

文章编号:1004-3365(2005)05-0521-06

微波大功率 SiGe HBT 的研究进展及其应用

徐剑芳, 李 成, 赖虹凯

(厦门大学 物理系, 半导体光子学研究中心, 福建 厦门 361005)

摘 要: 文章论述了 SiGe 异质结双极晶体管 (HBT) 在微波功率领域应用的优势, 详细介绍了微波功率 SiGe HBT 的结构设计方法, 以及主要影响器件性能的材料和结构因素, 评述了其最新进展及今后发展方向。

关键词: SiGe; 异质结双极晶体管; 微波; 大功率

中图分类号: TN304.2⁺4

文献标识码: A

Progress in the Development of Microwave High Power SiGe HBT's and Its Applications

XU Jian-fang, LI Cheng, LAI Hong-kai

(Department of Physics, Semiconductor Photonics Research Center, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, P. R. China)

Abstract: Advantages of SiGe heterojunction bipolar transistors (HBT's) in the application to microwave power field are reviewed. Further described in detail is the methodology in the structural design of microwave power SiGe HBT's, as well as the effects of material and structure on the device performance. Latest progress in this field is presented and the direction of future development is discussed.

Key words: SiGe; Heterojunction bipolar transistor (HBT); Microwave; High power

EEACC: 2560; 1350

1 引 言

微波功率晶体管是工作频率在微波范围, 输出功率约为瓦级的晶体管, 是微波单片集成电路 (MMIC) 中不可或缺的关键器件。MMIC 源于军事高科技研究, 一直在军事领域 (如空间电子技术、雷达、导弹制导等) 有着广泛的应用。如今在人们日常生活中的应用 (如移动通信系统, 交通系统自动监测等) 也有了飞速发展。

当前的微波功率晶体管市场上, 有传统的同质结 Si 基器件 (FET、BJT 等), 和以 GaAs 为代表的 III-V 族材料异质结器件 (HEMT、FET、HBT 等), 以及近几年新发展的 GaN FET、SiC FET 和 SiGe HBT、SiGe FET 等^[1,2]。传统的 Si 基器件虽然成本低, 但其频率响应低, 不适合高频微波应用。而

GaAs、InP 等 III-V 族材料的电子与空穴迁移率比硅高得多, 具有极佳的高频特性, 因而高频段功率晶体管的市场一直以 GaAs 基器件为主导。但 III-V 族材料存在着造价高、环保成本高、热传导性差, 机械性能差等缺点。为此, 亟需材料性能佳、成本低且高频特性好的新材料。

Si/SiGe/Si 异质结双极晶体管 (HBT), 通过在基区引入 Ge, 形成了宽禁带的 Si 发射区, 窄禁带的 SiGe 基区和宽禁带的 Si 集电区的异质结晶体管。与传统的 SiBJT 相比, 它具有更高的频率特性, 因而在微波高频段工作有很大的潜力。与 GaAs 基器件相比, 又具有成本低、导热性好、衬底机械性能好等优点。特别是可与成熟的硅集成技术和 CMOS 技术兼容, 生产上更具灵活性^[3,4]。因此, 近年来, SiGe HBT 得到迅速发展。2003 年, IBM 研制出截止频率高达 350 GHz 的 SiGe HBT^[5]。在国内, 也

收稿日期: 2005-01-10; 定稿日期: 2005-03-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60336010); 福建省青年科技人才创新项目 (2004J021) 资助

有很多研究单位从事多年 SiGe HBT 的研究^[2, 6-10], 截止频率也已达约 20 GHz^[11]。SiGe HBT 可用于制作低噪声放大器、混频器、功率放大器等不同的射频集成电路。在微波功率领域, 自从 1995 年研制出第一只工作于 C 波段的微波功率 SiGe HBT^[12], 原来一直被 GaAs 等 III-V 族材料占据的高频大功率器件市场就有可能被成本低的 SiGe 器件所代替。国际上, 该领域的研究近几年又有了新进展, 研制出了工作频段与输出功率更高, 性能更好的 SiGe HBT。

本文介绍了 SiGe HBT 在微波功率领域应用的优势, 详细论述了微波功率 SiGe HBT 的结构设计方法以及主要影响器件性能的材料和结构因素, 评述了其最新进展和今后发展方向。

2 微波功率 SiGe HBT 的特性

作为微波大功率器件, 晶体管必须兼具高频与大功率的性能特点。下面从频率特性、电特性、热性能等方面, 将 SiGe HBT 与 SiBJT、GaAs 基器件作一比较。

2.1 频率特性

$$f_T = \frac{1}{2(b + e + c + e_b + c_b)} \quad (1)$$

截止频率 f_T 的高低主要取决于基区渡越时间 b 和发射区基区电容充电时间 e_b 。对于普通的 SiBJT, 器件各区比较厚, 主要通过减小器件的尺寸来减小结电容, 从而减小 e_b , 提高 f_T 。而 SiGe HBT 的纵向结构是通过外延方法得到的, 基区厚度能控制得很薄 (50 nm 以下), 缩短了 b 。同时, 由于 Si/SiGe 异质结带隙差的存在, 晶体管不要求具备高掺杂发射区和低掺杂基区就可以保证有较大的电流增益, 此时, 发射区掺杂可降低, 减小 EB 结电容, 有效地降低 e_b , 进而提高了 f_T 。在微波功率 SiGe HBT 中, 为了保证较高的击穿电压, 集电区的厚度不能太薄, 使得集电区渡越时间 c 较大, 可与 b 比拟。所以, 在功率晶体管的设计中, c 也是重点关注的参数。

$$f_{\max} = \frac{f_T}{\sqrt{8 R_b C_{cb}}} \quad (2)$$

最大振荡频率 f_{\max} 决定了晶体管输出功率的有效频率范围。由 (2) 式得, f_{\max} 不仅受 f_T 的影响, 还受基区电阻 R_b 与集电结电容 C_{cb} 的影响。SiGe HBT 的高掺杂基区可以减小 R_b , 进而提高 f_{\max} 。

总之, SiGe HBT 的频率性能与 SiBJT 相比, 有了飞跃性的提高。但与 GaAs 基器件相比, 后者材料的载流子迁移率和饱和速度均高于 SiGe 材料。其频率特性仍然优于 SiGe 器件。但是, 外延 SiGe 材料的成本仅为外延 III-V 族材料的 1/6 到 1/10。低廉的成本和优良的性能是 SiGe HBT 最大的优势。

2.2 电流特性

2.2.1 大注入自建电场和基区电导调制效应^[13]

晶体管作大功率输出时, 发射区注入到基区的电流增大, 此时, 基区中易出现大注入自建电场和基区电导调制效应, 基区容易因多子浓度的增加而使基区的电阻率相应下降。

$$= \frac{N_E W_E D_E}{N_B W_B D_B} \exp(E_{g, \text{app}} / KT) \quad (3)$$

由 (3) 式可知^[14], 在 SiGe HBT 中, 直流增益系数主要由异质结的能带差 $E_{g, \text{app}}$ 决定, 而发射区与基区多子浓度比 N_E / N_B 对 β 的影响, 与之相比可以忽略。所以, 在 SiGe HBT 中, 基区的掺杂浓度可以高于发射区掺杂浓度。即使在大电流情况下, 发射区注入的载流子浓度仍不足与基区多子浓度相比拟, 基区电导调制效应和大注入自建电场效应减弱。

2.2.2 有效基区扩展效应 (Kirk 效应)^[13] 与大注入异质结势垒效应 (HBE)^[15]

Kirk 效应的抑制在 SiGe HBT 的研制中是个重要问题。如图 1 所示, 在 HBT 中, 基区的能带较发射区窄, EB 结的电子势垒比 BJT 低, 但 BC 结的空穴势垒增大。在大电流工作时, 由于 Kirk 效应, 有效基区宽度扩展。

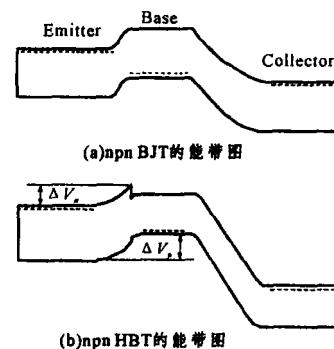


图 1 npn BJT 和 npn HBT 的能带图

HBT 的 BC 异质结存在带隙差且主要发生在价带, 形成比普通同质结晶体管高得多的空穴势垒, 空穴不易越过 BC 结, 而在基区形成积累 (图 2)。空穴在基区积累的后果导致结附近集电区电子浓度升

高,等效于在集电结附加了一个电子势垒,阻止从发射区注入的电子输运到集电区,造成从发射区到集电区的电流密度减小,基区的电流密度变大,从而降低了直流增益系数、截止频率 f_T 等重要参数。这种在 HBT 中由 Kirk 效应导致的上述现象也称为大注入异质结势垒效应 (HBE)。Joseph 等人曾对此效应进行了深入的研究,发现调节异质结中 Ge 的分布,在接近 BC 结的基区迅速降低 Ge 含量,或将 Ge 分布引入到集电区,以减少 BC 结的空穴势垒,或者调节集电区的掺杂分布,在 BC 结掺杂较低,随后向高浓度渐变,均可有效抑制 HBE 效应。

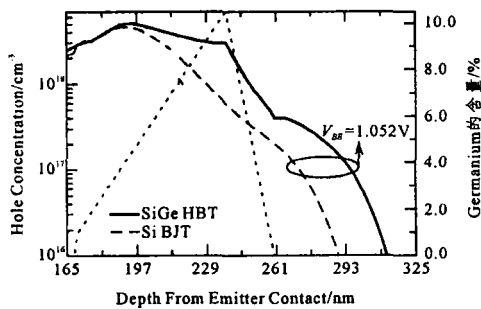


图 2 模拟的 SiGe HBT 与 Si BJT 在 BC 结的空穴积累浓度 (点线表明 Ge 的分布以标示基区位置)^[15]

2.2.3 发射极集边效应^[13]

在大电流工作时,基区电阻横向压降作用,导致 EB 结各部位正向注入电流的大小悬殊。靠近发射极条边缘处的电流远大于发射极条中间部位的电流。这种现象称为发射极电流集边效应。此效应减小了发射结中央电流密度,同时,增大了结边缘处的电流密度,容易产生基区电导调制效应和基区扩展效应。SiGe HBT 由于 SiGe 异质结的引入,可在不减小 R_b 的情况下采用高掺杂基区,减小 R_b ,以有效地减小电流集边效应。

2.3 热效应

长时间大功率工作会使器件升温,如果设计不当,将使器件产生过热点,容易使掺杂组分的物理界面发生偏移,影响器件的工作性能。SiGe 材料的热导率是 GaAs 材料的 3 倍,所以, SiGe 器件比 GaAs 器件具有更好的散热能力,耗散功率较大,适合于作功率器件。研究表明,在 SiGe 基区中掺入少量 C,可有效阻止因热效应引起的基区硼杂质的瞬态增强外扩效应^[15]。在发射极或基极添加镇流电阻,不均匀长度的发射极条与不均匀指距发射极条等设计,均可有效减小热效应带来的危害^[17]。

3 微波功率 SiGe HBT 常用结构设计

异质结器件的设想在 20 世纪 50 年代就已经提出,20 世纪 70 年代,用化学气相沉积法 (CVD) 第一次生长出 AlGaAs/GaAs 材料。而 Si 与 Ge 的晶格常数相差较大,外延生长较难。直到 1985 年,才用 MBE 生长出 SiGe/Si 外延材料^[18]。目前, SiGe/Si 外延应力层的生长主要用分子束外延 (MBE) 和超高真空化学气相沉积 (UHVCVD) 方法。其中, UHVCVD 又以其设备成本较 MBE 低、生产流量大、生长的外延层质量高等优点,受到国内外很多研究组的肯定。具体的 SiGe HBT 的制作工艺,如双台面自对准、多晶硅发射极接触、选择性外延与非选择性外延等工艺已有综述^[7,8]。其中,双台面工艺因其工艺简单,可以在生长好的材料上加工制作器件,已为国内很多研究组所采用。

下面就 SiGe HBT 的结构与性能参数的关系,对典型的材料生长纵向结构与器件结构的横向版图设计进行讨论。

3.1 纵向结构参数的设计^[4,12,18]

纵向参数优化设计的目的是获得大的电流密度和击穿电压,从而获得最佳输出功率,并得到比较高的频率参数。纵向结构设计主要集中于集电区、基区和发射区的厚度、成分和掺杂浓度的调整。

3.1.1 集电区参数的设计

对于高频功率器件的集电区设计,是在保证有足够大的击穿电压 BV_{ceo} 的情况下,尽可能地减少电荷在集电区的存储时间。晶体管的集电结击穿电压 BV_{cbo} 可以通过提高集电区厚度和降低其掺杂浓度得到提高^[20]。但集电区的掺杂不能太低,否则会增大集电区电荷存储时间,使晶体管的截止频率 f_T 降低,影响器件的高频性能。设计时尽量减薄集电区的厚度,其厚度主要由满足击穿电压下的集电结耗尽层宽度决定^[4]。

3.1.2 基区参数的设计

基区的结构参数极大地影响着晶体管的 f_T 和 f_{max} 。除了基区厚度 W_b 的选取外, SiGe 基区中 Ge 的含量及其分布,硼掺杂的浓度,也是设计的重点。

外延生长方式可以得到薄的基区,减少 R_b ,提高 f_T 。而基区中 Ge 的含量越高,发射区与基区带隙差就越大,发射效率就越高。但 EB 结的击穿电压相应地变小,所以,在设计 SiGe 功率器件时, Ge 的组分不宜太高。Ge 的分布可采用从发射结到集电

结由低向高渐变,在基区形成一个漂移场,减小基区渡越时间 t_b ,提高 f_T 。提高基区 B 的掺杂,可减小基区电阻,提高电流增益 β 和截止频率 f_T 。

此外,功率晶体管工作时产生的不良热效应,可能造成基区杂质外扩,降低器件的性能。可在基区两侧加入本征 SiGe 阻挡层,或在外延 SiGe 基区时加入微量的 C (0.5%),以抑制杂质热扩散。

3.1.3 发射区参数的设计

发射区的参数影响到 SiGe HBT 的发射结电子注入效率、截止频率以及发射极欧姆接触等性能。与传统的同质发射结不同, SiGe HBT 异质发射结的注入效率主要通过 EB 结的能带差决定。在 SiGe HBT 中,适当降低发射区的掺杂浓度,可减小 EB 结电容,保证较高的 f_T 。为了使发射区具有良好的欧姆接触,可在外延掺杂浓度较低 ($10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的发射区后,再外延一层高掺杂 (10^{19} cm^{-3}) 的硅帽层或多晶硅帽层,以保证良好的发射极欧姆接触。图 3 是一典型的微波功率 SiGe 晶体管的纵向外延层厚度、掺杂分布、Ge 含量等参数的示意图^[4]。

Emitter cap	Si	n^+	P	$2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	100 nm
Emitter	Si	n	P	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	100 nm
Spacer	$\text{Si}_{0.75} \text{Ge}_{0.25}$	i			5 nm
Base	$\text{Si}_{0.75} \text{Ge}_{0.25}$	p^+	B	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	100 nm
Spacer	$\text{Si}_{0.75} \text{Ge}_{0.25}$	i			5 nm
Collector	Si	n^-	P	$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	500 nm
Sub-collector	Si	n^+	P	$2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	1000 nm
Substrate	Si(100)	p^-		$1 \times 10^{29} \text{ cm}^{-3}$	540 μm

图 3 典型的 SiGe/Si HBT 的纵向组分设计^[4]

3.2 横向结构参数的选取^[4, 19, 21]

横向结构的设计必须考虑器件的发射结、集电结等尺寸对器件的频率和输出功率等性能的影响,以及不良热效应对器件性能的负面影响。横向结构设计是以器件版图设计为主。主要的横向图形参数是:发射极的总周边长与发射区的面积之比 L_E/A_E 、发射极的总周边长与集电结的面积之比 L_E/A_C ,以及单元发射极的条宽和长度。设计中,要优化多指发射极的数量、指宽、指长和指距等值。

减小发射极指宽,提高 L_E/A_E 与 L_E/A_C 的比值,获得较长的发射极周边长度 L_E ,可有效减小发射极电流集边效应、基区电导调制效应等不利因素,提高输出功率;同时,保持尽量小的发射极面积 A_E 和集电极面积 A_C ,可减少发射结电容 C_{EB} 和集电结电容 C_{BC} ,保持较高的频率特性。

高功率管容易出现热流集中与“过热点”现

象,降低晶体管的功率性能。改善器件平面结构的设计,改良器件的半导体和金属电极的欧姆接触等措施,都有利于抑制不良热效应。2002 年, Ma 等人在提高 f_{max} 与减小热效应之间做了优化,使其制作的微波功率 SiGe HBT 在 X 波段工作频率下输出功率可达 263 mW。如图 4 所示,该方案改变了常规密集型的均匀指状结构设计,改用两发射极指一组,集电极安排在各组之间的新平面结构。这种结构扩大了指距,有利于热的分散,同时,尽量减小了基区电阻 R_B ,发射结电容 C_{EB} 与集电结电容 C_{BC} 等参数,所以仍能保持良好的 f_{max} 。

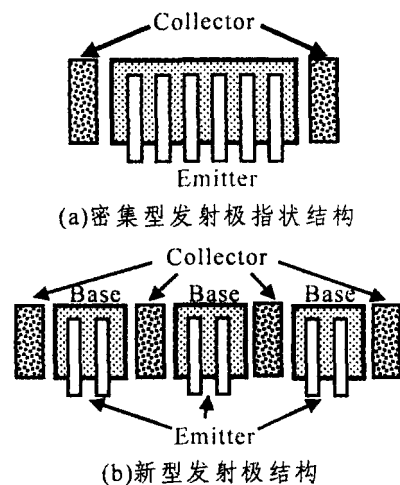


图 4 密集型发射极指状结构和新型发射极结构^[4]

4 微波功率 SiGe HBT 的研究进展

SiBJT 在 20 世纪 60 年代取代真空电子管进入微波领域,在微波应用上曾起到重大的作用。1965 年 Johnson 详细探讨了晶体管的频率参数和功率特性之间的关系。对于体 Si 晶体管来说,一个基本限制就是其截止频率 f_T 和击穿电压 BV_{ce0} 的乘积 $f_T \cdot BV_{ce0} = 200 \text{ GHz} \cdot \text{V}^{[22]}$ 。经过 30 年的发展, SiBJT 的性能已经接近这个理论极限。Johnson 还提到以 GaAs、InP 为代表的 III-V 族材料,由于其电子迁移率、饱和速度和击穿电压 BV_{ce0} 均高于 Si、Ge 材料,可以有更高的 $f_T \cdot BV_{ce0}$ 值(一般在 $800 \text{ GHz} \cdot \text{V}$ 以上),更容易制造出符合高频大功率用途的器件。AlGaAs/GaAs HBT 弥补了 SiBJT 不能工作于微波高频频段的缺陷。

随着研究的深入,已有不少突破 Johnson 极限的 SiGe HBT 的报道。1998 年, Kwork 对 Johnson 极限进行重新计算,发现 Si 晶体管的 $f_T \cdot BV_{ce0}$ 值

可以更高,可达 $500 \text{ GHz} \cdot \text{V}^{[23]}$ 。最近的理论研究表明,新设计的垂直沟槽 npn SiGe HBT 的 $f_T \cdot BV_{cbo}$ 仿真拟合值高达 $2\ 375 \text{ GHz} \cdot \text{V}^{[24]}$,这是个大的突破。如图 5 所示,这种 SiGe HBT 设计在器件有源区边缘用绝缘材料隔离后加上场板(Field Plate),使器件中的电场分布更趋合理。同时,调整集电区的掺杂分布,在 BC 结掺杂较低,随后向高浓度渐变,使器件有较高的击穿电压 BV_{cbo} ,也有效提高了集电区总体掺杂浓度,降低了集电区电阻 R_c 。新设计的器件在计算机模拟中可以有效抑制 Kirk 效应,其截止频率 f_T 比普通的 SiGe HBT 在很大程度上得到提高。同时,器件具有较高的 BV_{cbo} ,所以 $f_T \cdot BV_{cbo}$ 仿真拟合值大大提高。由此可见,SiGe HBT 的性能可与 β -族器件相媲美。但是,还需改良其紧凑的有源区分布,以免在实际器件制作时,热分散能力太差,降低器件的性能。

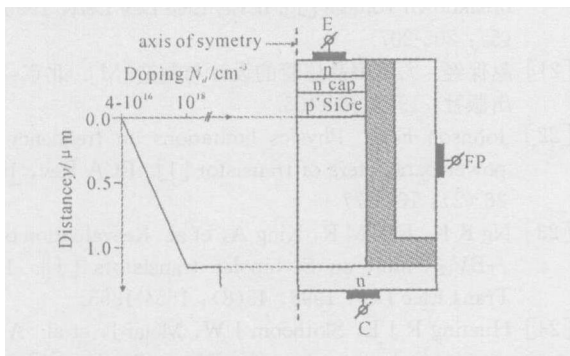


图 5 增加了 FP,并在集电区做 n 型掺杂渐变分布的新型垂直沟道 SiGe HBT 简图^[24]

在低微波频段,近年来发展起来的 Si 横向扩散 MOSFET (LDMOSFET) 由于改进了结构,工作频率可以达到 GHz 范围,功率可达几百瓦,是很有前途的低微波频段大功率放大器件。而在高微波频段,最常用的仍然是 GaAs FET 器件。但是,随着 SiGe HBT 在该领域的深入研究,已可取代 GaAs 基器件工作于高微波波段,以下根据器件尺寸的大小,分两个部分介绍相关进展。

4.1 小尺寸器件

1994 年,Erben 等人第一次发现 SiGe HBT 作为功率晶体管具有高频特性^[25]。这种晶体管采用双台面自对准结构,基区采用均匀高掺杂 Ge 分布 ($\text{Si}_{0.71}\text{Ge}_{0.29}$)。最大输出功率可达 1.3 W/mm 发射极条长,而其 f_T 和 f_{max} 分别达到 46 GHz 和 49 GHz 。 BV_{ceo} 为 3 V ,并提出可通过增加集电区厚度和降低集电区掺杂浓度来提高 BV_{ceo} 。1995 年,Hobart 等人实验验证了该观点^[20],制作出 BV_{ceo} 为

18 V 的 SiGe HBT,但其集电区厚度的增加使得 τ_c 变大,制约了 f_T 的提高, f_T 仅为 10 GHz 。同年 12 月,Erben 等人成功研制出在 C 波段工作的 SiGe 功率 HBT,突破了原有的 Si 晶体管工作的 S 波段^[12]。1996 年,Schüppen 等人用类似商业化的流程,研制成功 10 指和 60 指的 SiGe HBT^[26],其中,60 指 SiGe HBT 的工作频率为 1.9 GHz 时,输出功率为 1 W ,功率附加效率 PAE 为 44% , BV_{ceo} 约为 $4 \sim 5 \text{ V}$ 。2001 年以来,Mohammadi 和 Ma 等人已经将 SiGe HBT 的工作频率提高到 X 波段,并对 Ku 波段和 K 波段的晶体管展开研究。在 X 波段 (8.4 GHz) 下,器件的 BV_{cbo} 为 24 V , f_{max} 为 37 GHz ;输出功率为 263 mW ,PAE 为 28.1% 。最大输出功率 430 mW ,最大集电极效率为 36.9% ^[4,27]。小尺寸的微波大功率晶体管主要用于如手机、PDA 等手持终端。在这些应用中,晶体管除了要满足尺寸小,适用于便携的手持终端外,还须具备在较低的工作电源(如 $2 \sim 5 \text{ V}$ 的电池)下,其功率放大器仍有稳定的线性高增益。当器件尺寸比较小时,集成密度大,热效应显著,如何有效地减少其危害,也是制作微波功率 SiGe HBT 考虑较多的问题。此外,寄生元件的存在也会干扰器件的性能,在器件的制作中应该考虑采纳适当的隔离技术(如使用 SOS 或 SOI 衬底),来减少寄生因素。

4.2 大尺寸器件

1996 年,Potyrnj 等人报道了第一个大面积 SiGe HBT^[28],其最大输出功率可达 230 W 。在 S 波段 (2.8 GHz) 时,输出功率为 200 W ,集电极效率为 46% ,功率增益为 6.9 dB 。而相同尺寸的微波功率硅晶体管,输出功率仅为 150 W ,集电极效率只有 35% ,且最大饱和输出功率为 180 W 。证实了 SiGe HBT 比 Si 微波功率晶体管更适合于大功率高频工作。2002 年,Johansson 等人发表了在 L 波段 ($2 + \text{GHz}$),AB 类连续波条件下工作的 SiGe HBT^[29],输出功率为 20 W ,功率附加效率为 68% 。可与硅基微波大功率晶体管相媲美。

大尺寸微波大功率晶体管主要应用于军事雷达、手机基站等。与手机终端的应用不同,由于它的尺寸相对比较大,集电极电流很高,在几十伏的电源电压下可提供几十到几百瓦的输出功率。但是,由于其发射极的尺寸比较大,导致发射结电容大,发射结势垒渡越时间 τ_e 变长,从而使截止频率 f_T 降低。目前,研制成功的大尺寸 SiGe 微波功率 HBT 的工作频率还仅限于 L 和 S 波段,落后于小尺寸器件工

作频率的发展。

5 结 语

SiGe HBT 经过十几年发展,在频率、性能和工艺等各方面都有了迅速的发展,其低成本和高性能的潜质使高频大功率 SiGe HBT 有着广阔的应用市场。到目前为止,这个领域研究的深度与广度仍有扩展的空间。比如,可以通过改变具体的结构设计或外延所用的衬底材料,以及在外延时掺入微量的 C 等方法,来提高微波功率 SiGe 晶体管的工作频率、工作电压和输出功率,改善器件的稳定性。

参 考 文 献:

- [1] Weitzel C E. RF power amplifiers for wireless communications [A]. Technical Digest 24th Annual IEEE GaAs IC Symp [C]. Monterey, CA. 2002. 127-130.
- [2] 王良臣. 半导体量子器件物理讲座 第三讲 异质结双极晶体管(HBT)[J]. 物理, 2001, 30(6): 372-379.
- [3] 刘刚, 余岳辉, 史济群, 等. 半导体器件-电力敏感, 光子, 微波器件 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 301.
- [4] Ma Z Q, Mohammadi S, Lu L H, et al. An X-band high-power amplifier using SiGe/Si HBT and lumped passive components [J]. IEEE Microwave Wireless Compo Lett, 2001, 11(7): 287-289.
- [5] Freeman G, Rieh J S, Jagannathan B, et al. SiGe HBT performance and reliability trends through f_T of 350 GHz [A]. Proc 41st Annual IEEE Int Reliab Phys Symp [C]. Dallas, TX. 2003. 332-338.
- [6] 钱伟, 张进书, 贾宏勇, 等. 微波低噪声 SiGe HBT 的研制[J]. 半导体学报, 2000, 21(5): 445-450.
- [7] 姚飞, 成步文, 王启明. SiGe HBT 及其高速电路的发展[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(10): 5-14.
- [8] 王哲, 亢宝位, 肖波, 等. SiGe 异质结微波功率晶体管 [J]. 微波学报, 2002, 18(4): 84-89.
- [9] 薛春来, 成步文, 姚飞, 等. 高频大功率 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ HBT 的研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2004, 41(328): 14-21.
- [10] Liu D-G, Xu S-L, Li K-C, et al. Growth and quality control of MBE-based SiGe HBT for amplifier applications [J]. Microelect J, 2003, 34 (5-8): 587-589.
- [11] 邹德恕, 徐晨, 陈建新, 等. GSMBE 生长的用于研制 HBT 的 SiGe/Si 异质结材料 [J]. 半导体学报, 2001, 22(8): 84-89.
- [12] Erben U, Wahl M, Schüpken A. Class A SiGe HBT power amplifiers at C band frequencies [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1995, 5(12): 435-436.
- [13] 刘永, 张福海. 晶体管原理 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2002. 171-181.
- [14] Jain S C, Decoutere S, Willander M, et al. SiGe HBT for application in BiCMOS technology: II design, technology and performance [J]. Semicond Sci Technol, 2001, 16(7): R67-R85.
- [15] Joseph A J, Cressler J D, Richey D M, et al. Optimization of SiGe HBT's for operation at high current densities [J]. IEEE Trans Elec Dev, 1999, 46(7): 1347-1354.
- [16] Lanzerotti L D, Sturm J C, Stach E, et al. Suppression of boron transient enhanced diffusion in SiGe heterojunction bipolar transistors by carbon incorporation [J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(23): 3125-3127.
- [17] Chang Y H, Chang-Chiang C-C, Lee Y-C, et al. Design of multi-finger HBTs with a thermal-electrical model [J]. Microelec Reliab, 2003, 43(3): 421-426.
- [18] People R. Indirect bandgap of coherently strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ bulk alloys on 001 silicon substrates [J]. Phys Rev B, 1985, 32(2): 1405-1408.
- [19] 牛赞. 高频功率 SiGe 异质结双极晶体管(HBTs)的研究与设计 [D]. 北京: 北京工业大学. 2002.
- [20] Hobart K D, Kub F J, Papanicolaou N A, et al. Si/Si_{1-x}Ge_x heterojunction bipolar transistors with high breakdown voltage [J]. IEEE Elec Dev Lett, 1995, 16(5): 205-207.
- [21] 赵保经. 大功率晶体管的设计与制造 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 389-405.
- [22] Johnson E O. Physics limitations on frequency and power parameters of transistor [J]. RCA Rev, 1965, 26(2): 163-177.
- [23] Ng K K, Frei M R, King A, et al. Reevaluation of the f_TBV_{CE0} limit on Si bipolar transistors [J]. IEEE Trans Elec Dev, 1998, 45(8): 1854-1855.
- [24] Huetting R J E, Slotboom J W, Melai J, et al. A new trench bipolar transistor for RF applications [J]. IEEE Trans Elec Dev, 2004, 51(7): 1108-1113.
- [25] Erben U, Gruhle A, Schüpken A, et al. Dynamic characterization of Si/SiGe power HBT [J]. Elec Lett, 1994, 30(6): 525-527.
- [26] Schüpken A, Gerlach S. 1W SiGe power HBT for mobile communications [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1996, 6(9): 341-343.
- [27] Mohammadi S, Ma Z Q, Park J, et al. SiGe/Si power HBTs for X- to K-Band applications [A]. Digest of papers IEEE RFIC Symp [C]. Seattle, WA. 2002. 373-376.
- [28] Potyraj P A, Petrosky K J. A 230 Watt S band SiGe heterojunction bipolar transistor [J]. IEEE Trans Microwave Theo Technol, 1996, 44(12): 2392-2397.
- [29] Jahansson T, Ni W X. Feasibility study of 25 V SiGe RF-power transistors for cellular base station output amplifiers [J]. Mater Sci Engineer, 2002, B89(1-3): 88-92.

作者简介: 徐剑芳(1975 -), 女(汉族), 福建古田人, 硕士研究生, 1997年毕业于华中理工大学固体电子系, 研究领域为半导体器件和光电子器件。