

新一代信息科学与技术丛书

异质结双极晶体管

——射频微波建模和参数提取方法

高建军 著



 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

异质结双极晶体管

——射频微波建模和参数提取方法

高建军 著

Yizhijie Shuangji Jingtiguan



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

异质结双极晶体管:射频微波建模和参数提取方法/
高建军著. —北京:高等教育出版社,2013.9

ISBN 978-7-04-037221-2

I. ①异… II. ①高… III. ①异质结晶体管-双
极晶体管-射频电路-微波电路-建立模型-研究 ②异
质结晶体管-双极晶体管-射频电路-微波电路-参
数-研究 IV. ①TN322

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第073258号

策划编辑 刘英 责任编辑 刘英 封面设计 张楠 版式设计 王艳红
责任校对 杨雪莲 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	17	版 次	2013年9月第1版
字 数	310千字	印 次	2013年9月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	49.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 37221-00

前 言

由于集成技术和大规模系统设计技术的飞速进步,电子工业在过去的几十年里得到了飞速发展。GaAs 及其相关化合物半导体已经成为除硅以外最重要的半导体器件,其商业应用包括移动通信、无线通信、光纤通信、全球定位系统、直播卫星系统、自动防撞系统以及高频雷达等。早在 20 世纪 90 年代初期,美国就把微波半导体功率器件及其电路列为国家发展战略的核心,把毫米波单片、高温功率电路和多功能模块电路作为重点,充分挖掘第三代半导体材料宽禁带半导体的潜力。

集成电路的计算机辅助设计是电路设计的主要课题之一,对于缩短集成电路的设计周期、降低设计和制作成本,提高可靠性具有重要意义。半导体器件模型是影响电路设计精度的最主要因素,电路规模越大、指标和频段越高,对器件模型要求也越高。因而准确的器件模型对提高射频和微波、毫米波电路设计的成功率、缩短电路研制周期是非常重要的。

本书是作者在微波和光通信技术领域多年工作、学习、研究和教学过程中获得的知识和经验的总结。主要目的是通过对作者在 III-V 族化合物半导体器件模型研究和测试技术方面所作的研究工作加以回顾和总结,以利于今后研究工作的深入开展。本书的核心内容源自作者单独或者与新加坡、德国和加拿大研究学者合作发表在国际重要期刊的文章,作者希望这些想法、概念和技术能够为国内外同行共享。

本书可以作为高年级本科生和研究生的教材,也可以供从事集成电路设计的工程师参考。集成电路的计算机辅助设计日新月异,作者也竭尽权利对本书所涵盖的领域提供最新的资料。本书共分为九章,重点介绍以微波信号和噪声网络矩阵技术为基础的微波射频异质结双极晶体管小信号等效电路模型,大信号非线性等效电路模型和噪声模型,以及相应模型参数的提取技术。

尽管作者花费了大量的时间和精力从事手稿的准备,但书中难免存在不足,敬请读者对本书的结构和内容给予批评指正。

致 谢

本书是在作者在国外留学期间发表在国际期刊和国际会议多篇论文的基础上完成的,主要包括从2001年到2011年对Ⅲ-V族化合物半导体异质结双极晶体管建模技术和测量技术的研究工作。

衷心感谢我的导师清华大学高葆新教授和已故电子工业部梁春广院士对我十余年研究工作的指导、鼓励和支持,衷心感谢我的博士后导师中国科学院微电子研究所吴德馨院士对我的帮助。

同时对本课题的研究合作者南洋理工大学 Law 教授、柏林工业大学 Boeck 教授、卡尔顿大学 Zhang Q-J 教授以及北京邮电大学李秀萍教授表示感谢。

在此谨向所有关心、帮助过我的老师和同学致以真诚的谢意。

衷心感谢国家自然科学基金(项目编号:61176036)和上海闵行区人才发展专项资金的资助。

最后特别感谢我的妻子赵东燕和儿子高涵祺,衷心地感谢他们对我多年默默无闻科研工作的支持和理解。

作 者

2013 年

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微波射频半导体器件	1
1.2 异质结双极晶体管	3
1.3 半导体器件射频微波建模和测试	5
1.4 本书的目标和结构	6
参考文献	8
第 2 章 半导体器件建模技术基础	10
2.1 基本网络参数	11
2.1.1 阻抗参数	12
2.1.2 导纳参数	14
2.1.3 混合参数	15
2.1.4 传输参数	16
2.1.5 散射参数	18
2.1.6 网络参数之间的关系	20
2.2 二口网络的噪声特性	27
2.2.1 噪声系数和噪声参数	27
2.2.2 阻抗噪声相关矩阵	28
2.2.3 导纳噪声相关矩阵	28
2.2.4 级联噪声相关矩阵	29
2.2.5 噪声相关矩阵之间的关系	29
2.3 二口网络的互联	32
2.3.1 二口网络的串联	32
2.3.2 二口网络的并联	33
2.3.3 二口网络的级联	34
2.4 基本电路元件	35
2.4.1 电阻	35
2.4.2 电容	36

2.4.3	电感	38
2.4.4	受控源	40
2.4.5	理想传输线	43
2.5	T型网络和PI型网络	44
2.5.1	T型网络	44
2.5.2	PI型网络	46
2.5.3	T型网络和PI型网络之间的转化关系	47
2.6	寄生元件削去技术	50
2.6.1	削去并联元件	50
2.6.2	削去串联元件	51
2.6.3	削去级联元件	52
2.7	参数提取技术基础	52
2.7.1	电容提取技术	52
2.7.2	电感提取技术	53
2.7.3	电阻提取技术	54
	参考文献	55
第3章	双极晶体管建模基础	56
3.1	PN结二极管	56
3.1.1	PN结二极管工作原理	56
3.1.2	二极管等效电路模型	62
3.1.3	二极管参数提取技术	66
3.2	双极晶体管工作原理	68
3.2.1	工作机理	69
3.2.2	工作模式	71
3.2.3	基区宽度调制效应	75
3.2.4	大电流注入效应	76
3.3	双极晶体管等效电路模型	77
3.3.1	Ebers-Moll模型	78
3.3.2	Gummel-Pool模型	82
3.3.3	噪声模型	85
3.4	微波射频特性	85
3.4.1	工作频率	85
3.4.2	共发射极结构	88
3.4.3	共基极结构	89
3.4.4	共集电极结构	90
3.4.5	三种结构特性比较	91

参考文献	91
第 4 章 HBT 基本工作原理	93
4.1 半导体异质结	93
4.2 常用的 HBT 器件	97
4.2.1 GaAs 基 HBT	98
4.2.2 InP 基 HBT	104
参考文献	108
第 5 章 异质结晶体管小信号建模和参数提取技术	111
5.1 小信号等效电路模型	111
5.1.1 焊盘	111
5.1.2 T 型等效电路模型	112
5.1.3 PI 型等效电路模型	115
5.1.4 T 型和 PI 型之间的关系	116
5.1.5 Mason 单向功率增益	117
5.1.6 特征频率和最大振荡频率	118
5.2 器件结构	119
5.3 PAD 电容提取技术	120
5.4 寄生电感提取技术	123
5.4.1 测试结构方法	123
5.4.2 集电极开路方法	126
5.5 寄生电阻提取技术	127
5.5.1 Z 参数方法	127
5.5.2 截止状态方法	128
5.5.3 集电极开路方法	132
5.6 本征元件提取技术	134
5.6.1 直接提取技术	134
5.6.2 混合提取技术	143
5.7 半分析技术	146
参考文献	151
第 6 章 异质结晶体管非线性建模和参数提取技术	155
6.1 线性和非线性	156
6.1.1 线性和非线性的定义	156
6.1.2 线性元件和非线性元件	158
6.2 大信号模型和小信号模型	163
6.3 半导体器件的热阻	164
6.3.1 热阻的定义	165

6.3.2	等效电路模型	168
6.3.3	热阻的确定方法	171
6.4	常用的 HBT 模型	177
6.4.1	VBIC 模型	178
6.4.2	Agilent 模型	181
6.4.3	经验基宏模型	185
6.4.4	本征元件随偏置变化曲线	186
	参考文献	190
第 7 章	异质结晶体管噪声等效电路模型及参数提取技术	193
7.1	异质结晶体管噪声等效电路模型	193
7.2	噪声参数的计算公式	195
7.3	噪声参数提取技术	204
7.3.1	基于调谐器原理的噪声参数提取技术	204
7.3.2	基于 50 Ω 噪声测试系统的噪声参数提取技术	206
7.4	共基极、共集电极和共发射极结构	214
7.4.1	信号参数之间的关系	214
7.4.2	噪声参数之间的关系	218
7.4.3	理论验证和实验结果	221
7.5	噪声系数测量技术	224
7.5.1	噪声源	224
7.5.2	Y 因子方法	225
7.5.3	校准技术	226
	参考文献	227
第 8 章	SiGe HBT 建模和参数提取技术	229
8.1	引言	229
8.2	小信号等效电路模型	232
8.3	大信号等效电路模型	236
8.3.1	HICUM 等效电路模型	236
8.3.2	MEXTRAM 等效电路模型	238
	参考文献	239
第 9 章	射频微波在片自动测试系统	241
9.1	矢量网络分析仪	241
9.2	40 GHz S 参数在片自动测试系统	244
9.3	基于 IC-CAP 的在片测试过程	256
	参考文献	260

第 1 章 绪论

随着集成电路的发展,特征物理尺寸(晶体管的最小沟道长度或者芯片上可实现的最小互连线宽度)逐步减小,目前已经从微米量级缩小到纳米量级。集成电路的特征物理尺寸的减小,不仅增加了集成电路的密度,使得电路芯片所包含的晶体管数量呈现指数增长,而且也缩短了电子和空穴的渡越距离,提高了晶体管的工作速度。半导体器件及其集成电路是电子工业的基础,微波毫米波半导体功率器件及其电路已经被列为发达国家发展战略的核心,以毫米波单片、高温功率电路和多功能模块电路作为研究重点,充分挖掘硅基和化合物基半导体材料的潜力。

1.1 微波射频半导体器件

由于微波和毫米波具有波长短、波束窄、频带宽和穿透能力强等特点,相应的器件和电路处在当今微电子技术的发展前沿。随着卫星有效载荷小型化技术、相控阵雷达和电子对抗等技术的发展,微波和毫米波器件和集成电路地位日益提高,成为突破和制约尖端技术的关键,不仅在军事应用领域占有及其重要的地位,在民用方面,如汽车防撞雷达、无线局域网和遥测成像等领域也有相当大的潜在市场。目前应用与射频微波以及毫米波电路设计的有源半导体器件主要有^[1-4]:

- 硅基双极晶体管(Si BJT)
- 硅金属氧化物场效应晶体管(Si MOSFET)
- 硅基侧向扩散氧化物场效应晶体管(Si LDMOS)
- 砷化镓金属半导体场效应晶体管(GaAs MESFET)
- 砷化镓高电子迁移率晶体管(GaAs HEMT)
- 砷化磷高电子迁移率晶体管(InP HEMT)

- 砷化镓异质结双极晶体管(GaAs HBT)
- 铟磷异质结双极晶体管(InP HBT)
- 锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT)

先进的半导体集成电路芯片通常具有以下特点:

- 很小的面积和体积
- 非常低的功耗
- 需要很少的系统级测试
- 可靠性高,速度快
- 低廉的价格

每种器件都具有自身的优势,对于射频微波电路来说,器件的最佳选择不仅依赖于技术指标,而且要考虑经济效益,例如制作成本、功耗要求和研究开发时间等。下面主要介绍各种半导体器件的发展状况和相互之间的优势比较。

考虑到不同的应用领域,衡量半导体器件的性能指标主要包括^[5]:

- 最大功率增益带宽积
- 最小噪声系数(F_{\min})
- 最大附加功率效率(PAE)
- 热阻
- 线性度
- 功率耗散
- $1/f$ 噪声

半导体晶体管通常是制作在不同的衬底基片上。射频微波半导体有源器件的衬底基片主要有:硅(Si)、碳化硅(SiC)、砷化镓(GaAs)、铟化磷(InP)和氮化硅(GaN)等等。表 1.1 对上述几种衬底基片的主要物理特性进行了比较^[4],这些特性造成了半导体器件技术的基本限制:半导体禁带宽度和击穿电场限制了器件的最大工作电压,载流子扩散和迁移速率限制了本征器件的速度,半导体基片的热阻决定了器件的功率承受能力。总之,这些物理特性成为决定该材料是否适合微波毫米波系统的关键因素。

表 1.1 RF 微波半导体有源器件的衬底基片特性比较

参 数	Si	SiC	GaAs	InP	GaN
半绝缘性能	不好	好	好	好	好
电阻率(Ωcm)	$10^3 \sim 10^5$	$> 10^{10}$	$10^7 \sim 10^9$	—	$> 10^{10}$

续表

参 数	Si	SiC	GaAs	InP	GaN
介电常数	11.7	40	12.9	14	8.9
电子迁移率(cm^2/Vsec)	1450	500	8500	6000	800
饱和电子速率(cm^2/V)	9×10^6	2×10^7	1.3×10^7	1.9×10^7	2.3×10^7
热导性($\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$)	1.45	4.3	0.46	0.68	1.3
工作温度($^\circ\text{C}$)	250	>500	350	300	>500
能带(eV)	1.12	2.86	1.42	1.34	3.39
击穿特性	300	2000	400	500	5000
密度(g/cm^3)	2.3	3.1	5.3	4.8	—

GaAs 材料的电子迁移率比 Si 的高 7 倍,且漂移速度快,所以 GaAs 比 Si 具有更好的高频特性,并且具有电路损耗小、噪声低、频带宽、功率大和附加效率高等特点。而且 GaAs 是直接带隙,禁带宽度大,器件的抗电磁辐射能力强,工作温度范围宽,更适合在恶劣的环境下工作。

与 GaAs 相比,InP 击穿电场、热导率、电子平均速度更高,而且在异质结 InAlAs/InGaAs 界面处存在较大的导带不连续性,其二维电子气密度大和沟道中电子迁移率高等优点,决定了 InP 基器件在化合物半导体器件中的地位。目前 InP HEMT 已经成为毫米波高端应用的支柱产品,器件的特征频率和最大振荡频率分别超过 300 GHz 和 600 GHz,而 InP HBT 有望在大功率和低电压等方面开拓应用市场。

GaN 是一种宽带隙的半导体材料,具有优异的物理化学性质,如大的热导率和介电常数、高的电子饱和速率和化学稳定性,因此有望制成在高温、辐射等恶劣条件下工作的半导体器件。近年来由于半导体薄膜生长技术的发展,在蓝宝石、SiC 以及 GaAs 上已经能够生长出高质量的 GaN 薄膜,并用于制备大功率微波器件、高温电子器件和发光器件。

1.2 异质结双极晶体管

异质结双极晶体管(HBT)具有功率密度高、工作电压高、效率高和线性度高的特点,已经广泛应用在用于高速光纤通信的数字和模拟集成电路中,同时

HBT 器件体积小、成本低,已经成为卫星通信系统中极具潜力的半导体器件^[6-8]。根据半导体材料,HBT 可以分为锗硅基 HBT(SiGe HBT)和 III - V 族化合物基 HBT(GaAs 和 InP HBT)。III - V 族化合物基 HBT 的特征频率已经超过 300 GHz,而 SiGe HBT 由于特征工艺尺寸的持续减小,采用 0.13 μm 工艺制作的器件特征频率已经超过 200 GHz^[6-11]。

与双极晶体管(BJT)一样,HBT 包括基极、集电极和发射极三个区域,由背靠背的基极 - 集电极结和基极 - 发射极结两个 PN 结构成,两个结均为异质结的器件称为双异质结器件(DHBT);如果两个结仅有一个是异质结,则这样的器件称为单异质结器件(SHBT)。图 1.1 给出了典型的 HBT 器件击穿电压随特征频率变化曲线。从图中可以看到,InP 基单异质结晶体管(SHBT)和双单异质结晶体管(DHBT)在特征频率和击穿电压方面比 GaAs HBT 具有优越性,在 50 GHz 的特征频率下,击穿电压高达 26 V。衡量器件品质的标准如下:最大资用功率(MAG)、特征频率(f_t)、最大振荡频率(f_{max})、最小噪声系数(f_{min})、输出功率密度及附加功率效率(PAE)等。

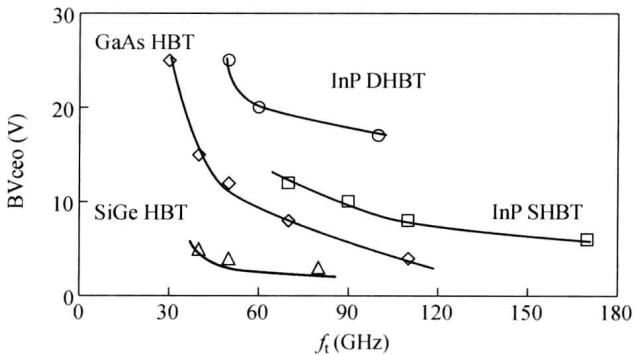


图 1.1 HBT 器件击穿电压随特征频率变化曲线

根据器件工作原理,半导体器件可分为双极晶体管(BJT/HBT)和场效应晶体管(FET/HEMT)。场效应晶体管可以被看做是一个单极器件,只有电子参与载流子运动。栅电压通过控制沟道宽度来调制漏电流,跨导用来表征栅电压控制漏电流的放大能力。而在双极晶体管中,电子和空穴都参与载流子运动,集电极电流由从基极注入的电流控制,起电流放大能力由电流放大系数 β 来表征。

表 1.2 给出了双极晶体管和场效应晶体管器件之间的特性比较。器件特征物理尺寸的限制决定了器件的速度特性,一个短栅长的场效应晶体管可以降低载流子的渡越时间,而减小基极和集电极厚度同样可以达到降低载流子渡越时

间的目的。场效应晶体管器件的栅长由器件工艺条件决定,目前 $0.15\ \mu\text{m}$ 栅长的 III - V 族化合物场效应晶体管与 $1\ \mu\text{m}$ 工艺条件下制作的异质结双极晶体管 HBT 特性相当,特征频率在 100 GHz 到 300 GHz 之间。双极器件的开关特性主要由基极 - 发射极电压决定,而场效应晶体管则由栅阈值决定。场效应晶体管的阈值在工艺中比较难以控制,而双极晶体管的阈值均匀性很好,非常适合在差分电路中应用,而且由于 HBT 器件的输出电流密度比场效应器件大,使得 HBT 在功率电路应用中有较高的承受能力。场效应晶体管的噪声源主要是热噪声和 $1/f$ 噪声,其中包括栅极感应噪声、沟道热噪声和 $1/f$ 噪声, $1/f$ 噪声的拐角频率可以高达上百兆赫兹。与此相对应,双极器件的噪声源主要是散弹噪声和 $1/f$ 噪声,其中 $1/f$ 噪声的拐角频率远低于场效应晶体管。

表 1.2 双极晶体管和场效应晶体管特性比较

参 数	FET/HEMT	BJT/HBT
物理尺寸限制	栅长	基极和集电极厚度
阈值特性	栅阈值电压	基极 - 发射极电压
输出电流密度	中等	高
噪声类型	热噪声和 $1/f$ 噪声	散弹噪声和 $1/f$ 噪声
工艺复杂性	中等	高
输入阻抗控制	栅电压	基极电流

1.3 半导体器件射频微波建模和测试

对于复杂的半导体器件结构,预测器件的静态和动态特性非常关键,通过半导体器件模拟软件分析器件物理结构,求解相应的泊松方程和电流连续性方程,获得器件的输入和输出特性之间的关系,可以指导器件设计和生产。而通过建立器件的等效电路模型来预测基于半导体器件的集成电路特性则为电路设计人员提供了非常便捷的途径。构建半导体器件等效电路模型的技术称为半导体器件建模技术,即利用最基本的电路元件(电阻、电容、电感和受控源)表征一个具有复杂功能的半导体器件(如图 1.2 所示),其电路网络特性应与半导体器件高度一致。

图 1.3 给出了半导体器件模型和测试之间的关系。从图中可以看到,如果要设计一个好的半导体器件,首先需要通过器件测试来获得器件的静态特性和

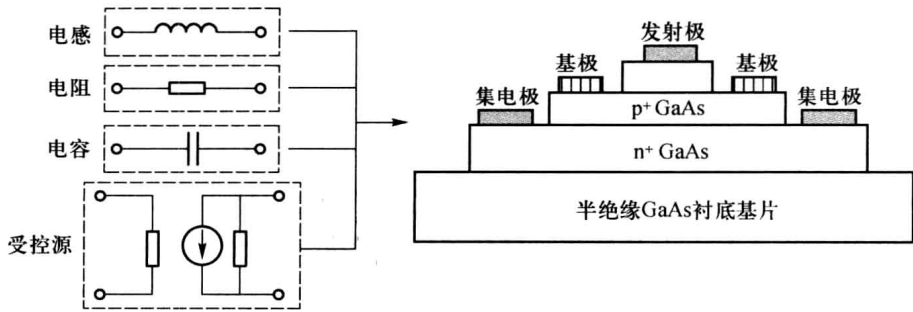


图 1.2 半导体器件建模原理

动态特性;而后基于测试结果来构建相应的等效电路模型,从中发现问题,进而改进器件的制作工艺,改善器件的性能指标。而等效电路模型又可以嵌入电路仿真软件进行相应的电路设计。值得注意的是,器件特性测试是构建等效电路模型的基础,同时又是检验模型精度的唯一手段,因此,半导体器件建模和测试互相依存、相互促进。

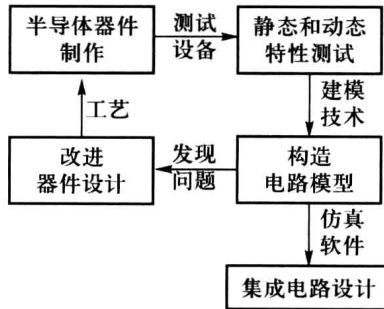


图 1.3 半导体器件模型和测试之间的关系

1.4 本书的目标和结构

本书旨在培养读者对微波射频异质结晶体管建模和测量进行深入研究和分析的能力。大规模集成电路芯片的开发需要由系统结构设计工程师、逻辑设计工程师、电路与版图设计工程师、封装工程师、测试工程师以及工艺和器件工程师等不同专业人员组成的团队,完成半导体器件和电路的计算机辅助设计和优化。器件和电路计算机辅助设计的基础是建立精确的能够反映器件物理特性的等效电路模型。因此准确的器件模型对于提高射频和微波毫米波单片集成电路

设计的成功率、缩短电路研制周期是非常重要的。本书将着重介绍微波射频异质结晶体管建模和测量技术,并深入了解微波射频异质结晶体管的物理特性和器件的相关知识。

本书分为9章,介绍以微波信号和噪声网络矩阵技术为基础的微波射频二极管、双极晶体管和异质结晶体管小信号等效电路模型、大信号非线性等效电路模型和噪声模型以及相应的模型参数提取技术,最后介绍目前常用的微波射频测试技术。

第2章将介绍应用于微波半导体器件建模和参数提取的微波网络信号和噪声矩阵技术。微波网络信号和噪声矩阵技术是半导体器件建模和参数提取的基础,微波半导体器件的小信号和噪声等效电路模型既可以帮助我们理解器件的物理机制,同时又是建立大小信号等效电路模型的基础。本章同时介绍了模型参数提取过程中常用的去嵌入技术以及基本的电阻、电感和电容模型参数提取技术。

第3章将介绍PN结二极管的工作原理和射频微波建模技术,以及等效电路模型参数提取技术,并在此基础上介绍双极型晶体管的工作原理和建模技术,包括两种常用的大信号等效电路模型 Ebers-Moll 模型和 Gummel-Pool 模型,最后讨论共发射极、共基极和共集电极的双极晶体管射频微波特性。

异质结双极晶体管的核心结构是异质结,第4章将介绍半导体异质结的工作原理和Ⅲ-V族化合物半导体能带隙和晶格常数关系,以及常用的化合物半导体 HBT 器件的工作原理以及在微波射频电路中的应用。

第5章以 InP HBT 器件为例介绍微波射频半导体异质结晶体管的工作原理,小信号等效电路模型和模型参数的物理意义,以及小信号等效电路模型参数提取技术,包括寄生焊盘 PAD 电容提取技术、寄生引线电感提取技术、寄生电阻提取技术和本征元件提取技术。

微波射频场效应晶体管器件的小信号等效电路模型对于理解器件物理结构和预测小信号 S 参数十分有用,但是却不能反映相应的射频大信号功率谐波特性。电路仿真软件通常需要包括线性和非线性两大部分,以及用于求解线性和非线性特性的分析优化工具。在研究小信号等效电路模型的基础上,第6章将介绍常用的微波射频异质结晶体管的非线性模型以及相应的模型参数提取技术。

对于半导体集成电路电路设计者来说,不但需要器件的小信号等效电路模型和大信号等效电路模型,而且半导体器件模型的噪声模型也是必需的,它是设计低噪声电路(如低噪声放大器等)的基础。为了准确预测和描述半导体器件

的噪声性能,建立精确的反映器件噪声特性的等效电路模型十分必要。第7章主要针对噪声等效电路模型和相应的模型参数提取技术展开讨论,推导了基于噪声模型的噪声参数的表达式,给出了噪声模型参数的提取技术以及共基极、共集电极和共发射极结构的信号和噪声特性之间的关系,最后介绍了半导体器件噪声的测试技术。

第8章介绍了SiGe异质结晶体管的工作原理和物理结构,以及完整的小信号电路模型,对寄生元件特别是衬底网络提取技术做了重点介绍,最后讨论了两种常用的双极晶体管大信号等效电路模型。

第9章介绍了射频微波在片自动测试系统平台的搭建过程,包括自动测试系统平台的组成结构、硬件连接方法、驱动软件安装方法、在片校准件的设置方法以及用软件控制系统自动执行在片测试工作的方法步骤。

参考文献

- [1] Chang K, Bahl I, Nair V. RF and microwave circuit and component design for wireless. New York: John Wiley, 2002.
- [2] Gao J. RF and Microwave Modeling and Measurement Techniques for Field Effect Transistors. Raleigh, NC: SciTech Publishing, Inc., 2010.
- [3] Gao J. Optoelectronic Integrated Circuit Design and Device Modeling. New York: John Wiley, 2010.
- [4] Anholt R. Electrical and thermal characterization of MESFET, HEMTs and HBTs. London: Artech House, 1995.
- [5] Feng M, Shen S C, Caruth D C, et al. Device Technologies for RF Front-End Circuits in Next-Generation Wireless Communications. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 354 – 375.
- [6] Baeyens Y, Georgiou G, Weiner J S, et al. InP D-HBT ICs for 40-Gb/s and higher bit rate lightwave transceivers. IEEE J. Solid-State Circuits, 2002, 37(9): 1152 – 1159.
- [7] Tseng H C. A Hybrid Evolutionary Modeling/Optimization Technique for Collector-Up/Down HBTs in RFIC and OEIC Modules. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30(4): 823 – 829.
- [8] Ida M, Kunishima K, Watanabe N, et al. InP/InGaAs DHBTs with 341 – GHz f_t at high current density of over 800 kA/cm. Int. Electron Devices Meeting (IEDM) Tech. Dig., 2001: 35.4 – 1 – 35.4 – 4.
- [9] Ida M, Kurishima K, Watanabe N. Over 300 GHz f_t and f_{max} InP/InGaAs double heterojunc-