



“十一五”国家重点图书出版规划项目

# 场效应晶体管射频微波 建模技术

高建军 著

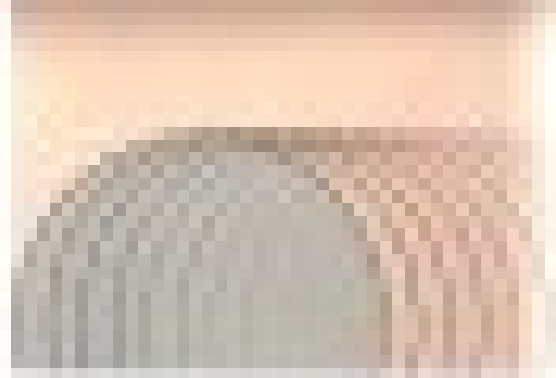
<http://www.phei.com.cn>



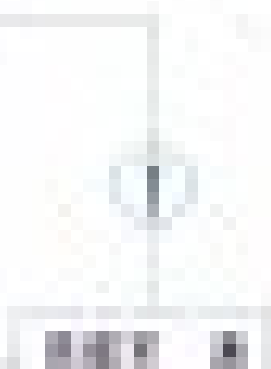
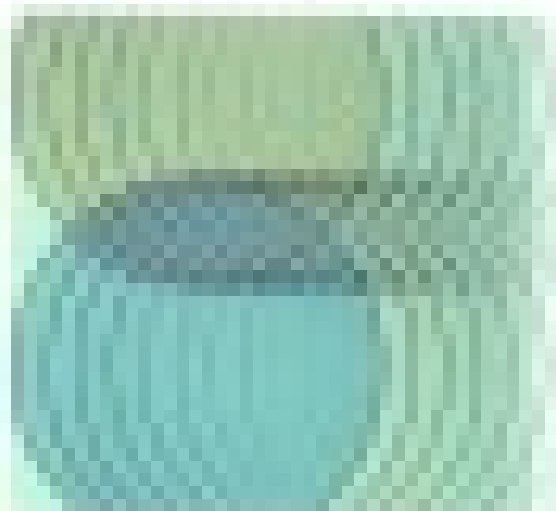
电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



清华大学出版社



# 场效应晶体管射极跟随器 建模技术



清华大学出版社

TN710.2

22

2007

“十一五”国家重点图书出版规划项目

电子信息科技专著出版专项资金  
东南大学科技出版基金 资助出版

# 场效应晶体管射频微波建模技术

高建军 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是作者多年来在微波和光通信技术领域工作、学习、研究和教学过程中获得知识和经验的总结。本书主要研究内容包括微波信号网络矩阵技术和噪声网络矩阵技术,和以此为基础的场效应晶体管射频微波建模和测试技术。其中,微波射频场效应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等效电路模型及等效电路模型参数提取技术是本书的重点。

本书可以作为微波专业和电路与系统专业的高年级本科生和研究生教材,也可以供从事集成电路设计的科研人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

场效应晶体管射频微波建模技术/高建军著. —北京:电子工业出版社,2007.1  
ISBN 978-7-121-03754-2

I. 场… II. 高… III. 场效应晶体管—射频电路:微波电路—建立模型—研究  
IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 001699 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:姚晓竞

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:18 字数:303.6 千字

印 次:2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:42.00 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,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zls@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 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惊人的发展。砷化镓（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材料，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、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。

本书是作者多年来在微波和光通信技术领域工作、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做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、德国及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、概念和技术能够与国内外同行共享。

本书可以作为微波专业和电路与系统专业的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，作者也竭尽全力对本书所涵盖的领域提供最新的资料。本书共分为 6 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场效应晶体管小信号等效

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，最后介绍目前流行的神经网络技术在场效应晶体管射频微波建模和测量中的应用。

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 2005 年对 III-V 族化合物半导体场效应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——北京邮电大学李秀萍教授、新加坡南洋理工大学的 Law Choi Look 教授、德国柏林工业大学 Georg · Boeck 教授和加拿大卡尔顿大学的 Q-J Zhang 教授表示感谢。

感谢东南大学科技出版基金和电子信息科技出版专项资金的资助。

在此谨向所有关心、帮助过我的老师们和同学们致以真诚的谢意。

最后特别感谢我的妻子赵东燕女士和我的儿子高涵祺，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。

著 者  
于东南大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 III-V 族化合物半导体器件及集成电路应用前景 .....	(2)
1.2 射频微波器件和电路的计算机辅助设计.....	(12)
1.3 本书的目标和结构 .....	(13)
参考文献 .....	(15)
<b>第 2 章 微波网络信号和噪声矩阵技术</b> .....	(19)
2.1 二端口网络的信号参数矩阵 .....	(20)
2.1.1 阻抗参数矩阵 .....	(20)
2.1.2 导纳参数矩阵 .....	(21)
2.1.3 混合参数矩阵 .....	(22)
2.1.4 ABCD 参数矩阵.....	(23)
2.1.5 二端口网络信号参数之间的关系.....	(24)
2.2 微波网络 S 参数和 T 参数矩阵 .....	(24)
2.2.1 S 参数矩阵 .....	(25)
2.2.2 T 参数矩阵 .....	(29)
2.3 微波网络噪声矩阵技术.....	(31)
2.3.1 阻抗噪声相关矩阵.....	(32)
2.3.2 导纳噪声相关矩阵.....	(33)
2.3.3 ABCD 噪声相关矩阵 .....	(34)
2.3.4 S 参数噪声相关矩阵 .....	(35)
2.3.5 T 参数噪声相关矩阵 .....	(37)
2.3.6 噪声相关矩阵之间的关系 .....	(38)
2.3.7 二端口网络噪声参数之间的关系.....	(42)
2.4 二端口网络的互联 .....	(45)
2.4.1 二端口网络的串联 .....	(45)
2.4.2 二端口网络的并联 .....	(46)
2.4.3 二端口网络的级联 .....	(48)
2.5 三端口网络和二端口网络之间的关系 .....	(50)
2.5.1 三端口网络和二端口网络 S 参数的关系 .....	(50)



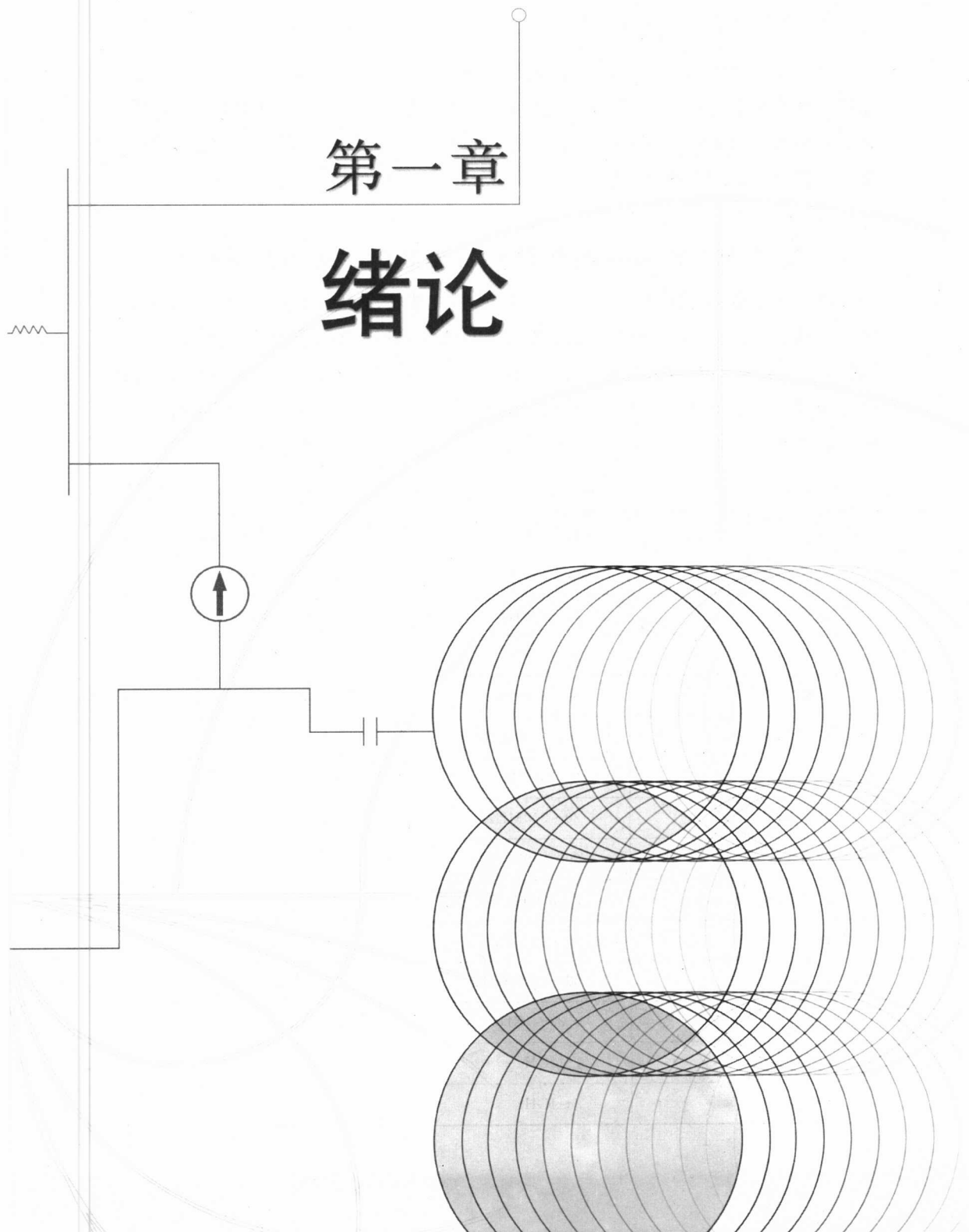
2.5.2	三端口网络和二端口网络噪声参数的关系	(53)
2.6	二端口网络的信号流程图	(54)
2.6.1	信号流程图的定义	(54)
2.6.2	信号流程图的性质	(55)
2.6.3	Mason 规则	(57)
2.7	典型的 $\pi$ 型和 T 型网络	(58)
	本章小结	(61)
	参考文献	(61)
<b>第 3 章</b>	<b>场效应晶体管小信号等效电路模型和参数提取技术</b>	<b>(63)</b>
3.1	HEMT 器件工作原理	(64)
3.2	FET 器件小信号等效电路模型	(66)
3.2.1	小信号等效电路模型	(67)
3.2.2	元件和物理结构的关系	(68)
3.2.3	特征频率和最大振荡频率	(71)
3.3	典型的 PHEMT 器件结构	(72)
3.4	PAD 电容提取技术	(73)
3.4.1	测试结构方法	(73)
3.4.2	截止条件方法	(75)
3.5	寄生电感提取技术	(86)
3.5.1	测试结构方法	(87)
3.5.2	正向偏置 COLD-FET 方法	(88)
3.5.3	反向截止偏置方法	(90)
3.6	寄生电阻提取技术	(92)
3.6.1	直流测试方法	(92)
3.6.2	COLD-FET S 参数方法	(102)
3.6.3	有源偏置方法	(108)
3.6.4	关于负阻的讨论	(109)
3.7	本征元件提取技术	(111)
3.7.1	本征元件随频率变化	(112)
3.7.2	本征元件和偏置的关系	(113)
3.8	改进的反向截止方法	(116)
3.9	小信号等效电路模型参数和器件栅宽的比例关系	(123)
3.9.1	截止条件下电路模型参数和器件栅宽的比例关系	(123)
3.9.2	寄生参数和器件栅宽之间的比例关系	(124)

3.9.3 本征参数和器件栅宽之间的比例关系 .....	(125)
3.10 半分析模型参数提取技术 .....	(129)
本章小结 .....	(133)
参考文献 .....	(133)
<b>第4章 场效应晶体管非线性等效电路模型及参数提取技术</b> .....	<b>(137)</b>
4.1 非线性物理基模型 .....	(138)
4.2 非线性测量基模型 .....	(139)
4.3 非线性经验分析模型 .....	(140)
4.4 常用的 MESFET/HEMT 非线性等效电路模型 .....	(142)
4.4.1 STATZ 非线性等效电路模型 .....	(143)
4.4.2 TriQuint 非线性等效电路模型 .....	(147)
4.4.3 Curtice 非线性等效电路模型 .....	(151)
4.4.4 Tajima 非线性等效电路模型 .....	(153)
4.4.5 Materka 非线性等效电路模型 .....	(153)
4.4.6 Angelov 非线性等效电路模型 .....	(154)
4.4.7 常用的高电子迁移率晶体管模型 .....	(155)
4.5 非线性等效电路模型精度比较 .....	(170)
4.5.1 直流特性精度比较 .....	(171)
4.5.2 射频大信号特性精度比较 .....	(174)
本章小结 .....	(175)
参考文献 .....	(176)
<b>第5章 场效应晶体管噪声等效电路模型及参数提取技术</b> .....	<b>(181)</b>
5.1 HEMT/MESFET 噪声模型综述 .....	(182)
5.1.1 FUKUI 噪声模型 .....	(184)
5.1.2 PUCEL 噪声模型 .....	(186)
5.1.3 POSPIESZALSKI 温度噪声模型 .....	(187)
5.1.4 考虑栅极漏电流影响的噪声模型 .....	(190)
5.2 噪声模型参数和器件栅宽的比例关系 .....	(193)
5.2.1 噪声参数的表达式 .....	(193)
5.2.2 噪声参数和器件栅宽的比例关系 .....	(194)
5.2.3 噪声模型参数提取技术 .....	(196)
5.3 场效应晶体管噪声参数提取技术 .....	(198)
5.3.1 基于调谐器原理的噪声参数提取技术 .....	(198)
5.3.2 基于 50Ω 噪声测试系统的场效应晶体管噪声参数提取技术 .....	(201)

5.4 共栅、共漏和共源结构的场效应晶体管 .....	(216)
5.4.1 信号参数之间的关系 .....	(216)
5.4.2 噪声参数之间的关系 .....	(220)
5.4.3 理论验证和实验结果 .....	(223)
本章小结 .....	(227)
参考文献 .....	(228)
<b>第6章 FET 器件神经网络建模技术 .....</b>	<b>(235)</b>
6.1 神经网络建模技术 .....	(237)
6.1.1 感知机神经网络 .....	(237)
6.1.2 多层感知机神经网络 .....	(241)
6.1.3 误差反向传播学习算法 .....	(242)
6.1.4 辐射激励函数网络 .....	(243)
6.2 神经网络基 FET 线性建模技术 .....	(245)
6.3 神经网络基非线性模型建模技术 .....	(246)
6.3.1 神经网络基 PHEMT 非线性模型建模技术 .....	(247)
6.3.2 神经网络基非线性模型训练方法 .....	(248)
6.3.3 神经网络基非线性模型训练结果 .....	(249)
6.4 神经网络微分和积分建模技术 .....	(255)
6.4.1 神经网络建模技术目前存在的问题 .....	(255)
6.4.2 三层感知机神经网络微分技术 .....	(258)
6.4.3 单输入三层感知机神经网络积分技术 .....	(259)
6.4.4 多输入三层感知机神经网络积分技术 .....	(261)
6.4.5 基于微分和积分建模技术的微波器件建模技术 .....	(262)
6.5 神经网络基噪声模型建模技术 .....	(267)
本章小结 .....	(274)
参考文献 .....	(274)

# 第一章

# 绪论



电子工业已经成为影响全球的最大工业,其年产值超过万亿美元。而半导体器件及其集成电路是电子工业的基础,早在1990年微波半导体功率器件及其电路就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重点,充分挖掘第三代半导体材料宽禁带半导体的潜力。

## 1.1 III-V族化合物半导体器件及集成电路应用前景

微波频率范围是从300MHz到30GHz,相应波长从100cm到1cm。低于微波频率的频段称之为射频(RF)频谱,高于30GHz的频率范围依次为毫米波(30~300GHz)、亚毫米波、红外和光频谱。值得注意的是通常把低于2GHz的微波电路简称为RF电路,表1-1给出了目前常用的国际电子电气工程师协会(IEEE)建立的电磁频谱分类表。

表 1-1 电磁频谱分类表

频 段	频 率	波 长
极低频(ELF)	30~300Hz	1000~10 000km
音频(VF)	300~3kHz	100~1000km
甚低频(VLF)	3~30kHz	10~100km
低频(LF)	30~300kHz	1~10km
中频(MF)	300~3000kHz	0.1~1km
高频(HF)	3~30MHz	10~100m
甚高频(VHF)	30~300MHz	1~10m
特高频(UHF)	300~3000MHz	10~100cm
超高频(SHF)	3~30GHz	1~10cm
极高频(EHF)	30~300GHz	0.1~1cm
亚毫米波	300~3000GHz	0.1~1mm
P波段	0.23~1GHz	30~130cm
L波段	1~2GHz	15~30cm
S波段	2~4GHz	7.5~15cm

续表

频段	频率	波长
C 波段	4~8GHz	3.75~7.5cm
X 波段	8~12.5GHz	2.4~3.75cm
Ku 波段	12.5~18GHz	1.67~2.4cm
K 波段	18~26.5GHz	1.13~1.67cm
Ka 波段	26.5~40GHz	0.75~1.13cm
毫米波	40~300GHz	7.5~1mm

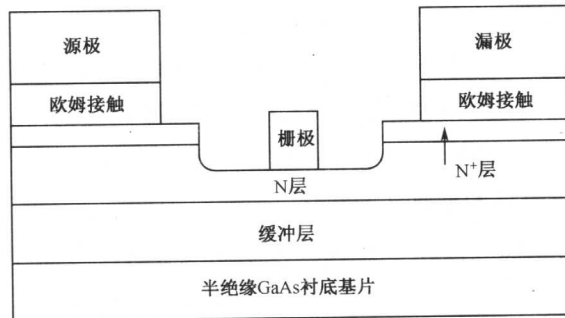
有多种固态器件技术适合射频微波通信系统,根据半导体材料系统它们分为硅基和Ⅲ-V族化合物基半导体器件。硅基器件以其低成本和大规模生产,在过去的几年里频率特性得到了很大的改善,与此同时Ⅲ-V族化合物基半导体器件凭借其本征材料的优势在高频高速电路得到了广泛的应用。根据器件工作原理,半导体器件又可以分为双极晶体管(BJT/HBT)和场效应晶体管(FET/HEMT)。场效应晶体管可以被看做一个单极器件,只有电子参与载流子运动,栅电压通过控制沟道宽度来调制漏电流,跨导用以表征栅电压控制漏电流的放大能力。在双极晶体管中,电子和空穴都参与载流子运动,集电极电流受到从基极注入电流的控制,其电流放大能力由电流放大系数 $\beta$ 来表征。

表1-2给出了场效应晶体管和双极晶体管之间的特性比较。首先,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,高特性的FET器件离不开先进的工艺生产条件。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 $100\sim 300\text{GHz}$ 之间。双极晶体管的开态特性主要由基极-发射极电压决定,而场效应晶体管则由有源沟道层掺杂浓度和厚度决定。场效应晶体管的阈值在工艺中较难控制,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要大,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 $1/f$ 噪声的拐角频率可以高达 $500\text{MHz}$ 。与此相对应,双极晶体管的噪声源主要是散弹噪声和 $1/f$ 噪

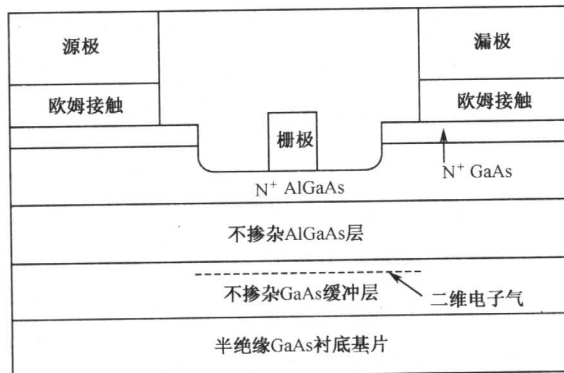
声,其中  $1/f$  噪声的拐角频率大大低于场效应晶体管的热噪声拐角频率。从工艺复杂性来说,场效应晶体管显然要比双极器件简单,一般需要三到四层版图就可以了,而双极晶体管相对比较复杂,需要多次的腐蚀和金属沉淀工艺。图 1-1(a)、(b)和(c)分别给出了典型的金属半导体场效应晶体管 MESFET、高电子迁移率晶体管 HEMT 和异质结双极晶体管 HBT 的横截面示意图。

表 1-2 场效应晶体管和双极晶体管的特性比较

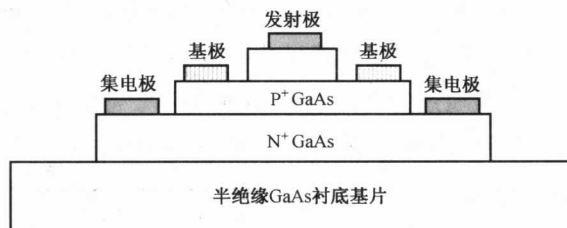
参 数	FET/HEMT	BJT/HBT
物理尺寸限制	栅长	基极和集电极厚度
阈值特性	栅阈值电压	基极-发射极电压
输出电流密度	中等	高
噪声类型	热噪声和 $1/f$ 噪声	散弹噪声和 $1/f$ 噪声
工艺复杂性	中等	高
输入阻抗控制	栅电压	基极电流



(a) 金属半导体场效应晶体管MESFET



(b) 高电子迁移率晶体管HEMT



(c) 异质结双极晶体管 HBT

图 1-1 器件横截面示意图

目前应用于 RF 微波及毫米波电路设计的有源半导体器件主要有以下几种：

- 硅双极晶体管(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 LDMOSFET)
- 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)
- 铟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)

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,器件和电路的速度越来越快。图 1-2 给出了集成电路最小特征尺寸的发展过程,从图中可以看到集成电路的特征物理尺寸已经从

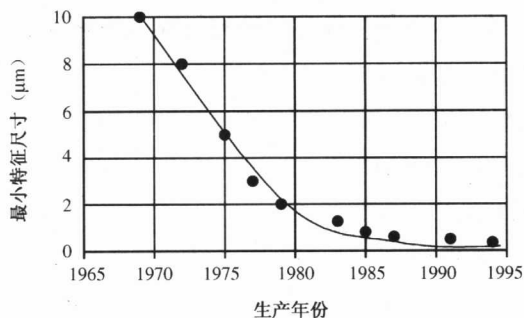


图 1-2 集成电路最小特征尺寸的发展过程



10 $\mu\text{m}$ 减小到了0.1 $\mu\text{m}$ 。相应的存储芯片所包含的晶体管数量呈指数增长(如图1-3所示),因此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,而且也使电子和空穴必须通过的距离缩短,从而提高了晶体管的速度。

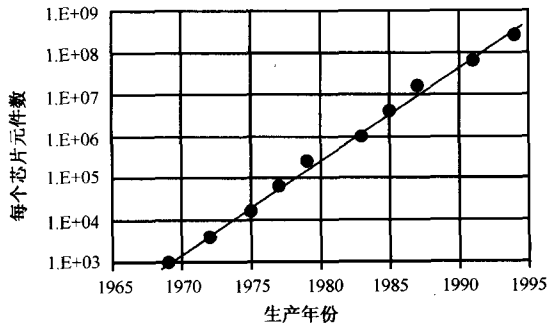


图 1-3 存储芯片集成电路晶体管数量增长曲线

先进的半导体集成电路芯片通常具有以下几个特点：

- 很小的面积、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RF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,如制作成本、功耗要求、研究开发时间等。本节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。

根据不同的应用领域,衡量半导体器件的指标主要有以下几个方面：

- 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(thermal resistance)
- 可持续高温工作时间
- 线性度
- 功率耗散
- 在截止状态下泄漏电流