		9.2.1 负载线法	165

9.2.2	低损耗匹配设计技术	167	11.2.3	平衡放大器	238
9.2.3	非线性设计方法	169	11.2.4	分布式放大器	241
9.2.4	Taguchi 实验法	170	11.2.5	有源宽带匹配技术	249
9.3	匹配网络	173	11.2.6	共源共栅结构	252
9.3.1	电抗/电阻性匹配网络	173	11.2.7	宽带技术的比较	252
9.3.2	群匹配技术	175	11.3	宽带功率放大器设计的考虑	
9.4	放大器设计的例子	176	事项	253	
9.4.1	低噪放设计	176	11.3.1	拓扑图的选择	253
9.4.2	最大增益放大器设计	178	11.3.2	器件长宽比	253
9.4.3	功放设计	180	11.3.3	低损耗匹配网络	253
9.4.4	多级驱动放大器的设计	183	11.3.4	增益平坦技术	254
9.4.5	GaAs HBT 功放	187	11.3.5	谐波终端	254
9.5	基于硅的放大器设计	191	11.3.6	热设计	254
9.5.1	Si IC LNA	191	参考文献	254	
9.5.2	Si IC 功率放大器	192	习题	255	
参考文献		197	<b>第 12 章 线性化技术</b>	256	
习题		198	12.1	非线性分析	256
<b>第 10 章 高效率放大器技术</b>		200	12.1.1	单音信号分析	257
10.1	高效率设计	200	12.1.2	双音信号分析	258
10.1.1	过驱动放大器设计	202	12.2	相位失真	260
10.1.2	B 类放大器设计	203	12.3	功率放大器的线性化技术	261
10.1.3	E 类放大器设计	209	12.3.1	脉冲掺杂器件及匹配	
10.1.4	F 类放大器设计	212	优化	261	
10.2	谐波作用放大器	217	12.3.2	预失真技术	264
10.3	谐波注入技术	218	12.3.3	前馈技术	264
10.4	谐波控制放大器	219	12.4	提高线性放大器效率的技术	265
10.5	高 PAE 设计考虑	219	12.4.1	反相	265
10.5.1	谐波调节平台	220	12.4.2	Doherty 放大器	266
10.5.2	匹配网络损耗计算	222	12.4.3	包络消除与恢复	268
10.5.3	匹配网络损耗的减小	223	12.4.4	自适应偏置	268
参考文献		224	12.5	线性放大器的设计	269
习题		228	12.5.1	放大器增益	269
<b>第 11 章 宽带放大器</b>		229	12.5.2	减小源和负载失配	270
11.1	晶体管的带宽限制	229	12.6	线性放大器设计实例	270
11.1.1	晶体管的增益滚降	229	参考文献	276	
11.1.2	变化的输入和输出阻抗	230	习题	279	
11.1.3	功率-带宽积	230	<b>第 13 章 高压功率放大器设计</b>	280	
11.2	宽带放大技术	230	13.1	高压晶体管性能概述	280
11.2.1	电抗/电阻性拓扑	231	13.1.1	优点	281
11.2.2	反馈放大器	235	13.1.2	应用	282

13.2	高压晶体管	282	15.2.2	MMIC 基底	322
13.2.1	Si 双极型晶体管	282	15.2.3	MMIC 有源器件	322
13.2.2	Si LDMOS 晶体管	283	15.2.4	MMIC 匹配元件	323
13.2.3	GaAs 场板 MESFET	284	15.3	MMIC 设计	327
13.2.4	GaAs 场板 pHEMT	285	15.3.1	CAD 工具	327
13.2.5	GaAs HBT	285	15.3.2	设计流程	327
13.2.6	SiC MESFET	285	15.3.3	EM 仿真器	328
13.2.7	SiC GaN HEMT	286	15.4	设计实例	330
13.3	高压放大器设计的必要考虑	287	15.4.1	低噪声放大器	330
13.3.1	有源器件的热设计	287	15.4.2	大功率限幅器/LNA	331
13.3.2	无源元件的功率处理	288	15.4.3	窄带 PA	331
13.4	功率放大器设计实例	294	15.4.4	宽带 PA	331
13.4.1	高压混合放大器	294	15.4.5	超宽带 PA	334
13.4.2	高压单片式放大器	296	15.4.6	高功率放大器	336
13.5	宽带 HV 放大器	298	15.4.7	高效率 PA	338
13.6	串联 FET 放大器	300	15.4.8	毫米波 PA	338
	参考文献	302	15.4.9	无线功率放大器设计	
	习题	305		实例	339
<b>第 14 章</b>	<b>混合放大器</b>	<b>306</b>	15.5	CMOS 制造	341
14.1	混合放大器技术	306		参考文献	343
14.2	印制电路板	306		习题	345
14.3	混合集成电路	307	<b>第 16 章</b>	<b>热设计</b>	<b>346</b>
14.3.1	薄膜 MIC 技术	310	16.1	热力学基础	346
14.3.2	厚膜 MIC 技术	311	16.2	晶体管热设计	348
14.3.3	共烧陶瓷和玻璃——陶瓷技术	311	16.2.1	Cooke 模型	348
14.4	内匹配功率放大器设计	312	16.2.2	单栅热模型	349
14.5	低噪声放大器	313	16.2.3	多栅热模型	349
14.5.1	窄带低噪声放大器	313	16.3	放大器热设计	351
14.5.2	超宽带低噪声放大器	314	16.4	脉冲工作	354
14.5.3	宽带分布式低噪声放大器	315	16.5	导热槽设计	356
14.6	功率放大器	316	16.5.1	传导降温和强制降温	358
14.6.1	窄带功率放大器	316	16.5.2	设计实例	358
14.6.2	宽带功率放大器	318	16.6	热阻测量	359
	参考文献	318	16.6.1	IR 成像测量	359
	习题	319	16.6.2	液晶测量	360
<b>第 15 章</b>	<b>单片放大器</b>	<b>320</b>	16.6.3	电气测量技术	361
15.1	单片放大器的优点	320		参考文献	362
15.2	单片 IC 技术	320		习题	363
15.2.1	MMIC 制作	321	<b>第 17 章</b>	<b>稳定性分析</b>	<b>364</b>
			17.1	偶模振荡	364

17.1.1	偶模稳定性分析	365	19.6	隔离电阻的功率处理	418
17.1.2	偶模振荡消除技术	370	19.7	空间功率合成	418
17.2	奇模振荡	371	19.8	功率合成技术的比较	419
17.2.1	奇模稳定性分析	372	参考文献		420
17.2.2	奇模振荡抑制技术	379	习题		421
17.2.3	分布式放大器的不稳定性	379	<b>第 20 章 集成的功能放大器</b>		423
17.3	参数式振荡	379	20.1	集成的限幅器/LNA	423
17.4	杂散参数式振荡	380	20.1.1	限幅器/LNA 拓扑结构	423
17.5	低频振荡	381	20.1.2	限幅器的要求	424
参考文献		382	20.1.3	肖特基二极管设计与限幅器结构	425
习题		383	20.1.4	10 W 限幅器/LNA 设计	426
<b>第 18 章 偏置网络</b>		384	20.1.5	测试数据与讨论	429
18.1	晶体管偏置	384	20.2	发射链	430
18.1.1	晶体管偏置点	384	20.2.1	可变增益放大器	432
18.1.2	偏置方案	385	20.2.2	可变功率放大器	434
18.2	偏置电路设计需要考虑的条件	389	20.2.3	放大器的温度补偿	435
18.2.1	微带偏置电路	389	20.2.4	功率监视/检测	436
18.2.2	集总元件偏置电路	391	20.2.5	负载失配保护	440
18.2.3	高 PAE 偏置电路	393	20.3	放大器的级联	441
18.2.4	迁移电流限制	394	参考文献		441
18.3	自偏置技术	394	习题		443
18.4	多级放大器偏置	396	<b>第 21 章 放大器封装</b>		444
18.5	偏置电路的低频稳定性	397	21.1	放大器封装概述	444
18.6	偏置顺序	398	21.1.1	历史简介	445
参考文献		398	21.1.2	封装类型	447
习题		398	21.2	封装材料	448
<b>第 19 章 功率合成</b>		400	21.2.1	陶瓷	448
19.1	器件级功率合成	400	21.2.2	高分子化合物	448
19.2	电路级功率合成	402	21.2.3	金属	448
19.2.1	功能衰减	404	21.3	陶瓷封装设计	449
19.2.2	功率合成效率	405	21.3.1	RF 馈通的设计	449
19.3	功分器、正交混合网络和耦合器	407	21.3.2	腔孔设计	451
19.3.1	功分器	407	21.3.3	偏置线	452
19.3.2	90°混合网络	410	21.3.4	陶瓷封装结构	452
19.3.3	耦合线定向耦合器	410	21.3.5	陶瓷封装模型	453
19.4	$N$ 路合成器	413	21.4	塑料封装设计	453
19.5	共同合成器结构	415	21.4.1	塑料封装	454
			21.4.2	塑料封装模型	454
			21.5	封装组装	455

21.5.1	芯片贴装	455	22.3.1	AM-AM 和 AM-PM	473
21.5.2	芯片引线键合	456	22.3.2	IP3/IM3 测量	474
21.5.3	陶瓷封装的组装	457	22.3.3	ACPR 测量	475
21.5.4	塑料封装的组装	458	22.3.4	NPR 测量	475
21.5.5	密封和包装	459	22.3.5	EVM 测量	476
21.6	热性能考虑	459	22.4	相位噪声测量	476
21.7	封装使用的 CAD 工具	460	22.5	恢复时间测量	478
21.8	功率放大器模块	460	参考文献		480
参考文献		461	习题		481
习题		462	附录 A	物理常数和其他数据	482
<b>第 22 章</b>	<b>晶体管 and 放大器的测量</b>	<b>463</b>	附录 B	单位和符号	483
22.1	晶体管测量	463	附录 C	频带命名	485
22.1.1	$I$ - $V$ 测量	463	附录 D	分贝单位	486
22.1.2	$S$ 参数测量	464	附录 E	数学关系式	489
22.1.3	噪声参数测量	467	附录 F	史密斯圆图	490
22.1.4	源牵引和负载牵引测量	468	附录 G	图形符号	491
22.2	放大器测量	470	附录 H	首字母缩略词及缩写词	492
22.2.1	使用 RF 探针测量	470	附录 I	符号列表	497
22.2.2	驱动放大器和 HPA 的 测试	471	附录 J	多通道与调制技术	500
22.2.3	大信号输出 VSWR	472			
22.2.4	噪声系数测量	473			
22.3	失真测量	473			

# 第1章 引言

在电子电路中,信号放大是最重要的射频(RF)和微波功能之一。第二次世界大战期间出现的雷达,产生了需要微波信号放大的第一个重要应用。在近代,无线通信的革新,使得射频和微波放大器应用场所激增。在过去的二十年间,放大器技术在器件(低噪声和放大器件)、电路计算机辅助设计(CAD)工具、工艺、封装和应用方面取得了巨大的进步。由于无线应用领域的大规模使用,使得低成本功率放大器(PA,简称功放)的使用成为现实。

早期的微波放大器是昂贵的真空电子管器件,如速调管<sup>[1~3]</sup>、行波管(TWT)放大器<sup>[2~4]</sup>和磁控管<sup>[2,3]</sup>。今天,除了高功率的应用(大于等于100 W)之外,其他微波放大器均采用固态放大器。现在,最常见的真空管应用是900 W微波炉中使用的2.45 GHz磁控管。真空管放大器能达到的功率在 $10^3$ 量级,比固态放大器的功率量级高。微波炉中的磁控管,它的制造成本为10美元(约为0.01美元/W),目前在固态器件中无法找到性价比相似的产品。同样,手机中0.5美元/W的900 MHz~2 GHz的固态放大器,以及基站中0.3美元/W的200~500 W应用在L/S波段的晶体管放大器,也没有可以与之相比的真空管放大器。

固态放大器有两个大类:基于两端的负阻二极管器件,以及基于三端的晶体管器件。早期的固态放大器主要是两端的器件,因为二极管通常比晶体管更容易生产。随后产生了一系列的两端放大器,包括参量放大器(变容二极管)<sup>[5~8]</sup>、隧道二极管<sup>[7~9]</sup>、转移电子放大器(耿氏二极管和雪崩二极管)<sup>[8,10,11]</sup>,雪崩渡越时间二极管(IMPATT, TRAPATT, BARITT)<sup>[8,12]</sup>。这些二极管通常用在需要特殊放大功能的场合。

## 1.1 晶体管放大器

今天,固态放大器的主体是三端式晶体管<sup>[13~36]</sup>。当一个公用端接地时,在器件的输入端加一个较小的电压,可以有效地控制输出端的一个较大的电流。这也是晶体管(transistor)这个名字的由来,是“转移”(transfer)和“电阻”(resistor)两个词的结合。

固态晶体管可以分为两个大类:双极型和单极型器件。双极型器件由硅(Si)双极型晶体管(BJT)、锗化硅(SiGe)和砷化镓(GaAs)异质结晶体管组成。单极型器件包括硅金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、砷化镓金属半导体场效应晶体管(MESFET)和赝高电子迁移率晶体管(pHEMT)。从两端器件转向三端器件的主要原因是成本。通常二极管的生产成本比三端器件要低,但是对于为了获得放大器增益的附属电路来说,二极管的附属电路要比三端器件的附属电路昂贵很多。例如,一个晶体管(无任何匹配网络)连接至50  $\Omega$  输入/输出端,可以在射频范围产生15~20 dB的增益,在20 GHz也有6~8 dB的增益。而且设计稳定的三端放大器很容易大规模生产。

在射频和微波系统中,信号放大功能是一个基本的功能。当一个幅度微弱的信号通过一个由直流(DC)电源供电的器件而得到放大时,这个器件及这个器件周围的匹配和偏置电路就称为放大器。这里直流信号转换为射频信号以增加输入信号的幅度。如果这个器件是晶体管,则信号被送入输入端(栅极或者基极),放大的信号从输出端(漏极或者集电极)输出,公共端(源极或者发射极)通常是接地的。匹配网络用来激励器件,并且使器件更有效地输出信号。图1.1显示了一个代

表单端晶体管放大器的原理图，其主要的组成部分是一个晶体管、输入和输出匹配网络、偏置电路、输入和输出的射频连接点。如果芯片要进行封装，然后放置在一个固定的装置里或者需要引线时，可以把直流偏置和射频连接点做成转接头，具体方法根据放大器的生产方案来确定。

在射频和微波频段有许多种类的放大器。基本的放大器种类包括低噪声放大器、缓冲放大器、可变增益放大器、线性功率放大器、饱和和高功率放大器、高效率放大器、窄带放大器和宽带放大器。放大器的设计需要有必要的器件模型或  $S$  参数、CAD 工具、匹配和偏置网络及制造技术。对每种放大器需要进行更深入的理解，以便达到放大器设计的具体要求。例如，一个低噪声放大器(LNA, 也称为低噪放)需要一个低噪声的器件和一个低损耗的输入匹配网络，而一个功率放大器则需要一个功率器件和一个低损耗的输出匹配网络。

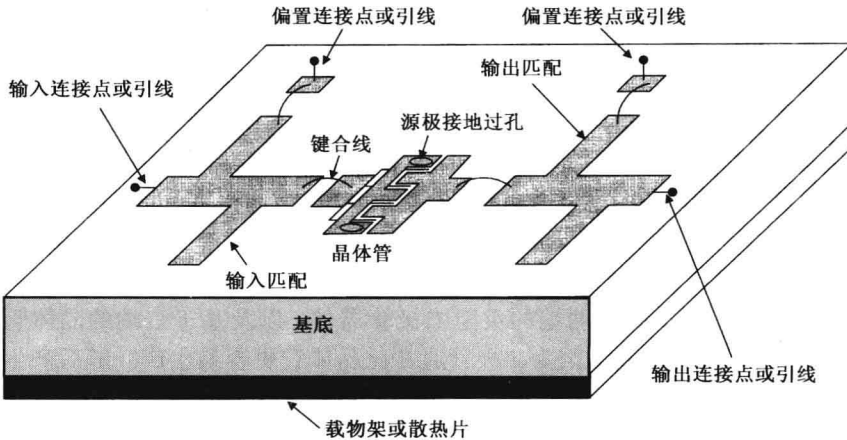


图 1.1 晶体管放大器的原理图

射频和微波放大器有以下特点：

- 带限的射频响应。
- 低于 100% 的 DC 到 RF 信号的转换效率。
- 具有可以在多路信号产生混频输出的非线性特性。
- RF 可耦合并且没有 DC 响应。
- 依赖于功率的幅度，输出端和输入端相位不同。
- 依赖于温度的增益，温度越低则增益越高，反之亦然。

## 1.2 晶体管放大器的早期历史

使用硅双极型晶体管和砷化镓场效应晶体管的放大器，分别从 20 世纪 60 年代中期和 70 年代早期开始有报道。对于大部分的早期产品，硅双极型晶体管放大器是在 C 波段以下，而砷化镓场效应晶体管放大器是在 L 波段以上(见附录 C 中的频段分类)。低噪声的 HEMT(高电子迁移率场效应晶体管)在 20 世纪 80 年代早期就有报道。具有工作频带从 S 波段到 X 波段的内匹配的窄带场效应晶体管功率放大器则是在 20 世纪 80 年代产生的，Ku 波段的放大器在 20 世纪 90 年代初产生。

砷化镓单片微波集成电路(MMIC)放大器于 1976 年被报道，从此以后低噪声放大器和功率放大器都取得了巨大的进步。一些单片微波集成电路放大器的早期发展的重要事件如下：

- 1976年,产生了X波段低功率砷化镓金属半导体场效应晶体管(MESFET)放大器。
- 1979年,产生了X波段砷化镓MESFET功率放大器。
- 1979年,产生了K波段砷化镓MESFET低噪声放大器。
- 1986年,产生了Q波段砷化镓MESFET功率放大器。
- 1988年,产生了V波段砷化镓HEMT低噪声放大器。
- 1989年,产生了X波段砷化镓HEMT功率放大器。
- 1992年,产生了W波段HEMT低噪声/功率放大器。

### 1.3 晶体管放大器的优点

相对于电子管放大器而言,晶体管放大器的主要优点是具有更小的尺寸、更轻的重量、更高的可靠性、较高的集成性能、大批量和高产出的性能,还有各种各样的应用。晶体管有更长的使用寿命(大约数百万小时),并且需要的预热时间短很多。固态放大器也不需要像电子管那样在长时间工作的情况下对偏置或电路进行校正。

同固态二极管放大器相比,晶体管放大器在设计匹配网络、实现高稳定性电路和级联放大器以获得高增益等方面具有更高的灵活性。单片放大器取得的杰出成就归功于三端晶体管,尤其是砷化镓基底的三端晶体管,单片放大器是以组为单位在晶圆上加工,成百上千的单片放大器可以同时制作出来。例如,超过15 000个放大器可以在一个直径为6英寸<sup>①</sup>的砷化镓晶圆上制作出来,其中每个放大器的芯片尺寸为1 mm<sup>2</sup>。因此单片放大器在每个芯片的制作成本上有很大的优势。总体来说,相对于混合集成技术,单片放大器在芯片尺寸和重量上有优势。值得一提的是,一个单独或分离的片式电阻、片式电容或一个电感的重量,通常比整个单片放大器芯片还要重。如今,很多应用放大器的大功率容量的设备是手持式的。混合和单片的微波集成电路技术都是可用并且可靠的。但是,一个好的单片微波集成电路工艺流程更加可靠,因为它具有更少的步骤和连接线。

### 1.4 晶体管

过去的20年间,微波和毫米波晶体管的研究取得了很大的进展,低噪声、功率特性和工作电压方面都有很大进步。在低噪声器件中,pHEMT是最受欢迎的,因为它的低噪声指数和高增益特性,可以应用在小信号处理的器件上,如MESFET、MOSFET和SiGe HBT。现在的放大器设计者在使用分立器件(裸片或封装的形式)时有多种功率晶体管可供选择,也可以把设计功率放大器单片微波集成电路作为代工服务的一部分。可以用来发展功率放大电路的几种固态器件包括BJT、LD MOS(横向双扩散金属氧化物半导体)晶体管、MESFET,或者仅仅使用FET,GaAs和InP基的HEMT,GaAs基的HBT和SiC基的FET,以及GaN HEMT。每种器件技术都有其特定的优点,对于某种特定应用的最佳技术选择不仅要考虑技术方面的问题,而且要考虑经济因素,例如功率供给花费要求、研发产品的时间、推销产品的时间、已存和新兴的市场等因素。

HEMT具有最高的工作频率、最低的噪声系数,以及较高的功率和功率附加效率(PAE)。由于GaAs基底具有半绝缘特性,制作在GaAs上面的匹配网络和无源组件比硅基工艺器件具有更低的损耗。GaAs FET作为一个单独的晶体管已经广泛应用在宽带、中功率或大功率、高效率

<sup>①</sup> 1英寸=2.54厘米。



的混合微波集成电路(MIC)放大器之中。GaAs FET 的广泛应用得益于它的高工作频率并且具有较多的用途。然而,具有更好性能和更高工作频率的新器件越来越受到关注。HEMT 和 HBT 器件在微波和毫米波 IC 应用中具有潜在的优势,因为在 HEMT 中存在异质结来增加载流子的迁移特性,在 HBT 中存在 pn 结注入特性。HEMT 在性能上有超低噪声、高线性度、可以用在高频率等优势,使用如异介质和晶格匹配的 HEMT 等新结构生产的 MMIC,在功率、功率附加效率和高频特性(可达 280 GHz)上有显著的进步。应用含有多晶外延结构的 III-V 族化合物 pHEMT,使得从 Ku 至 W 波段的毫米波范围内有非常好的功率性能。HBT 是垂直取向的异质结构器件,并且当只有单电源供电时是一种很受欢迎的低成本功率器件,它比 FET 和 HEMT 具有更好的线性度和更低的相位噪声。

另一方面,双极型晶体管只需要单电源供电,泄漏更小,具有低的  $1/f$  噪声或相位噪声,硅基器件的生产成本更加便宜。SiGe HBT 具有和 Si 基 BJT 一样低成本的潜质,而电性能与 GaAs HBT 接近。因此在微波频段分立的 Si 基 BJT、SiGe HBT 和 MOSFET 在生产成本上要优于 GaAs FET、HEMT 和 HBT。对于高集成的射频前端来说,GaAs FET 和 HEMT 要优于双极型晶体管和 Si 基器件,因为它们是具有多功能的、性能更良好的、电容损耗更低的器件。在 Si 基器件和 GaAs 器件的电性能和成本的权衡中更偏向于 Si 基器件,因为它们具有单电源供电和生产成本低优点,而 GaAs 器件的优势在于超低的噪声、良好的功率性能(击穿电压很高)和良好的高频特性。

代工厂可以加工分立的晶体管,也可以加工单片的放大器。分立的晶体管可以有裸片形式和塑封或陶瓷封装形式。陶瓷封装的器件更适合高频率和高功率的应用场合,塑料封装形式的晶体管适合低成本、大批量的应用场合。

## 1.5 放大器的设计

射频和微波放大器的设计有几个方面可以严重影响其性能,最重要的因素是半导体技术的选取、器件模型、电路结构、设计方法、匹配网络、封装形式和热控制。因此放大器的设计成为了一门艺术,它有时需要达到互相冲突的设计指标,一个有经验的设计者比没有经验的人设计出的放大器要好很多。

针对某一特殊应用和频率范围的放大器设计是一个很复杂的事情,因为这需要达到物理、电气、热性能和成本的要求。放大器设计的特点在图 1.2 中给出。放大器的性能指标主要有频率范围、增益、噪声系数、输出功率、PAE、线性度、输入和输出电压驻波比(VSWR),这些指标由器件的尺寸、电路设计的拓扑结构、匹配网络、放大级的个数、各级器件的长宽比、设计方法、加工技术和封装决定。经常会遇到需要在尺寸、电性能、可靠性和成本之间进行权衡。通过使用器件的  $S$  参数、线性和非线性模型及匹配元件的模型来实现放大器的设计。

放大器的设计从广义上分为两大类:低噪声放大器和功率放大器。在低噪声放大器中,晶体管的输入端需要采用最小噪声匹配,在  $50\ \Omega$  系统中输出端需要采用共轭匹配以达到最大的增益和最小的回波损耗(RL)。对于功率放大器来说,在  $50\ \Omega$  系统中输出端需要匹配到指定的负载以达到最大功率输出,输入端需要采用共轭匹配以达到最大的增益和最小的回波损耗。在线性放大器中,输入和输出都要匹配以达到更好的线性度。因此,在一个放大器中,器件的输入需要匹配以达到最小噪声或最大增益或更高的线性度,输出需要匹配以达到最大的增益或最大功率和 PAE 或更高的线性度。匹配网络由分布和集总元件组成。在一个放大器中,电源电压(加在漏极或集电极)是通过一个射频扼流圈或通过偏置电路加上的,并且这些元件通常是匹配网络中的一部分。