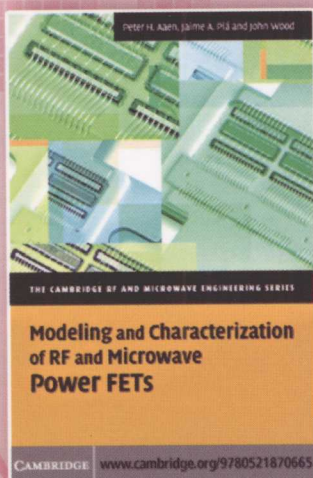


CAMBRIDGE

射频微波功率场效应管的建模与特征

Modeling and Characterization of
RF and Microwave Power FETs



[加] Peter H. Aaen

[波多] Jaime A. Plá 著

[英] John Wood

鲍景富 何松柏 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

射频微波功率场效应管 的建模与特征

Modeling and Characterization of
RF and Microwave Power FETs

[加] Peter H. Aaen

[波多] Jaime A. Plá 著

[英] John Wood

鲍景富 何松柏 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书首先回顾了一般商用微波射频晶体管的种类和基本构造,介绍了高功率场效应管的集约模型的构成;描述了功率管一般电气参数的测量方法,着重讨论了对功率管的封装法兰、焊接裸线、引线等无源部分进行建模与仿真,以及热特征的测量仿真与建模;详细分析了功率管有源部分的复合建模,包括小信号建模、大信号建模、电荷守恒定理和温度变化条件下的模型建立;还从数学上分析了集约模型的函数近似逼近方法,从工程设计角度出发阐述了模型在计算机辅助设计工具包中的应用,最后对设计的模型进行了验证。

本书全面讲解 FET 建模,适合从事 RF 和微波功率放大器设计及模型领域工作的专业技术人员参考。

Modeling and Characterization of RF and Microwave Power FETs 978-0-521-87066-5 by Peter H. Aaen, Jaime A. Plá, John Wood first published by Cambridge University Press 2007

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Publishing House of Electronics Industry & Cambridge University Press 2009

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

This edition is for sale in the mainland of China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

此版本仅限在中国大陆境内销售,不包括香港、澳门特别行政区及中国台湾。不得出口。

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-4589

图书在版编目(CIP)数据

射频微波功率场效应管的建模与特征/(加)奥恩(Aaen. P.)等著;鲍景富等译.

北京:电子工业出版社,2009.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Modeling and Characterization of RF and Microwave Power FETs

ISBN 978-7-121-07855-2

I. 射... II. ①奥... ②鲍... III. 场效应晶体管-射频电路:微波电路-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第182383号

策划编辑:马 岚

责任编辑:秦淑灵

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:15.25 字数:390千字

印 次:2009年1月第1次印刷

定 价:35.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

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,除了依靠高校的老教师和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和自由组合使用。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”。

为做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、南京邮电大学、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、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通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,我们通过与作者联络、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	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长, 中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
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 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 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
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	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 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 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、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任
	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兼秘书长, 教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

在现代无线通信领域中,由于数字通信传输速率不断提高,带宽不断加宽,对基站功率放大器的高效率和线性度提出了更高的要求,这已成为当前无线通信领域研究的热点,基站功率放大器是无线通信系统中最难设计的关键部件之一。

此书是描述高功率射频晶体管建模要求的第一本专著,它从功率晶体管的基本特征出发,介绍了高功率场效应管的集约模型的构成、电气参数的测量技术、晶体管中无源部分的建模与仿真、器件的热特性及建模、晶体管有源芯片部分的建模、集约模型的函数逼近、仿真工具包中的模型实现及模型验证等。

书中也描述了功率场效应晶体管中的一些关键技术问题,提出了热效应、定标问题、非线性建模,以及器件封装内部的匹配网络等,并采用这些技术对当前引领市场高功率技术的LDMOS和III-V族功率器件进行了阐述。此书全面讲解了微波场效应管的建模方法,是一本从事射频和微波功率放大器设计及模型领域工作的专业技术人员、微波电路专业的大学高年级本科生或研究生所必备的参考书。

全书主要由成都电子科技大学的鲍景富博士和何松柏博士翻译完成,其中何松柏翻译了第2章、第3章、第5章和第8章,鲍景富翻译了前言和第1章、第4章、第6章、第7章和第9章等并进行全书的校对和统稿;在翻译过程中还得到了许多学生的协助,他们是潘国强、陶莲娟、黄洪云、池望清、张橹和叶宝盛等,在此表示衷心的感谢。同时还要感谢电子工业出版社的编辑和相关同志,在他们的帮助和指导下,本书得以顺利出版。

由于译者水平有限,书中难免有些错误,恳请读者批评指正。

译者

2008年10月于成都

前 言

这是一本关于射频功率管建模的书,尤其是针对场效应晶体管(FET)的建模。在书中我们会讨论特性化和测试技术、分析和综合方法、仿真平台上模型的实现,以及检验和验证技术,利用这些技术可建立供电路设计人员放心使用的晶体管模型。

在功率放大器和发射机的设计中,客户和监管部门的需求对晶体管模型的精确度提出了更严格的要求,对现代通信系统的功率放大器在线性特性、多信道容量、带宽等方面都提出了更严格的要求,同时对工作效率也提出了更高的要求,这是通过工作在固有的非线性模式(例如D类、E类、F类或其他类)来实现的。这些要求一般是相互冲突的,因而需要设计人员进行多方面的折中。传统的高频设计方法“cut-and-try(割割调调)”不适用于复杂信号通信系统的功率放大器的设计,因而设计人员运用CAD技术和电路仿真来优化他的设计,从而满足规格的要求。CAD方法在射频功放设计中使用得越来越多,让使得我们在实现仿真时更加依赖于具有高精度的晶体管模型。

一直以来,从数百到数千个晶体管组成的低频多功能电路,到相对低晶体管密度的高频微波和毫米波电路,晶体管模型广泛运用于模拟电路的设计。在以下情况中,基于仿真的设计是很有必要的:电路在制作出来后就不可能调节了,因此在第一次设计就必须接近完美,这就意味着精确的模型十分必要。

在射频和微波功率放大器中,高功率和高频率的双重属性给建模工程师带来了一系列独特的挑战。晶体管自身物理尺寸很大,可以大到波长的数量级,甚至在微波频率上,功率管更是如此,我们必须在模型中获取分布式环境下的电气特性。即使器件的工作模式趋于更高效,但是器件还是会产生大量的热,必须采取有效的散热措施;我们还需要表征和模型化热效应对晶体管电气特性的影响,从而完成高功率的设计。

我们的目标是建立一个可以用在射频电路仿真器中的功率场效应管集约模型。本书将设计集约模型使其保留晶体管的动态特性,并能很容易地建立和提取。本书采用一种不依赖于工艺的方法来建立集约模型,这是基于晶体管电气特性的观测,通过电气测量和热测量的方式直接获取模型,所以有必要对晶体管特征进行仔细分析。本书将提出器件的热效应、标度问题、有源晶体管的非线性模型以及内部封装和匹配网络的模型。这些建模方法是通过使用LDMOS FET来阐明的,因为这是现在市场导向的射频蜂窝基础设施应用高功率技术,GaAs功率器件也是如此。这是第一本描述高功率射频晶体管建模要求的书。虽然如此,此书描述的一些方法,几乎能够应用到任何场效应管的建模之中。

我们将通过回顾一些应用和器件技术方面的历史发展来介绍本书,这些应用和技术最终促成了在射频和微波频率上数十到数百瓦传输功率晶体管的产生。尽管半导体器件课本介绍了具体的物理原理,我们还是需要对场效应管的工作做一些回顾,并且引入集约模型所基于的概念。因为这些是本书后半部分分析和构架晶体管模型的基础。

精确测量是模型的基础,我们将讨论如何进行校准和修正以确保大功率晶体管可重复和精确测量。对于模型提取及有效测量,构造了直流到射频的测量方法和原理。本书描述了集总模型的分析及架构方法,把晶体管划分为无源和有源部件,并详细导出了这些元件的模型。

无源部件包括晶体管的封装、封装内的引线及提供了晶体管内部匹配网络的电容分量。匹配网络用于控制封装晶体管端口的阻抗。在监管机构强制实施的规格要求下,须仔细设计这些匹配网络,同样必须仔细建立这些网络模型,提供用于电路设计的晶体管的精度描述。

通过去嵌入封装部分,我们可以得到有源晶体管。为获得高精度,我们采用电荷守恒法,通过从直流到射频的测量建立场效应管的大信号模型。本书具体描述了电荷守恒模型的建立过程,从而使读者对模型的工作原理以及大信号非线性应用的优点有更好的了解。

当然,对功率管来说,热环境是非常重要的,当器件热温上升时,它的电气特性会变化,因此我们将介绍一下静态和动态热效应的现代测量方法。然后用这个热描述来建立功率场效应管的合理的电热模型。

在这点上,我们考虑怎样借助函数近似或数据拟合技术,在电路仿真器中构建出电热模型,以及如何验证模型是否准确。最后,本书用负载牵引技术和大信号网络分析仪把模型估算值与高功率射频测量相比较,以便验证模型的准确度,使得电路设计人员更有信心地使用。

致 谢

本书的出版得到了众多朋友和同事的大力支持，在此感谢他们的帮助。

感谢飞思卡尔半导体公司 RF 部的一些同事，他们提供了宝贵的意见，我们在描述和使用某些资料的过程中得到了他们的支持，特别要感谢 Jeff Coowder，感谢他在热测量、仿真帮助及热建模中大量的研究成果反馈与支持，还有 Daren Bridges, Dan Lamey, Michael Gayonnd 和 Daniel Chan 的非线性模型、热模型和测量技术，以及 Chris Dragon 和 David Burdeau 对 LDMOS 技术的深入理解，他们的帮助使我们得以更好地完成此书。

感谢所有的合作者，他们提供了有利于我们工作和学习的支持讨论的有益环境；感谢许多独立的技术小组，我们相互间交流思想，这些可贵的帮助给了我们勇气、智慧和新思想。特别感谢给予我们（我们中的两位）帮助和鼓励的 Aryeh Platker (Raytheon)，Wayne Struble (TriQuint) 和 David Root (Agilent)，他们是我们早期的建模同事，已把我们的经验和方法发扬光大到晶体管建模方法之中。

感谢 Steve Cripps 对这项工作的鼓励和支持，感谢剑桥大学出版社的工作人员，特别是 Julie Lancashine 在完善手稿时的积极响应和协助，以及 Andrep 对插图的帮助。

对我们的家庭成员表示深深的感谢，由于他们的支持和理解，此书才得以从思想变为专著。

作者简介

Peter H. Aaen

分别于1995年、1997年和2005年获得加拿大多伦多大学工程科学学士学位和电气工程硕士学位,以及美国亚利桑那州立大学电气工程博士学位。他现在是美国亚利桑那州的飞思卡尔半导体公司射频部门射频建模小组的总管;他在1997年加入该公司(那时称为摩托罗拉公司的生产事业部)。他的专业领域是为功率晶体管和IC的设计和开发建立无源和有源集约模型。在出任总管之前,他致力于为复杂封装环境开发有效的电磁仿真方法。现在他的工作主要集中在微波晶体管模型和无源元件的开发和验证方面。他的技术方向还包括电磁优化方法、微波测量的校准技术和封装建模技术的开发。

近年来,他出席了IMS(国际微波研讨会)和RWS(无线电研讨会)的各种专题学术讨论会,在过去两年中他是IMS技术项目委员会的成员。在电磁仿真、封装建模以及微波器件建模和表征方面,他单独或与他人合作完成了数十篇论文、专题文章和专题学术讨论文章。他还是IEEE和MTT-S(微波理论与技术学会)的成员。

Jaime A. Plá

于1991年获得位于马亚圭斯的波多黎各大学电气工程学士学位,于1993年获得位于阿姆斯特特的马萨诸塞大学微波工程硕士学位。他现在是美国亚利桑那州的飞思卡尔半导体公司射频部门设计机构的总管,他在1995年即加入该公司(那时称为摩托罗拉公司的生产事业部)。在出任总管之前,他曾是LDMOS建模小组的总管,工作主要是为LDMOS器件建立高功率射频电热器件模型,研究方向为封装建模技术的开发、无源元件的建模,以及与小信号、大信号建模提取和校验相关的电热晶体管特性的测量技术。1991年,他加入了列克星敦雷声(Raytheon, Lexington)公司微波半导体实验室的研究部。在雷声公司期间,他主要从事于开发诸如GaAs MESFET、PHRMT和HBT的单片微波集成电路半导体器件的微波测量技术。

在微波器件与封装建模和表征以及微波测量技术方面,他单独或与他人合作完成了20多篇论文和专题文章。他还是IEEE和MTT-S的成员。

John Wood

分别于1976年和1980年获得英国利兹大学电气与电子工程学士学位和博士学位。他现在是美国亚利桑那州的飞思卡尔半导体公司射频部门RF CAD和建模的高级技术贡献者。他的专业领域为建立功率晶体管、IC集约器件模型和特性模型。为了实现和支持这些建模要求,他曾致力于高功率脉冲I-V-RF测试系统,以实现可连接和在晶圆测试中的应用,并致力于开发大信号网络分析仪(LSNA)、负载牵引和包络测量技术。在1997—2005年间,他在美国加州的安捷伦科技(那时称为惠普)微波技术中心工作,在那里他的研究作为,使用LSNA测量和非线性系统识别技术对用于毫米波应用和非线性特性建模的大信号、与偏执无关的线性场效

应管模型的分析、表征和开发。在 1983—1997 年间，他曾是英国约克大学电子学系的教授。在那里，他的研究和教学工作包括半导体器件、射频微波电路、IC 设计和器件建模。在进入学术界之前，他曾是英国 STL 的高级研究工程师，负责 GaAs IC 及其制造工艺的设计和开发工作。

近年来，他组织或合作组织并出席了 IMS（国际微波研讨会）和 RWS（无线电研讨会）的各种专题学术讨论会；在过去的两年里，他在 IMS2006 的筹划指导委员会工作，并且是 ARFTG 技术项目委员会的成员。在微波器件与系统建模和表征以及微波器件工艺方面，他单独或与他人合作完成了 80 多篇论文、专题文章。他也是 *Fundamentals of Nonlinear Behavioral Modeling for RF and Microwave Design*（Artech House, 2005）的合作编辑。他是 IEEE 的会士，也是 MTT-S 和电子器件协会的成员。

目 录

第 1 章 射频微波功率晶体管	1
1.1 引言	1
1.2 晶体管建模过程概述	2
1.3 高功率晶体管的商业应用回顾	4
1.4 硅器件技术发展	5
1.5 复合半导体 (III-V 族) 器件技术发展	7
1.6 FET 基本工作原理	10
1.7 封装	23
1.8 未来发展趋势与方向	26
附录 A MESFET 中 f_T 的推导	27
参考文献	28
第 2 章 高功率 FET 集约模型导论	32
2.1 引言	32
2.2 物理建模	33
2.3 集约模型	34
2.4 记忆效应	38
2.5 结论	42
参考文献	42
第 3 章 电气测量技术	45
3.1 引言	45
3.2 电参考面	45
3.3 测量环境	53
3.4 模型提取的测量	62
3.5 验证过程的测量	69
参考文献	74
第 4 章 无源器件: 仿真和建模	79
4.1 引言	79
4.2 封装	79
4.3 键合引线	81
4.4 MOS 电容建模	89

4.5 分割技术应用举例	91
参考文献	94
第5章 热特性分析与建模	97
5.1 引言	97
5.2 热传递的方式	98
5.3 热量测量	104
5.4 热仿真	110
5.5 集约模型	113
参考文献	115
第6章 有源晶体管的建模	118
6.1 介绍	118
6.2 复合管与外部各种元件的建模	121
6.3 标度考虑	129
6.4 本征晶体管的建模	131
6.5 在晶体管模型中的频率离散效应	154
6.6 包含统计变化的集约模型	162
6.7 结束语	163
参考文献	163
第7章 集约模型的函数逼近	169
7.1 引言	169
7.2 函数及函数逼近的特性	170
7.3 函数逼近的实用方法	172
7.4 结论	187
参考文献	188
第8章 模型在CAD工具中的应用	190
8.1 引言	190
8.2 各类仿真器回顾	190
8.3 模型执行过程概述	196
8.4 模型验证过程	198
8.5 模型执行的类型	199
8.6 建立一个模型库	202
8.7 模型可移植性及其未来发展趋势	203
参考文献	204
第9章 模型验证	206
9.1 引言	206

9.2 模型的不确定性和误差来源	207
9.3 对于功率放大器设计的验证标准	208
9.4 通过测量验证模型	210
参考文献	223
缩略语	225

第1章 射频微波功率晶体管

1.1 引言

虽然无线通信标准会随着最近数字编码技术或新开发使用的电磁波波段的发展而改变,但各种通信系统的共同特征是,它们均要使用功率放大器。在过去的几十年中,特别是在功率级小于1 kW的范围内,从真空电子管或者放大器的其他形式到固态器件的转变已经基本完成了。现在,功率放大器最核心的部分是功率晶体管。

在射频无线通信领域,基站和长距离发射机几乎全部使用硅LDMOS(横向扩散金属氧化物晶体管)高功率晶体管。除了在现代蜂窝通信系统中,LDMOS还广泛应用于需要射频放大的领域——HF、VHF和UHF通信系统,脉冲雷达,工业、科学和医疗(ISM)应用,航空电子和最近的WiMAX™通信系统。这些应用的频率范围为从几MHz至4 GHz以上。

当LDMOS技术在高功率射频和微波低频段应用中占优势的时候,许多种化合物半导体(III-V簇)被用做有效的功率放大器件,特别使用在频率高于5 GHz的应用中,同时也使用在低功率应用中,比如蜂窝手持机、蓝牙技术和其他无线局域网(WLAN),这些应用通常要求产生1 W或者更小的功率。射频微波中最常用的复合半导体材料是砷化镓(GaAs),它在场效应晶体管(比如金属-半导体FET)、异质结晶体管[比如高电子迁移率晶体管(HEMT)]和异质结双极晶体管(HBT)中用做基片。这些器件的基本工作原理随后将在本章中进行概括。砷化镓FET和拟晶态HEMT(PHEMT)用于低功率手持机的功率放大器中,同时也用于一些高功率蜂窝基站设备中,它们也可用做毫米波宽带功率晶体管。最近的化合物半导体技术促使了采用氮化镓为基片的HEMT器件的发展,这种器件具有很高的功率密度,使用不同的基片材料还可以得到很低的热电阻的优点,非常适用于高功率放大器。与GaAs FET一样,GaN FET技术同样具有很高的特征频率,因此这种器件具有应用于微波和毫米波频段高功率的潜力。

尽管无线通信系统的复杂度在继续增加,迫于缩短设计周期和步入市场时间的压力,设计者评估和开发替代设计技术具有挑战性。基于经验和测量的经验主义设计方法正在逐步被计算机辅助设计(CAD)方法所取代。在一个基于CAD的设计流程中,我们需要一种在设计工具中可实现的准确而有效的模型,并且这是极为重要的。

本书将着重讨论高功率RF应用的器件建模问题。这里首先申明,本书中的“RF”一词包括RF、微波和毫米波频段,在这些频段中功率放大器广泛使用场效应管。在高功率下使用晶体管会产生一些特殊问题,因而在成功的高功率RF放大器设计中,晶体管模型的开发和使用必须克服这些问题。功率晶体管具有相当大的物理尺寸,这可以从图1.1中看出。这幅图表示了当频率为2.1 GHz时,一个在1 dB压缩点可以传输140 W功率的晶体管。晶体管组成部分的复杂度是进行器件建模需要考虑的一个主要因素。这种复杂度体现在实现一个成功模型时出现的诸多问题中,包括匹配网络间的电磁干扰、封装的考虑、热控制以及热模型与器件的电模

型的自相容结合。功率晶体管总栅极宽度很大，一般难以直接测量和表征，因此必然引入缩放的问题。如何解决这些问题取决于整体器件建模策略——测量技术与函数近似的相互影响，以及准确度与CAD工具执行之间的相互作用。我们的目标是阐述如何折中考虑这些问题。

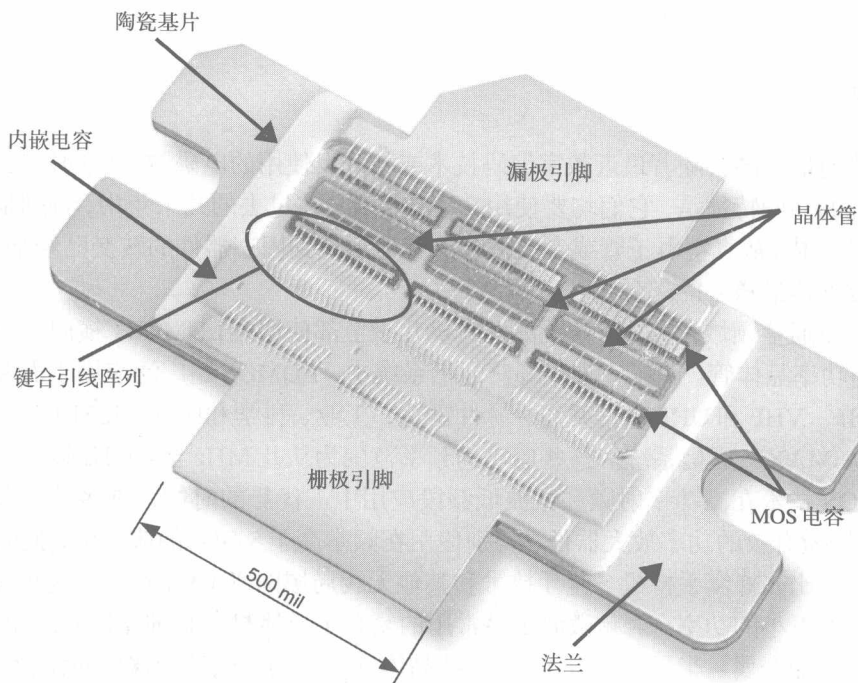


图 1.1 高功率LDMOS 晶体管示意图（图中移掉盖子后露出了复杂的内部匹配电路和LDMOS裸片^①）。© 2006 IEEE. 授权许可

尽管本书重点讲述高功率LDMOS FET，因为这是现在市场的主导技术，但同时也将建立、描述和应用许多测量、分析和模型综合技术，它们一般能广泛应用于FET建模。例如，非线性分析和建模技术可以应用于其他材料技术，如GaAs或GaN功率器件，它们可应用于不同的场合，比如更高的频率或更宽的带宽。

在建模晶体管模型过程中，有下面的一些仿真与建模准则^①：

- (i) 仿真的准确度由所使用模型的准确度来决定；
- (ii) 模型（通常）只有应用于一个仿真器中才有用；
- (iii) 在定义上，模型是不准确的，但仅仅是把握度的问题；
- (iv) 模型只是在准确度与复杂度（仿真时间）之间取折中。

1.2 晶体管建模过程概述

本节讨论建模的整体过程，熟悉一下需要进行的工作，这些工作将在接下来的章节中进行详细描述。开发和提取模型的一般过程如图1.2所示，这不仅是一个典型的过程，而且也可当做本书的一个概述。

^① 这些“准则”归功于 Colin MacAndrew 和 Mike Golio，不能确定哪个居先。