

应用于 WLAN 的 SiGe HBT 高频功率特性的优化*

薛春来[†] 时文华 成步文 姚 飞 王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘要: 高频大功率 HBT 作为无线和射频通信 PA 中的重要器件, 其设计和制作也越来越受到关注. 高频大功率 SiGe HBT 的设计目的是在一定的的工作频率下维持一个高的击穿电压和大的电流密度以实现大的输出功率. 器件的设计参数需要进行折中优化. 文中模拟计算了两个单元叉指结构的 SiGe HBT 的高频特性和在 5GHz 工作频率下的功率特性与发射区掺杂浓度、厚度、基区 Ge 组分大小以及收集区的掺杂特性等参数之间的关系, 并对模拟结果进行了分析和探讨. 给出了一些具有指导意义的结论, 为高频大功率 HBT 的设计提供了很好的参考.

关键词: SiGe HBT; 高频大功率; 最大单边功率增益; 功率增加效率

EEACC: 2520M; 2560J; 1350

中图分类号: TN323⁺4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0435-04

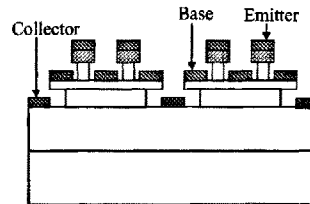
1 引言

随着 Internet 的飞速发展, 无线网络已成为各类网络中最具增长潜力的一部分, 许多机构会选择采用 WLAN (wireless local area network) 来拓展现有网络, 获得在区域内部移动接入网络的能力. 伴随着技术的融合和市场的飞速发展必然会对无线通信系统性能和成本提出更高的要求, 进而对应用于这些通信系统的器件也提出了更高的要求. 高性能的高频功率放大器是这些系统中的关键性器件. 以 GaAs, InP 为代表的 III-V 族材料 HBT (异质结双极晶体管) 和 HEMT (高电子迁移率晶体管) 虽然可以满足系统对高速和高频的工作要求, 但高成本、低的热传导性能、弱的机械加工性能使其在大规模集成模块的研制中存在许多问题. SiGe 材料不仅具有体硅材料的良好特性, 而且 SiGe HBT 还具有与 III-V 族材料 HBT 可比拟的高频性能^[1], 因而在 WLAN 中具有很好的应用前景.

目前应用于 WLAN 的通信协议主要的频段在 2.4 和 5GHz. 本文对如图 1 所示的两个单元叉指结构的 SiGe HBT, 模拟分析了发射区掺杂浓度、厚度、基区 Ge 组分大小、收集区掺杂浓度对器件高频特性以及在 5GHz 工作频率下器件功率特性的影响. 对应用于 5GHz 下的高频功率 SiGe HBT 进行了优化设计.

Emitter cap	Si	n ⁺	p	2 × 10 ¹⁹	100nm
Emitter	Si	n	p	3 × 10 ¹⁷	100nm
Spacer	Si _{1-x} Ge _x (0.1 ≤ x ≤ 0.40)	i			10nm
Base	Si _{1-x} Ge _x (0.1 ≤ x ≤ 0.40)	p	B	2 × 10 ¹⁹	25nm
Spacer	Si _{1-x} Ge _x (0.1 ≤ x ≤ 0.40)	i			10nm
Collector	Si	n ⁻	p	3 × 10 ¹⁶	400nm
Sub-collector	Si	n ⁺	p	10 ¹⁹	1000nm

(a)



(b)

图 1 (a) SiGe 异质结双极晶体管的纵向材料特性; (b) SiGe 异质结双极晶体管的剖面结构示意图

Fig. 1 (a) Specifications of epitaxial layer of SiGe/Si HBT; (b) Schematic cross-section of two cell of SiGe/Si HBT

2 发射区材料结构对器件高频功率特性的影响

发射区材料结构的优化主要包括发射区掺杂浓度和发射区厚度的选择. 图 2(a) 为工作频率在

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA312010)、国家重点基础研究发展规划 (批准号: G2000036603) 和自然科学基金 (批准号: 60336010) 资助项目

[†] 通信作者. Email: clxue@semi.ac.cn

2006-12-12 收到, 2006-12-28 定稿

5GHz 下最大单边功率增益 (GU_{\max}) 和功率增加效率 (PAE) 与发射区的掺杂浓度的关系 (发射区的厚度为 100nm, $V_{ce} = 3.5V$)。图 2(b) 为固定发射区掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, GU_{\max} 和 PAE 随着发射区厚度的变化关系。

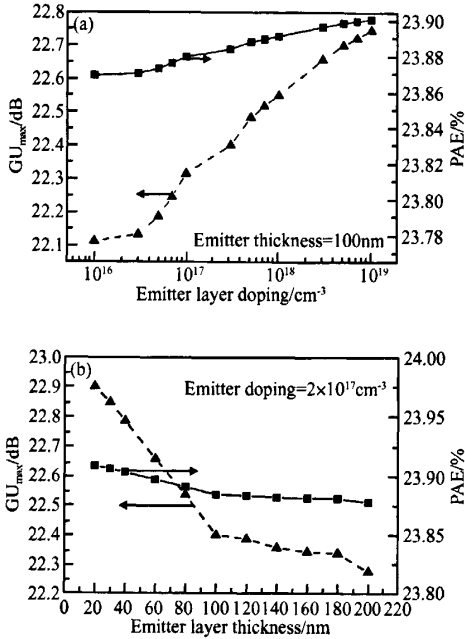


图 2 (a) 5GHz GU_{\max} 及 PAE 随发射区掺杂浓度的变化关系; (b) 5GHz GU_{\max} 及 PAE 随发射区层厚的变化关系 $V_{ce} = 3.5V$

Fig. 2 (a) GU_{\max} and PAE at 5GHz versus emitter layer doping for $V_{ce} = 3.5V$; (b) GU_{\max} and PAE at 5GHz versus emitter layer thickness for $V_{ce} = 3.5V$

模拟结果表明,当发射区掺杂浓度从 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 变化到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, f_{\max} 从 67.4GHz 增大到 77GHz, 对应的 f_T 从 23.4GHz 增加到 29.1GHz。相应的 GU_{\max} 和 PAE 也随着发射区掺杂浓度的增大而增大。图 2 中模拟计算结果表明,发射区掺杂浓度的增大有利于提高器件的频率特性和功率特性。这主要是因为随着发射区掺杂浓度的增加,器件 f_{\max} 和 f_T 的峰值会向更高的收集区电流密度方向移动,从而使得实际发射区电容的充放电时间随着发射区掺杂浓度的增加而下降。同时发射区电阻的减小会减小收集区电容的充放电时间,这两者带来的影响将大于低掺杂对发射结电容的影响。

大的发射区厚度会增加电子的渡越时间和发射区的串联电阻,当发射区厚度从 20nm 增加到 200nm 时,器件的 f_T 和 f_{\max} 随着发射区厚度的增加而减小,器件在 5GHz 下的功率增益和 PAE 也随之

降低。同时增大反射区厚度还会增加共射极放大器的阻抗,减小驻波比和工作带宽,所以发射区的厚度不能太大^[2,3]。但是如果发射区的厚度过小会使器件在工作时反向注入变得明显从而降低器件的增益。所以需要针对器件所需性能对发射区的厚度进行折中优化。大功率 Si/Si_{1-x}Ge_x/Si HBT 的发射区厚度一般在 50~100nm 为宜。

3 基区 Ge 组分对器件高频功率特性的影响

在 5GHz 下器件的最大功率增益和功率增加效率随着基区 Ge 组分的变化关系如图 3(a) 所示,随着 Ge 组分的增加,器件的最大功率增益和功率增加效率也会随之增加。 f_{\max} 以及 f_T 随着基区 Ge 组分的变化关系如图 3(b) 所示,随着 Ge 组分的增加,器件的 f_{\max} 和 f_T 也会随之增加。结果表明高的 Ge 组分有利于器件获得良好的功率特性和高频特性。

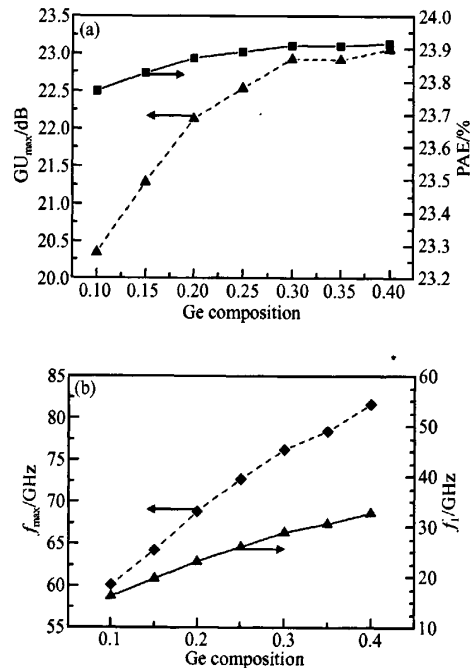


图 3 (a) 5GHz GU_{\max} 和 PAE 随着 Ge 组分的变化关系; (b) f_{\max} 和 f_T 随着 Ge 组分的变化关系 $V_{ce} = 3.5V$

Fig. 3 (a) GU_{\max} and PAE for uniform Ge concentration at 5GHz; (b) Frequencies f_{\max} and f_T versus Ge composition for $V_{ce} = 3.5V$

高的基区 Ge 组分可以增大发射区和基区的带隙差,从而获得更大的电流增益,进而改善器件的功率特性。器件频率特性随着 Ge 组分增加而改善的

原因在于相同的基区掺杂下,在 p 型 SiGe 层中体内的多数载流子-空穴的迁移率当 Ge 组分在 0.1~0.4 的范围内会随着 Ge 组分含量的增加而增大,因而基区电阻会随着 Ge 组分的增加而降低,而基区电阻是影响器件高频特性的一个重要因素.但是最大 Ge 组分还要受到材料生长和 Ge 组分对少子迁移率的限制,基区 SiGe 材料少数载流子的迁移率受材料合金散射的限制.在一定的范围内随着 Ge 组分的增加,材料的合金散射会增强,当 Ge 组分达到一定的值以后,合金散射将会减弱由材料的应变效应所带来的迁移率的提高.基区实现最大的少数载流子迁移率的 Ge 组分约为 40%.所以要在对少数载流子迁移率不会造成太大影响的条件下,适当增大 Ge 组分对器件的性能是有利的^[4,5].因此高频大功率 SiGe HBT 器件中采用 Ge 组分 20%~40% 为宜.

4 收集区材料结构对器件高频功率特性的影响

收集区材料结构的优化是高频大功率 SiGe HBT 设计中一个很重要的部分.图 4(a)为工作频率在 5GHz 下最大单边功率增益和功率增加效率与收集区的掺杂浓度的关系($V_{ce} = 3.5V$),图 4(b)为 f_{max} 和 f_T 随着收集区厚度的变化关系.

图 4 中模拟结果表明,在 5GHz 下器件的最大单边功率增益和功率增加效率随着收集区掺杂浓度的增加先增加后减小.在 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 处达到一个极值, f_{max} 也表现出了相同的变化趋势.而 f_T 则随着收集区掺杂浓度的增加单调增加.相似的结果在以往文献中也有报道^[6],我们认为这个极值点的大小与器件的具体结构相关.产生这种现象的原因在于随着收集区掺杂浓度的增加,器件产生基区穿通的最大收集区电流随之增加,使得器件 f_T 的极值对应的收集区电流变大,并且收集区高掺杂减小了收集区的电阻,进而降低了收集区结电容的充放电时间,从而使得器件的 f_T 相应的增大.尽管随着收集区掺杂的增加器件的 f_T 相应的增大,但是收集区掺杂浓度的增加还会造成收集区结电容增大.对于图 1 所示的器件结构在收集区掺杂浓度为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时,两者对 f_{max} 的影响达到一个平衡的时候, f_{max} 和 GU_{max} 就会产生一个极值.当继续增大收集区的掺杂浓度,收集区结电容的对 f_{max} 和 GU_{max} 影响将会大于 f_T 的影响.从而使得在这个极值点之后,随着收集区掺杂浓度的增加, f_{max} 和 GU_{max} 会减小.

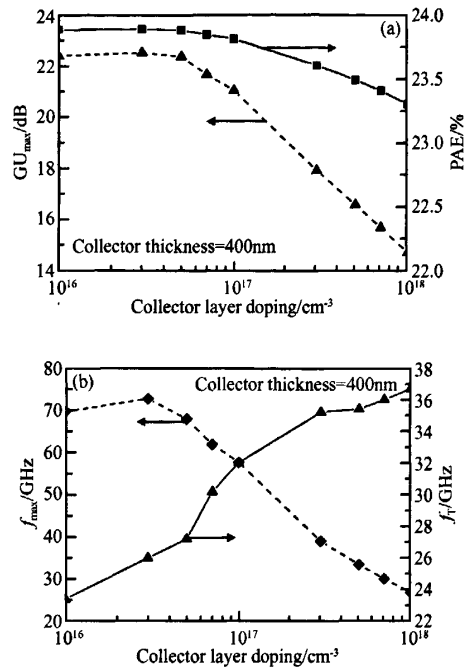


图 4 (a) 5GHz GU_{max} 和 PAE 随着收集区掺杂浓度的变化关系;(b) f_{max} 和 f_T 随着收集区掺杂浓度的变化关系 $V_{ce} = 3.5V$

Fig. 4 (a) GU_{max} and PAE at 5GHz;(b) Frequencies f_{max} and f_T versus collector layer doping for $V_{ce} = 3.5V$

5 结论

在高频大功率 SiGe HBT 的设计中,发射区材料高掺杂和薄的发射区厚度有利于提高器件的高频和功率特性.但发射区的厚度过小会使器件在工作时反向注入变得明显从而降低器件的增益,所以对于发射区的厚度要折中考虑.基区 SiGe 材料在 Ge 组分小于 0.4 的范围内提高 Ge 组分有利于改善器件的高频和功率特性.收集区的设计是高频大功率 SiGe HBT 设计中很重要的一部分,收集区的掺杂浓度和厚度不仅会影响到器件的最大收集区电流和击穿电压,并且还会对器件的高频和功率特性产生很大的影响.在高频大功率 SiGe HBT 的设计中收集区的掺杂浓度存在一个最佳值,控制掺杂浓度在这个最佳值附近,对改善器件的性能尤为重要.

参考文献

- [1] Das A, Huang M, Mondal J, et al. Review of SiGe process technology and its impact on RFIC design. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2002, 32

- [2] Jeng S J, Jagannathan B, Rieh J S, et al. A 210GHz f_T SiGe HBT with a non-self-aligned structure. *IEEE Electron Device Lett*, 2001, 22(11):542
- [3] Rieh J S, Jagannathan B, Chen H, et al. SiGe HBTs with cut-off frequency of 350GHz. *IEDM*, 2002;771
- [4] Rieh J S, Lu L H, Katchi L P B, et al. Experimental determination of minority electron mobility in p-type pseudomorphic SiGe/Si. *Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF System*, 1998;10
- [5] Godbey D, Hughes H, Kub F. A $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ strained-layer etch stop for the generation of thin layer undoped silicon. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(4):22
- [6] Todorova D, Mathur N, Roenker K P. Simulation and design of SiGe HBTs for power amplification at 10GHz. *Solid-State Electron*, 2002, 46;1485

Analysis and Optimization of Power $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ Heterojunction Bipolar Transistor for Wireless Local Area Network Applications*

Xue Chunlai[†], Shi Wenhua, Cheng Buwen, Yao Fei, and Wang Qiming

(*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The significance of the epitaxial layer structure in designing multi-finger structure power SiGe HBT for 5GHz power amplification was discussed in detail. In particular, the emitter doping concentration and thickness, the germanium concentration, and collector doping levels were investigated. The results and analyses show that the device can achieve significant power performance at 5GHz, perfect frequency character when the heterostructure and the device layout were well designed. In the mean time, some guidelines or "design rules" were summarized by the results of this study.

Key words: SiGe; HBT; power; G_{max} ; PAE

EEACC: 2520M; 2560J; 1350

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0435-04

* Project supported by the High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312010), the Major State Basic Research Program (No. G2000036603), and the National Natural Science Foundation of China (No. 60336010)

[†] Corresponding author. Email: clxue@semi.ac.cn

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics