

SiGe

微电子技术

徐世六 主 编
谢孟贤 张正璠 副主编



國防工業出版社
National Defense Industry Press

TN301/4

2007

SiGe微电子技术

主 编 徐世六
副主编 谢孟贤 张正璠
成 员 赖 凡 张 静 谭开洲
刘道广 钟 怡

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以器件和集成电路为轴线,从基本概念到器件的原理、设计、制造和电路应用,比较全面地介绍了新近发展起来的 SiGe 微电子技术。全书共九章,内容涉及 SiGe 材料的性质、SiGe 材料的制备、SiGe 异质结构、SiGe 异质结双极型晶体管、SiGe 场效应晶体管、SiGe 集成电路、SiGe 器件及其电路的发展动态等,并对 SiGe 在光电子领域的应用作了简明的介绍。讲述简明扼要,并反映出了最新的研究成果和发展趋势。

本书可供在半导体器件、集成电路和相关领域工作的科技工作者参考,也可作为微电子技术、光电子技术、电子材料、电子元器件、电子物理、电子工程等领域大学本科生及研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

SiGe 微电子技术/徐世六主编. —北京:国防工业出版社,2007.9

ISBN 978-7-118-05252-7

I. S... II. 徐... III. 半导体材料—微电子技术
IV. TN304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097265 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 3/4 字数 594 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 是继 Si 和 GaAs 之后的一种重要的半导体材料。由于 SiGe 具有优于纯 Si 的良好特性,并且工艺上可与 Si 工艺兼容,同时采用 SiGe 及其 Si/SiGe 异质结所制作出来的器件和电路性能几乎可达到 GaAs 等化合物半导体器件和电路的水平,甚至在许多方面可代替化合物半导体器件和电路器件的应用;特别是近年在 SiGe 基础上发展起来的应变 Si 技术,可大大提高 CMOS 的频率、速度性能,在深亚微米微电子领域内具有重要的价值。实践表明,在微电子器件和电路应用方面, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 不仅在频率和速度上可以超越 Si,而且在低成本上可以超越 GaAs。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 可能是未来微电子发展进程中必不可少、并将起着关键作用的一项技术。同时, SiGe 在光电子领域中也有着巨大的应用前景,为发展 Si 光电子技术开辟了一条新的途径。因此, SiGe 技术已经成为新一代微电子技术、光电子技术发展的一个重要方向,受到了人们的极大关注。现在, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 技术已经广泛地应用于移动通信、卫星通信、射频技术、自动化技术和光电子等领域。

模拟集成电路国家重点实验室及其依托单位中国电子科技集团公司 24 所把 SiGe 技术作为主要研究方向之一,是国内最早从事 SiGe 微电子技术研究的单位之一。从“九五”以来,通过技术引进、实验室基金、预先研究,在 SiGe 材料制备(MBE)、器件结构与机理、SiGe 平面工艺、SiGe 超高速集成电路设计等方面进行了深入研究。在 SiGe 材料的制备、SiGe 器件和电路的研制上已经取得了一批有意义的成果。为了总结已有的成果,并为今后进一步开展这方面的研究提供一个参考,我们组织有关科研人员编写了本书,具有重要的实用价值。

本书主要是结合微电子器件和电路来介绍 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料的基本性质和制备技术、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 微电子器件及其电路的设计和制造等。对于 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 在光电子领域的应用也作了简要的介绍。讲述力求简明扼要,并能反映出最新的研究成果和发展动态。

本书可作为微电子、光电子领域科技人员的参考书,也可供微电子学、光电子学、电子物理、电子材料与元器件等专业的高年级大学生和研究生参考。

在本书编写过程中,参考了许多有关的文章和专著,从中吸取和引用了很多讲述明确、中肯的内容。在此,对于这些文章和专著的作者表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,陈光炳、戴永红、唐彦等同志进行了大量的组织、策划、编辑等工作,谨在此表示衷心的感谢。

因编写时间仓促,加之编者水平有限,故书中缺点和错误在所难免,敬请有关专家和广大读者不吝赐教。



目 录

第一章 SiGe 技术的发展及其应用

概述	1	工艺	19
1.1 SiGe 器件	2	1.4.2 IBM 的 SiGe-BiCMOS	
1.1.1 SiGe 双极型器件	2	工艺及产品	20
1.1.2 SiGe 场效应器件	5	1.4.3 Atmel 的 SiGe 技术	24
1.1.3 SiGe 光电器件	7	1.4.4 Maxim 的 SiGe 技术	26
1.1.4 其他 SiGe 器件	8	1.4.5 Jazz 半导体公司的 SiGe	
1.2 SiGe-HBT 的主要应用	9	技术	26
1.2.1 SiGe 放大器	12	1.4.6 TSMC(台积电)的 SiGe	
1.2.2 SiGe-A/D 转换器	13	技术	27
1.2.3 SiGe 振荡器	14	1.4.7 SiGe 半导体公司	27
1.2.4 SiGe 混频器和倍增器、倍		1.4.8 Sirenza Microdevices 的	
减器	14	SiGe 技术	28
1.2.5 SiGe-HBT 的其他		1.5 SiGe 技术的市场和前景	29
应用	15	1.6 SiGe 薄膜的制备工艺	
1.3 IBM SiGe 技术的早期历史	16	概述	30
1.3.1 SiGe 技术的起源	16	1.7 开发 SiGe-HBT 工艺的	
1.3.2 SiGe-UHV/CVD 技术的		途径	32
发明	16	1.7.1 采用低温外延技术淀积	
1.3.3 最早采用 UHV/CVD 技术制		SiGe	32
作的 Si 外延基区晶体管 ..	17	1.7.2 SiGe-BiCMOS 的工艺	
1.3.4 IBM 最早的 SiGe 基区晶		集成	33
体管	17	1.7.3 SiGe-HBT 的制作	34
1.3.5 PNP-SiGe 晶体管	18	1.7.4 其他元件的工艺	34
1.3.6 f_T 为 75GHz 的 SiGe 基区		1.8 SiGe 技术的国内发展	
晶体管	18	动态	34
1.3.7 SiGe 外延基区晶体管		参考文献	36
(ETX)	18		
1.3.8 SiGe 技术的后续工作	18	第二章 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的基本物理特性	37
1.4 SiGe 的主要厂商、工艺及		2.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶格和一般	
代表产品	19	性质	37
1.4.1 SiGe 技术的两种主要		2.1.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的相图	37
		2.1.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶体	

结构	38	因素	92
2.1.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的力学性质	39	3.1.1 载流子有效质量	92
2.1.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶格失配和赝晶生长的临界厚度 ..	41	3.1.2 载流子遭受散射的概率	94
2.1.5 SiGeC 合金薄膜	45	3.2 应变对载流子迁移率的影响	94
2.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的能带和载流子	48	3.2.1 应变 Si 中电子的迁移率	94
2.2.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 体合金的能带结构	48	3.2.2 应变 Si 中空穴的迁移率	98
2.2.2 应变对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金能带结构的影响	53	3.2.3 外加应变对 Si 载流子迁移率的影响	101
2.2.3 SiGeC 合金的能带结构	61	3.2.4 应变增强载流子迁移率的机理	103
2.2.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中载流子的有效质量	62	3.3 应变 Si 器件简介	105
2.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中载流子的迁移率	65	参考文献	113
2.3.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中载流子迁移率的概念	65	第四章 SiGe 异质结构	114
2.3.2 应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中载流子的迁移率	66	4.1 半导体异质结的基本概念 ..	114
2.3.3 SiGeC 合金中载流子的迁移率	71	4.2 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 异质结	118
2.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶格振动和热力学性质	72	4.2.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 异质结的能带配置	118
2.4.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中的声子及其色散关系	72	4.2.2 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 异质结带边的能量突变量	119
2.4.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的热学性质	75	4.3 Si-Ge 量子阱	124
2.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的光学特性	77	4.3.1 SiGe/Si 量子阱的带边发光	125
2.5.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率和光吸收系数	77	4.3.2 SiGe/Si 量子阱的子带间跃迁的光吸收	128
2.5.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的声子散射光谱	82	4.4 Si-Ge 超晶格	131
2.5.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的带边发光光谱	85	4.4.1 SiGe 超晶格的应变对称外延技术	131
参考文献	89	4.4.2 Si-Ge 短周期超晶格的能带结构和性质	133
第三章 应变硅技术原理	91	4.4.3 Si-Ge 短周期超晶格的非线性光学效应	135
3.1 影响载流子迁移率的主要		4.4.4 Si-Ge 短周期超晶格的发光特性	136
		4.4.5 Si-Ge 短周期超晶格的	

调制反射光谱	139	参考文献	194
4.4.6 Si-Ge 短周期超晶格的 应用性能	140	第六章 Si/SiGe 异质结双极型晶 体管	195
4.5 Si/Si _{1-x} Ge _x 异质结构中二维 载流子气的磁输运性质	142	6.1 Si/SiGe 异质结	196
4.6 金属与应变 Si _{1-x} Ge _x 的 接触	145	6.1.1 Si/SiGe 半导体异质结的 注入比	196
4.6.1 金属/Si _{1-x} Ge _x 接触 ..	145	6.1.2 理想突变 SiGe 异质结的 伏安特性	200
4.6.2 金属/SiGeC 接触	148	6.2 Si/SiGe 异质结双极型晶 体管	201
4.6.3 金属/应变 Si 的接触 界面	149	6.2.1 HBT 的增益	201
4.7 Si _{1-x} Ge _x 异质结构的应用 举例	151	6.2.2 SiGe 异质结双极型晶体管 技术	203
4.7.1 Si _{1-x} Ge _x 双极反型沟道场 效应晶体管	151	6.2.3 Si/SiGe 异质结双极型晶体管 的频率特性	206
4.7.2 SiGe 谐振隧穿二极管 ..	154	6.2.4 Si/SiGe 异质结双极型晶体管 的噪声	207
4.7.3 多晶 SiGe 器件	160	6.2.5 Si/SiGe 异质结双极型晶体管 的 Early 电压	226
4.7.4 SiGe- I^2L 逻辑器件	161	6.3 SiGe-HBT 技术的应用及 发展趋势	230
4.7.5 SiGe 传感器件	162	6.3.1 SiGe-HBT 技术在微波/射频 通信领域中的应用	230
4.7.6 SiGe 红外探测器	163	6.3.2 通信领域中微电子技术应用 的现状与发展趋势——SiGe- BiCMOS 和 RF-CMOS ..	233
参考文献	168	6.4 SiGe-HBT 的模拟与设计	250
第五章 SiGe 材料的主要制备技术	169	6.4.1 双极型晶体管(BJT) 模型	250
5.1 分子束外延	170	6.4.2 SiGe 材料的物理参数 模型	265
5.1.1 设备的基本构造	170	6.4.3 SiGe-HBT 的模拟	272
5.1.2 设备的校准	172	6.5 SiGe-HBT 基区、发射区和 集电区的设计	273
5.1.3 外延生长	174	6.5.1 SiGe-HBT 基区的设计 考虑	273
5.2 化学气相淀积	180	6.5.2 SiGe-HBT 集电极的设计 考虑	281
5.2.1 超高真空化学气相淀积 ..	180		
5.2.2 减压化学气相淀积	182		
5.2.3 低压化学气相淀积	184		
5.2.4 快速热处理 CVD	185		
5.3 选择性外延生长技术	186		
5.4 SiGe 材料的表征技术	188		
5.4.1 X 射线衍射	188		
5.4.2 原子力显微镜	190		
5.4.3 霍耳测量	192		
5.4.4 二次离子质谱	193		
5.4.5 透射电子显微镜	193		

6.5.3	SiGe-HBT 发射区的设计考虑	283
6.5.4	SiGe-HBT 横向结构尺寸的设计考虑	283
6.6	SiGe-HBT 及电路的材料参数设计和版图设计	285
6.7	SiGe-HBT 及电路的制造工艺	287
6.7.1	SiGe 台面器件的工艺流程	288
6.7.2	SiGe 准台面器件的工艺流程及分立器件的制造工艺	291
6.7.3	SiGe-IC 的研制技术	297
6.7.4	SiGe-HBT 的欧姆接触和 SiGe 材料的干法/湿法腐蚀及其检测	300
6.7.5	SiGe-HBT 的光刻技术	303
	参考文献	306

第七章 Si/SiGe 异质结场效应晶

	体管	309
7.1	SiGe 异质结场效应晶体管概述	310
7.2	SiGe P 沟道异质结场效应晶体管的设计考虑	315
7.2.1	SiGe 层的厚度与 Ge 组分	315
7.2.2	氧化层和硅盖帽层的厚度	317
7.2.3	沟道掺杂和阈值电压调节	317
7.2.4	N^+ 多晶硅栅与 P^+ 多晶硅栅	318
7.3	SiGe 异质结场效应 MOS 晶体管的实践	319
7.3.1	$Si_{1-x}Ge_x$ P 型 MOSFET	319
7.3.2	Ge 沟道 P-MOSFET	323

7.3.3	SiC/SiGeC 沟道 P 型 MOSFET	324
7.3.4	$Si_{1-y}C_y$ 的 P-MOSFET	325
7.3.5	纵向 MOSFET	328
7.3.6	应变硅 P 型异质结 MOSFET	331
7.3.7	应变硅 N 型 MOSFET	336
7.3.8	SOI/SOS 上的 MOSFET	339
7.4	SiGe 异质结调制掺杂场效应晶体管的实践	341
7.4.1	SGe 沟道 P-MOSFET	341
7.4.2	SiGe P-MOSFET 的制造	342
7.4.3	应变 Si N-MOSFET	346
7.4.4	Ge 沟道 P-MOSFET	348
7.4.5	互补的异质结 MOSFET	349
7.4.6	性能比较	352
7.5	SiGe 异质结场效应晶体管的 应用概述	353
7.5.1	SiGe 异质结场效应 MOS 晶体管的应用	353
7.5.2	SiGe 异质结调制掺杂场效应晶体管的应用	353
	参考文献	355

第八章 应变硅器件与电路

8.1	应变硅器件概述	358
8.1.1	产生应变的几种主要方法	358
8.1.2	应变 Si/SiGe MOS 器件的未来发展方向	358
8.2	应变 Si-MOSFET	359
8.2.1	应变 Si N-MOSFET	361
8.2.2	应变 Si P-MOSFET	362
8.3	绝缘层上应变 Si(SSOI)-MOSFET	364

8.4	直接绝缘层上应变 Si	364	9.2.1	量子效率、响应度和 噪声	381
8.5	应变 Si 双极器件	365	9.2.2	雪崩光电二极管	382
8.6	模拟应用的应变 Si 器件	367	9.2.3	量子阱光电探测器	383
8.7	应变 Si-HFET	368	9.2.4	异质结光电三极管	384
8.8	Si/SiGe 异质结 CMOS	369	9.2.5	MSM 光电探测器	385
8.9	应变沟道功率 MOSFET ...	370	9.2.6	肖特基势垒光电探 测器	388
8.10	绝缘层上 SiGe (SGOI)衬底 的制备	371	9.2.7	异质结内光电发射 探测器	388
8.11	应变硅电路	373	9.2.8	Ge 光电二极管	390
8.11.1	环形振荡器	374	9.2.9	PIN 光电二极管	391
8.11.2	静态 4-与非电路	375	9.2.10	微腔光电二极管	392
8.11.3	自复位 CMOS 4-与非 电路	376	9.3	SiGe 光电接收器	393
8.11.4	锁存器	376	9.4	光波导、光开关和路由器	394
8.11.5	SOI 上的应变 Si 电路 ...	377	9.4.1	光波导	394
8.11.6	微处理器	377	9.4.2	光波导开关	396
	参考文献	378	9.5	Si/SiGe 量子级联激光器	397
第九章	SiGe 在光电子领域的应用	379	9.6	SiGe-LED	397
9.1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的基本光学性质	380	9.7	SiGe 太阳能电池	398
9.2	SiGe 光电探测器和红外 探测器	381		参考文献	400

第一章 SiGe 技术的发展及其应用概述

20 世纪 80 年代初期,就有一些研究人员把 Ge 作为添加剂加入到 Si 中,以提高 Si 基器件的性能,并达到与国际 SIA(半导体工业协会)制定的微电子发展路线相一致。10 年以后, SiGe 异质结双极晶体管(SiGe-HBT)的截止频率(即特征频率 f_T)率先达到了数十 GHz,性能接近或与 GaAs 器件及其电路相当。又过了将近 10 年的时间, SiGe 双极型器件即投入生产。在 1998 年, TEMIC(现在是 Vishay 和 Atmel)和 IBM 就已经推出了商品化的通信用 SiGe-HBT 器件及其电路。关于 SiGe-HBT,从实验室研究过渡到商品生产的整个发展历程见表 1-1。

表 1-1 SiGe-HBT 的研制历程

时间	研 制 历 程
1982	开发出 UHVCD 生长技术
1986	采用 UHVCD 外延制作出 Si 基晶体管
1987	首次采用 MBE 制作出 SiGe 基区 HBT
1988	基于双重多晶硅 BJT 工艺研制出缓变 SiGe 基区、多晶 Si 发射极 HBT
1993	基于类 CMOS 工艺研制出模拟 LSI-IC ($>10^{-4}T/s$, 12-bit DAC)
1993	制作出 $f_T > 100GHz$ 的 SiGe-HBT
1994	采用 200mmSi-CMOS 工艺一自对准 CMOS 工艺开发出 SiGe-BiCMOS 技术
1996	出现带有无源元件、模型和设计工具的 RF-SiGe 技术
1997	建立起完整而可靠的 BiCMOS SiGe RF 技术的制造规程
1998	IBM 和 Temic 推出商品化的 SiGe-HBT 产品

现在,世界上几乎每一家 BJT 或 BiCMOS-IC 的生产厂家,甚至一些作为 SiGe 竞争对手的 GaAs 公司,都加入到了 SiGe-HBT 的开发行列之中。在上一个 10 年里,实验样品的截止频率提高了 10 倍,这表明 SiGe 的加工工艺取得了巨大的进步;只是由于应变弛豫的问题和需要增加结构适应的灵活性,才延迟了一段时间投入生产。不过, SiGe-HBT 技术进入半导体产业的发展趋势是十分明显的。

在开发 SiGe-HBT 的同时,对于另外具备不同性能或不同应用领域的 SiGe 器件的研究工作也在大力地进行着,其发展速度同样迅猛。例如,虽然当前各大公司中对 SiGe 器件研究最多的是 HBT,但由于 SiGe 异质结构可以大幅度地提高场效应晶体管(FET)的性能,所以也有许多人致力于 SiGe 异质结场效应晶体管(HFET)、调制掺杂场效应晶体管(MODFET)和异质结 CMOS 晶体管(HCMOS)等器件及其电路的研究开发。

SiGe 技术应用广泛,除民用无线、有线通信外,也广泛应用于军用通信、GPS 定位导

航系统、卫星通信、汽车雷达等领域,特别是高速/高频的各个领域。

本章主要介绍 SiGe 器件、电路及其相关工艺技术的发展和应用简况。

1.1 SiGe 器件

1.1.1 SiGe 双极型器件

自 SiGe 技术问世以来, HBT 就成为研究最多的一种 SiGe 器件, 一些有实力的大公司和研究机构都相继投入力量从事 SiGe-HBT 的研究开发工作, 具有代表性的有 IBM、德国 Daimler-Chrysler 研究中心(Ulm)、Micrigan 大学等。

IBM 微电子分部研制成的 IBM 43RF0100 SiGe-HBT 具有很好的低功耗性能, 应用十分广泛, 其频率上限大于 15GHz (在 3V、5mA 下测得), 特别适合于基带、中频和射频应用, 如 PCS 和蜂窝数字无线手持设备、无线局域网等, 它具有从压控振荡器(VCO)到放大器(包括晶体管驱动放大器或低噪声放大器)的各种功能。由于其高增益、低噪声、高线性等特点, 可以满足不同应用场合的需要。采用直流电源, 在 1.9GHz 时, 其功率小于 16mW, 截止功率大于 13dBm(20mW)。

IBM 还研制出一种基区中的 Ge 组分为三角形分布形式(Ge 组分在发射区一侧为 1%~2%, 在集电区一侧增加到 8%~10%)的 SiGe-HBT。这种 SiGe-HBT 在 0.13 μ m 一代的工艺中, 截止频率达到 210GHz, 最高频率为 285GHz。IBM 相信, SiGe 技术的前途就在于采用了新工艺, 就是把应用于 RF 方面的高频 SiGe-HBT 和应用于数字方面的 Si-CMOS 结合起来, 即把模拟和数字功能集成到一个芯片上。现在, SiGe 技术发展的状况就在一定程度上支持了这种理念。

德国 Daimler-Chrysler 研究中心采用新型全自对准双台面工艺研制出了多指状 SiGe 功率 HBT。采用这种先进工艺, 已经获得了共发射极最高振荡频率($f_{\max}$)为 78GHz、截止频率(f_T)为 37 GHz 的器件, 其发射极面积为 $A_E = 2 \times 2 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。若是在 A 类工作, 10 指状的器件($A_E = 2 \times 2 \times 30 \mu\text{m}^2$)在 8.5GHz 下输出功率为 24.13dBm, 最大功率附加效率(PAE)为 26.9%。

Micrigan 大学 EECS 系已研制成 X 波段(8.4GHz)、Ku 波段(12.6GHz)和 K 波段(18GHz)的高性能 SiGe/Si HBT。在连续波工作时, 1 个 20 指状发射极 Si/Si_{0.75}Ge_{0.25}/Si (发射极面积为 1200 μm^2)HBT, 在 X 波段 RF 输出功率为 28.5 dBm(700mW), 在 Ku 波段的输出功率为 25.5dBm(350 mW), 在 K 波段的输出功率为 22.5dBm(180 mW)。这是 X 波段以上的 SiGe-HBT 的最好功率性能。图 1-1 示出了功率 SiGe HBT 的基本结构及其各个区域的设计参数。

对于 SiGe-HBT, 由于其异质发射结和基区中的漂移电场(在 SiGe 基区中掺入 Ge 的分布不均匀所致), 就容许基区高掺杂, 并且可大大减短基区渡越时间, 所以使得器件的截止频率(f_T)和最高振荡频率($f_{\max}$)都能够达到很高的水平, 适合于射频(RF)应用。图 1-2 示出了 SiGe-HBT 的 f_T 和 $f_{\max}$ 与集电极电流(I_C)的关系曲线。同时, 因为 SiGe-HBT 基区的高掺杂, 使得器件的基区宽度调变效应减弱(可得到较高的 Early 电压)和基极电阻减小(可得到较低的噪声系数), 从而 SiGe-HBT 在 RF 应用方面也具有优良的性能。

区域	材料	型号	掺杂浓度	厚度
发射极盖帽层	Si	N ⁺	$2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$	250nm
发射区	Si	N	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	50nm
隔离层	Si _{0.7} Ge _{0.3}	i		3nm
基区	Si _{0.7} Ge _{0.3}	P ⁺	$1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$	25nm
隔离层	Si _{0.7} Ge _{0.3}	i		7nm
集电区	Si	N ⁻	$2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	500nm
次集电区	Si	N ⁺	$2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	1000nm
衬底	Si(100)		$10000 \Omega \cdot \text{cm}$	540 μm

图 1-1 功率 SiGe-HBT 的基本结构和设计参数

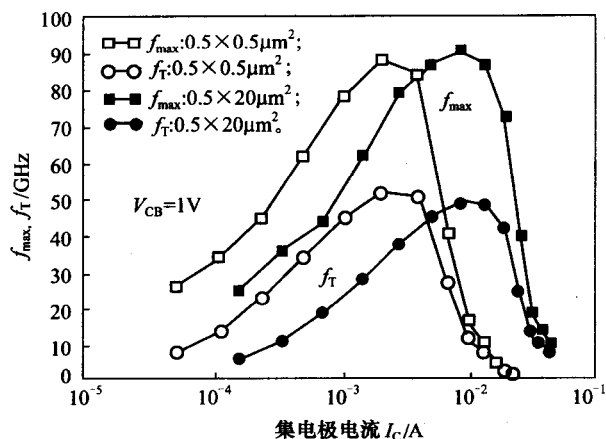


图 1-2 SiGe-HBT 的特征频率和最高振荡频率与集电极电流的关系

由于 SiGe-HBT 具有很高的截止频率和最高振荡频率,所以由 SiGe-HBT 构成的逻辑门电路的速度也能够达到很高,能做到门延迟时间 t_{pd} 很短。图 1-3 是通过 SiGe-HBT 环行振荡器测量而得到的 ECL 门电路的 t_{pd} 的数据(不同曲线对应于 HBT 的不同发射极长度 L_E ,发射极宽度 $W_E = 0.2 \mu\text{m}$,逻辑电压摆幅 $V_L = 250 \text{mV}$),可见,最小的门延迟时间为 6.7ps。如果是 CML 门电路,门延迟时间可降低到 7.7ps。对 SiGe-HBT 的噪声测量得知, SiGe 器件的低频噪声 ($1/f$ 噪声) 特性与 Si-BJT 的差不多,而优越于 GaAs-MESFET 和 Si-MOSFET;至于高频热噪声,也明显地得到了降低,这是由于 SiGe-HBT 的基极电阻可以做得很小的缘故。此外,辐射加固的研究表明,在一定条件下, SiGe-HBT 的抗辐照性能比所有的 Si 器件都要好。

长期以来,认为硅基器件的速度总是低于 III-V 族器件,但是近几年来由于 SiGe 器件的发展使得这种情况有了很大的改观。硅基器件的速度通过硅基带隙工程(即在硅衬底上生长一层高质量的 SiGe 合金薄层),已经得到了很大的提高。现在采用 Si 工艺制作的 SiGe-HBT 的 f_T 已提高到接近 III-V 族 HBT 的水平,达到了 $f_T \geq 150 \text{GHz}$ (图 1-4)。

与标准的 Si-BiCMOS 技术相比, SiGe-BiCMOS 技术在低噪声放大器电路中不仅

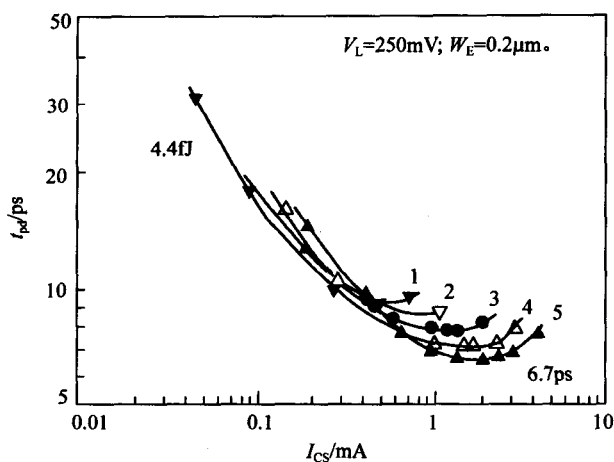


图 1-3 SiGe-HBT 的 ECL 门延迟时间

1— $L_E=0.5\mu\text{m}$; 2— $L_E=0.7\mu\text{m}$; 3— $L_E=1.0\mu\text{m}$; 4— $L_E=1.5\mu\text{m}$; 5— $L_E=2.0\mu\text{m}$ 。

可以提供优良的性能,而且还可以实现集成。与 GaAs 器件(MESFET、HBT、HEMT)相比,在无线应用领域,SiGe-HBT 的功耗几乎降低了 50%,并且成本更低;在低频噪声放大电路应用中,SiGe-HBT 既具有与 GaAs 器件相当的性能,又具有与 Si 器件相同的特征和能力(在较低直流功率时)。

图 1-5 示出了各种异质结双极型器件的击穿电压与最高截止频率之间的关系。GaAs 器件的击穿电压高于 SiGe 器件,故 SiGe 器件比较适合于高频小功率应用,而且 SiGe-HBT 在低直流电压下的功率附加效率(PAE)较高,因此它也能够较好地适用于功率放大器。由于 SiGe-HBT 具有这样一些优良的性能,所以使得它在个人数字通信、码分多址驱动放大器和振荡器(包括压控振荡器——VCO)等集成电路中有着广泛的用途。

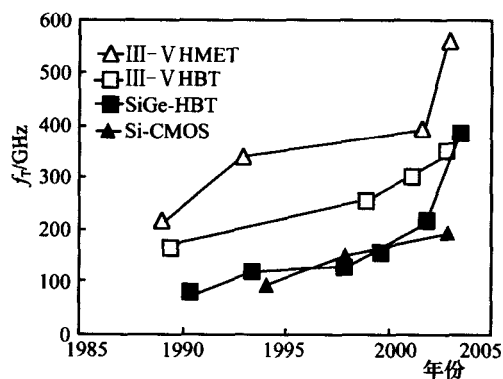


图 1-4 各种晶体管 f_T 逐年增长的趋势
(SiGe-HBT 的 f_T 最高为 375GHz)

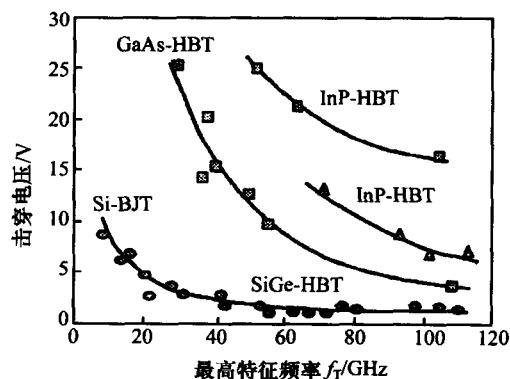


图 1-5 各种 HBT 的击穿电压与
最高 f_T 的关系

现在,日本 NEC 电子器件公司已经研制出噪声系数为 0.9dB 的 SiGe 双极晶体管(型号为 2SC5761),并已开始销售,该器件主要用于 W-CDMA 等第三代移动通信机、蓝牙

接收部分的低噪声放大器等。另外,IBM 公司采用 SiGe 双极技术,通过对设计方案的改进已经开发出了具有 350GHz 的 SiGe 晶体管,并计划在不久的将来让新器件能用于 150GHz 以上的高速通信芯片中。

1.1.2 SiGe 场效应器件

众所周知,现在 Si-CMOS IC 随着特征尺寸的不断缩小,性能和集成度也相应地不断在提高。到 2010 年时,DRAM 的集成规模将达到 64Gb;预计到 2024 年时,最小特征尺寸将达到 10nm。这是由于在缩小尺寸时所产生的许多器件的工艺问题,都将有可能陆续地通过引入新技术而得到适当解决的缘故。其中一项重要的新技术就是 SiGe 能带工程,它能够使载流子迁移率(特别是空穴的迁移率)得以大大提高。图 1-6 是对于应变 Si/Si_{1-x}Ge_x/Si 结构在 300K 时实验得到的有效空穴迁移率与有效垂直电场之间的关系。可见,采用了 SiGe 能够明显地增强空穴的迁移率;在 $x=0.5$ 和在较高有效电场时,空穴迁移率可增大 2 倍。由于这种迁移率增强效应,使得 Si/Si_{1-x}Ge_x-MOSFET 和应变 Si-MOSFET 的性能要优于通常的 Si-MOSFET。在深亚微米领域,数值模拟指出,Si/SiGe-MOSFET 也可提供优良的性能,并且在 SiGe 沟道异质结构 MOSFET(HFET)的源端观察到了速度过冲现象,因此 SiGe 器件可以对极小尺寸的 Si-CMOS 起着替代或者补充的作用。

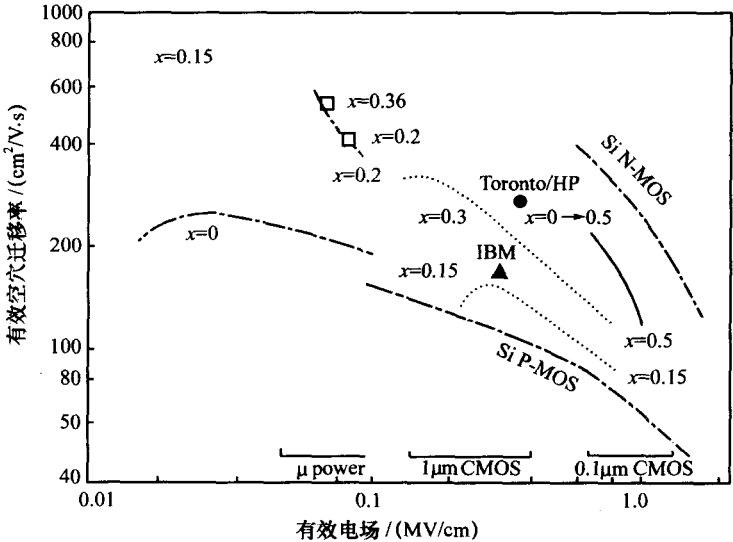


图 1-6 应变 Si/Si_{1-x}Ge_x/Si 结构中有效空穴迁移率与有效垂直电场的关系

..... Warwick; --- France Telecom; — Siemens.

近几年为了满足对电流驱动能力、高频特性和较高载流子迁移率的不断要求,各种新型 SiGe/Si MOSFET 也在不断地涌现,同时不断地取得新的进展。Texas 大学研制出了一种新型的 SiGe/Si P 型 MOSFET——所谓高空穴迁移率异质结晶体管(HMHJT)(栅长为 100nm),这种晶体管降低了短沟道效应和提高了驱动电流,其性能可与通常的 N 型 MOSFET 相比较;可作为小功率备用电源或者高阈值电压的场合应用。富士通研究所通过采用 SiGe 沟道,并将沟道方向设定为<110>方向(在该方向上载流子的有效质量较小),

大大提高了载流子的迁移率,从而成功地开发出了耗电低的高速 P 型 MOS 晶体管。松下公司开发出了一种在 0.5V 电压下能够工作的新颖晶体管(即 SiGe-N 型 MOSFET),其特点是在 MOS 晶体管的电流通路(沟道区域)上引入了一个小小的 SiGe 层。

调制掺杂型 FET(MODFET)技术是目前 SiGe/Si 异质结 FET 中开发的热点,受到了人们的极大关注。德国 Ulm 大学在 Si(100)衬底上通过 MBE 生长等技术,研制出了带有非常薄的渐变 $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31}$ 缓冲层的 SiGe/Si N 型调制掺杂场效应晶体管(N-MODFET),得到在室温和 77K 下的电子迁移率分别为 $1415\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $5270\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,载流子浓度约为 $3\times 10^{12}/\text{cm}^2$;用 Pt 肖特基栅制作的晶体管具有良好的直流特性,漏电流为 $330\text{mA}/\text{mm}$,跨导为 $200\text{mS}/\text{mm}$;在 100nm 栅长时, f_T 为 49GHz , $f_{\max}$ 为 95GHz 。美国 Illinois 大学采用超高真空化学气相淀积(UHVCVD)方法制作出了具有较高空穴迁移率的 Si/SiGe 异质结,并制成了 $0.1\mu\text{m}$ 栅长的高性能 P 型调制掺杂 FET(MODFET)和金属—氧化物半导体 MODFET(MOS-MODFET)。这些 MODFET 和 MOS-MODFET 均可应用于无线通信。图 1-7 对比地示出了 SiGe-MODFET 和其他各种 FET 的截止频率与栅极长度的关系(实线是理论结果,虚线是实验结果)。在小尺寸时由于寄生效应增大的缘故,使得实验测得的结果稍低于理论结果;并且 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的 N-MODFET 的截止频率(相应的开关时间)与 GaAs/AlGaAs N-MODFET 的相当,而优于 GaAs-MESFET;对于 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的 P-MODFET,则更是比其他任何 P 型沟道 FET 的开关速度都要快。

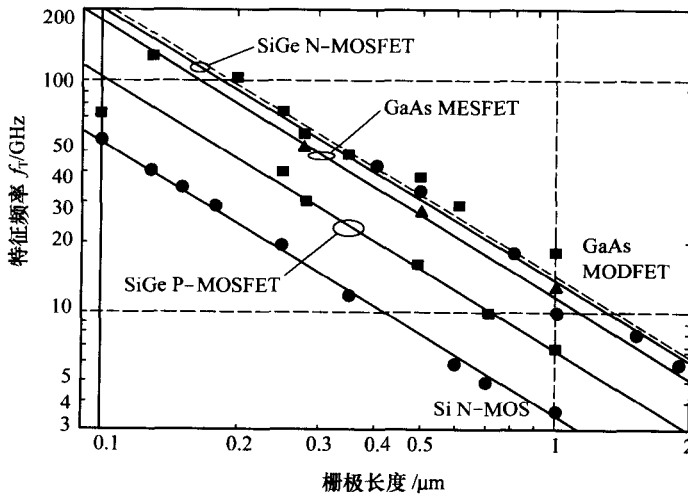


图 1-7 SiGe-MODFET 和其他 FET 的特征频率与栅长的关系

SiGe-HFET 是第二代 SiGe 器件,也是由开发 HBT 的相同机构研究出来的。在 SiGe-HFET 中,同样利用了 SiGe 能带工程来调整带隙和晶格常数的差别来产生应变,是一种二维电子气(2-DEG)和二维空穴气(2-DHG)的应变沟道 FET,其中的载流子迁移率大大超过 Si。通常, SiGe-HFET 可按其层式结构分成 4 种(图 1-8):(a)型是在弛豫 SiGe 缓冲层上生长具有张应变的硅沟道而构成的 FET,这种器件除热沉受到一些限制之外,可看作为传统的 CMOS 晶体管。在沟道中进行 N 型或 P 型掺杂可对其阈值电压进行调整;2001 年,IBM 宣布该器件将是市场开辟的下一个目标,STM、Hitachi、Motorola 等

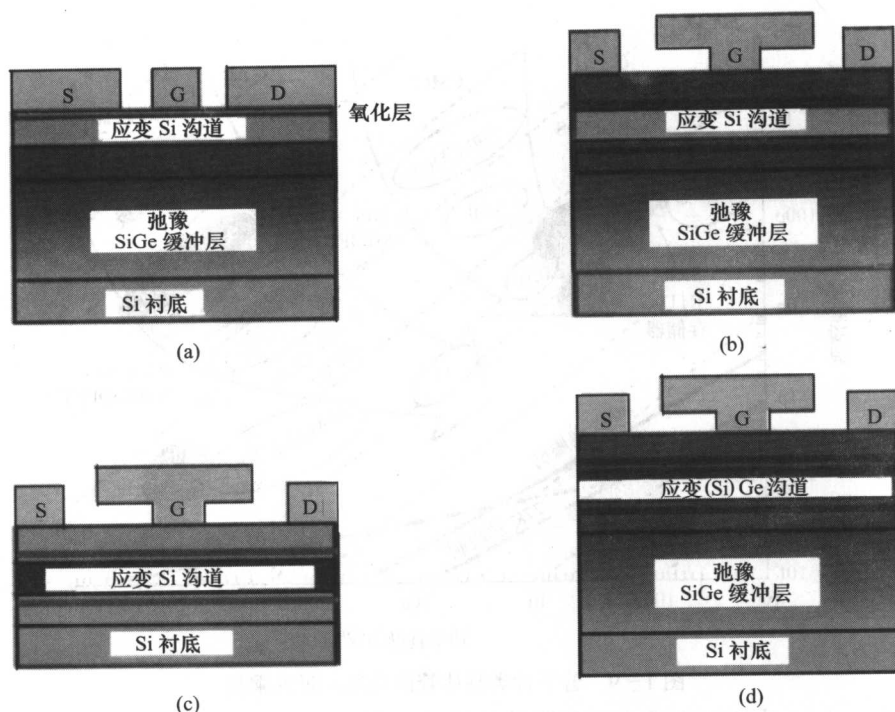


图 1-8 4 种不同类型的 HFET

(a) 表面沟道 MOSFET; (b) 埋沟 N-MODFET;
(c) 埋沟 P-MODFET(低 Ge 含量); (d) 埋沟 P-MODFET(高 Ge 含量)。

公司也持有相同的观点。(b)型是(a)型的一种升级版,其掩埋沟道允许调制掺杂,到2002年这种结构的肖特基和结型栅 FET 都已经实现;其亚阈值斜率、阈值电压和击穿特性都可以通过各种调制掺杂和栅/沟间距加以改变。(c)型是 P-MODFET 最简单的形式,但是其中锗含量最高大约只能是 30%(因要受到临界厚度的限制)。(d)型可通过富锗或者甚至是纯锗的二维电子、空穴沟道来实现更加优良的性能,但一个弛豫的 SiGe 缓冲层仍是重要的。

器件具有高速性能的显著特点就是其中载流子迁移率很高。(a)型 FET 的迁移率可比 N-MOS 器件的提高 80% 左右;而(b)型 MODFET 的迁移率可高达 $2800\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$;其他性能如跨导、饱和电流和截止频率等均可提高 30%~40%。

图 1-9 比较了若干种晶体管的功耗—延迟乘积。看来,采用 SiGe 器件有可能发展出电池供电的电子设备——这是一个重要的发展方向。

1.1.3 SiGe 光电器件

在 Si 中 Ge 组分的引入使得在传统硅工艺基础上可以制作出异质结构,这大大扩展了硅在光电子学领域的应用潜力,打破了 III-V 族和 II-VI 族化合物半导体对传统光电子领域的垄断。NEC 公司已经开发出了一种选择外延生长的 SiGe 平面光探测器件。而 IBM 在 2000 年以前就已经开发出 5HP 工艺($0.5\mu\text{m}$ SiGe-BiCMOS),将 SiGe 异质结光电探测器件集成到了 CMOS-VLSI 电路中,并已投入生产。