

新结构微波功率 SiGe HBT 的数值分析

刘 亮¹ 王玉琦² 肖 波¹ 亢宝位¹ 吴 郁¹ 王 哲¹

(1 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

(2 香港科技大学物理系, 香港)

摘要: 提出一种新结构的微波功率 SiGe 异质结双极晶体管 (SiGe HBT), 该结构通过在外基区下的集电区中挖槽并填充 SiO₂ 的方法来改善器件的高频性能. 将相同尺寸的新结构和传统结构的器件仿真结果进行比较, 发现新结构器件的基区-集电区电容减少了 55%, 因而使器件的最大有效增益提高了大约 2dB, 其工作在低压 ($V_{ce} = 4.5V$) 和高压 ($V_{ce} = 28V$) 情况下的最高振荡频率分别提高了 24% 和 10%.

关键词: 微波功率 SiGe HBT; MSG/MAG; 最高振荡频率

EEACC: 1350F; 2560P

中图分类号: TN322

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0096-06

1 引言

最近十几年对 SiGe HBT 的研究使其进入 RF/微波功率放大器的应用领域. 国内已经制作出能应用于低压无线通讯的微波 SiGe HBT^[1]. 1996 年 Schöppe 等人采用负载拉升测量法, 测出工作在 1.9GHz 下的 SiGe HBT 样管输出功率为 1W 时, 其功率附加效率 (PAE) 达到了 44%^[2]. Hobart 等人首次对工作在高压情况下的 SiGe HBT 的小信号高频特性进行了研究^[3], 测出器件的 BV_{CBO} 达到 40V, f_{max} 和 f_T 分别为 22GHz 和 10GHz. 而工作于 S 波段的微波功率晶体管输出功率达到了 230W^[4]. 用于 RF 基站的微波功率 SiGe 的研究也在进行当中^[5].

随着器件尺寸的减小, 各种寄生电阻、电容对器件的高频工作性能的影响逐渐增加, 例如外基区-集电区电容 (C_{bcx}) 因其在 C_{bc} 中的比例增加而成为影响器件高频性能的主要因素之一. 因为器件的最高振荡频率随着 C_{bc} 的增大而减小, 所以减小 C_{bcx} 对设计高频功率放大器有重要意义. 在过去的文献中已经提到一些减小 C_{bcx} 的方法, 例如离子注入隔离法^[6] 以及在外基区下挖槽去掉部分集电区的方法^[7,8]. 但是采用离子注入隔离法后 C_{bcx} 仍然占 C_{bc}

的大部分; 而在外基区下挖槽去掉部分集电区的方法虽然能大大减少 C_{bcx} , 却同时使外基区悬空而造成力学结构的不稳定性. 其他的方法如通过选择外延^[9]来减少 C_{bcx} , 其工艺非常复杂 (仅在制作基区的时候就需要做七次生长), 且主要应用于实现小电流器件的集成.

本文首次提出一种新的微波功率 SiGe HBT 结构, 该结构通过在外基区下的集电区挖槽并填充 SiO₂ 的方法来改善器件的高频性能. 因为 SiO₂ 的介电常数比 Si 小很多 (前者大约为后者的 1/3), 所以采用这种方法能大大减少 C_{bcx} . 本文采用二维器件仿真软件 (DESSIS) 对器件进行仿真分析. 在选取合理的模型之后, 对两种结构的器件分别进行直流及交流小信号仿真, 并对仿真后的数据进行分析. 从分析结果能明显看出新结构 SiGe HBT 用作高频功率放大器时性能改善.

2 器件的结构和模型

图 1 (a), (b) 分别为传统结构和新结构 SiGe HBT 的横截面图. 后者用 SiO₂ 来替代外基区下集电区的 Si, 因为 SiO₂ 的介电常数仅为 Si 的 1/3, 所以能有效减少 C_{bcx} . 与传统结构相比, 实现新结构要增

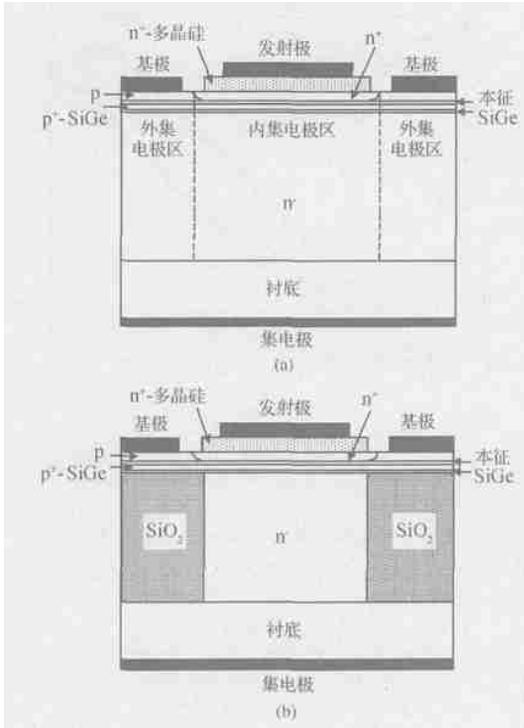


图 1 SiGe HBTs 的横截面图 (a) 传统结构; (b) 新结构

Fig. 1 Schematic cross section of SiGe HBTs (a) Conventional structure; (b) Novel structure

加等离子体刻槽、填补 SiO₂ 和平坦化处理等工艺步骤. 采用这种方法可以避免普通 LOCOS 工艺^[10]因“鸟嘴”效应而产生寄生电容的缺点. 关于平坦化的技术, 已经有详细的报道, 并在隔离结构绝缘层厚度为 1.9μm 时取得良好的平坦化效果^[11]. Schonenberg 等人的研究表明, 生长在 SiO₂ 槽上的 SiGe 应变层依然有很好的稳定性^[12], 所以采用这种工艺制造出文中的新结构 SiGe HBT 是完全现实可行的. 图 2 为新结构 SiGe HBT 的几何尺寸示意图(晶体管结构两边对称, 图上只画出半边), 它和相应的传统结构的 SiGe HBT 区别仅在于增加了 SiO₂ 槽. 器件的各部分尺寸在表 1 中给出; 其掺杂浓度和基区中 Ge 的百分比分布在表 2 中列出.

表 1 器件的结构参数 μm

Table 1 Structure parameters of the devices μm

Device	L_e	L_{ox}	L_b	W_{ox}	T_{ox}
L1	1.0	0.4	1.0	-	-
L2	1.0	0.4	1.0	1.2	0.5
H1	1.0	0.4	1.0	-	-
H2	1.0	0.4	1.0	1.2	2.0

L1: 传统结构 LVHBT; L2: 新结构 LVHBT; H1: 传统结构 HVHBT; H2: 新结构 HVHBT

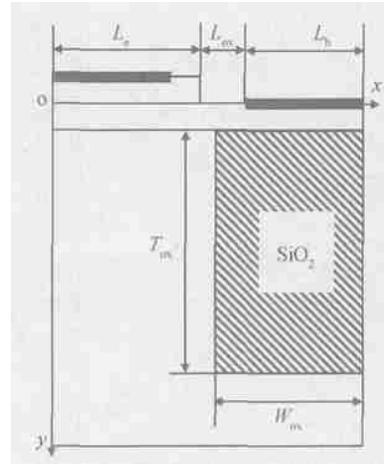


图 2 器件参考图的几何尺寸

Fig. 2 Geometry of the reference HBT

表 2 杂质的掺杂浓度和 Ge 在基区中的分布

Table 2 Doping profile and Ge content of the devices

发射区	n^+-Si	$2 \times 10^{18} cm^{-3}$	100nm
基区	$i-Si_{1-x}Ge_x$	$x = 20\%$	5nm
	$p^+-Si_{1-x}Ge_x$	$x = 20\%$ $2 \times 10^{19} cm^{-3}$	40nm
	$i-Si_{1-x}Ge_x$	$x = 20\%$	5nm
集电区	高压 n^+-Si	$4 \times 10^{16} cm^{-3}$	500nm
	低压 n^+-Si	$5.5 \times 10^{15} cm^{-3}$	4500nm

因为本文旨在研究新结构器件因结构变化带来的优点, 所以并没有对器件的其他参数进行最优化设计. 但是在各种条件相同的情况下, 将两种器件的仿真结果作比较能很好地反映出新结构器件的优点, 其中部分参数是根据器件的一些基本电性能设计的. 例如工作在 4 ~ 6V 低压情况下, 将器件的 BV_{CBO} 设计为 15V (集电极杂质浓度取值为 $4 \times 10^{16} cm^{-3}$, 其厚度为 0.5μm); 工作在 20 ~ 30V 的高压情况下, 将器件的 BV_{CBO} 设计为 40V (集电极杂质浓度取值为 $5.5 \times 10^{15} cm^{-3}$, 其厚度为 4.5μm). 本文分别对两种器件在低压 ($V_{CE} = 4.5V$) 和高压 ($V_{CE} = 28V$) 工作情况下进行了仿真(前者称之为 LVHBT, 后者称之为 HVHBT).

器件仿真是用 ISE 中的 DESSIS 工具完成的. 为了取得比较好的仿真结果, 实验过程中对载流子的输运过程分别采用漂移-扩散模型、流体动力学方程以及蒙特卡罗法进行模拟. 漂移扩散模型由于无法描述速度过冲, 所以对基区的传输时间估计较高. 但相对于流体动力学模型和蒙特卡罗分析的计算结果, 峰值的 f_T 相差大约为 10%, 所以对于高速异质结器件的仿真, 漂移扩散模型仍然是有效的^[13]. 而

在集电区中因为其耗尽层较宽,所以不会产生明显的速度过冲. 本文主要是研究集电区新结构对 f_{max} 和功率特性的影响,为了减少仿真过程消耗的时间,仍然采用漂移扩散模型作为仿真时的载流子传输模型. 因为器件的部分区域杂质掺杂浓度较高(如基区的杂质掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$),在仿真中还用到了随掺杂浓度改变的 SRH 产生-复合模型. 由高掺杂浓度引起的禁带变窄 E_g 与掺杂浓度 N 之间的关系,可用下述经验公式表示^[14]

$$E_g = 9 \left\{ \ln \frac{N}{10^{17}} + \left[\left(\ln \frac{N}{10^{17}} \right)^2 + 0.5 \right]^{1/2} \right\} \text{ (meV)} \quad (1)$$

3 仿真结果

图 3 和图 4 分别作出在低压和高压应用中传统结构 SiGe HBT 和新结构 SiGe HBT 的 Gummel Plot 的比较. 因为两种器件的掺杂浓度以及基区中 Ge 的百分比分布都一致,所以从图中可以看出它们的直流特性大致相同. 但是在 V_{be} 较低 ($< 0.5\text{V}$) 的情况下,新结构器件的基极电流略大于传统结构的器件. 这个区别和 SiO_2 槽的几何结构有关,并且受到 SiGe 外基极中复合现象的影响.

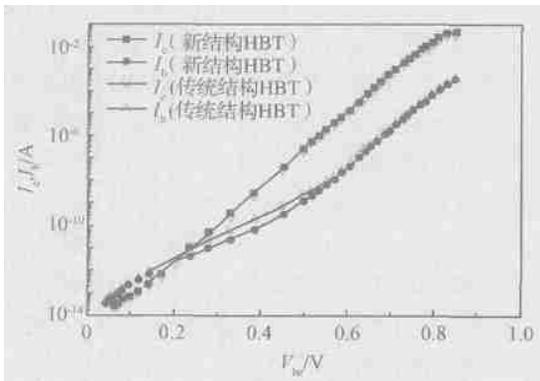


图 3 新结构和传统结构器件工作在低压 ($V_{ce} = 4.5\text{V}$) 时的 Gummel plots
Fig. 3 Gummel plots of the novel and conventional SiGe LVHBTs at $V_{ce} = 4.5\text{V}$

根据交流小信号的仿真结果来分析器件的 RF/微波特性. 首先利用仿真结果中的电导、电容矩阵数值计算出二端口网络的 S 参数,然后用下列公式计算器件的功率增益 MSG/MAG (最大稳定增益/最大有效增益).

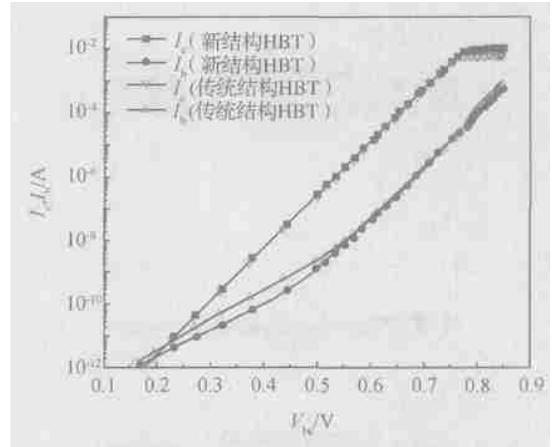


图 4 新结构和传统结构器件工作在高压 ($V_{ce} = 28\text{V}$) 时的 Gummel plots
Fig. 4 Gummel plots of the novel and conventional SiGe HVHBTs at $V_{ce} = 28\text{V}$

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S|^2}{2 |S_{12}| |S_{21}|} \quad (2)$$

$$S = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}$$

$$\text{MSG} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \quad (2)$$

$$\text{MAG} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \times (K - \sqrt{K^2 - 1}) \quad (3)$$

其中 K 被称为 Rollett 稳定系数,当 $K > 1$ 时器件能无条件稳定工作,但是对于任意一个器件未必能实现无条件稳定. 图 5 和图 6 中的增益 MAG 在 $K > 1$ 时直接用公式(1)计算;当 $K = 1$ 时用 MSG 来替代 MAG(用公式(2)计算). 为了便于比较,在图 5 中给出了两种结构器件的 MAG 随着集电极电流 (I_c) 变化的情况. 图 5 显示了在低压工作情况下新结构和传统结构器件的功率增益的对比,可以看出当器件工作在 1GHz 和 10GHz 的情况下,新结构器件的功率增益要高出传统结构器件大约 2dB. 对于高压工作情况图 6 分别给出了器件工作在 1GHz 和 5GHz 的情况,新结构 SiGe HBT 出现了同样的功率增益提高现象.

对两种器件的最高振荡频率 (f_{max}) 以及截止频率 (f_T) 进行了对比分析. f_{max} 是在最大有效增益-频率图(频率为逻辑坐标)中按 $[-20\text{dB}/10 \text{ 倍频}]$ 关系外推到 $\text{MAG} = 1$ 时得出的频率值. 类似地, f_T 是在电流增益-频率图(频率为逻辑坐标)中外推到增益为 1 时的频率值. 两种结构的 f_{max}, f_T 随集电极变化情况分别在图 7 和图 8 中给出. 对于低压工作 ($V_{ce} = 4.5\text{V}$) 的情况,两种结

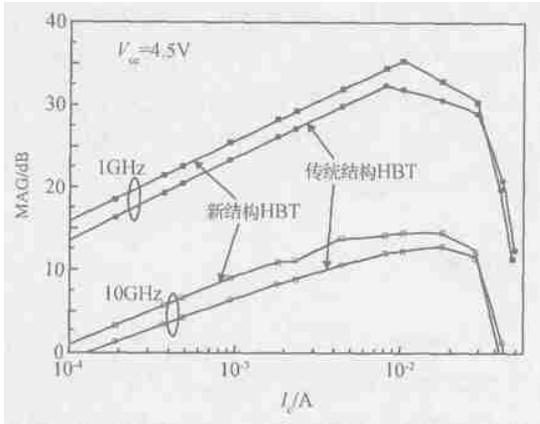


图 5 两种结构的器件的 MAG 随集电极直流电流的变化 (低压)

Fig. 5 MAG versus DC collector current of the novel and conventional SiGe LVHBTs

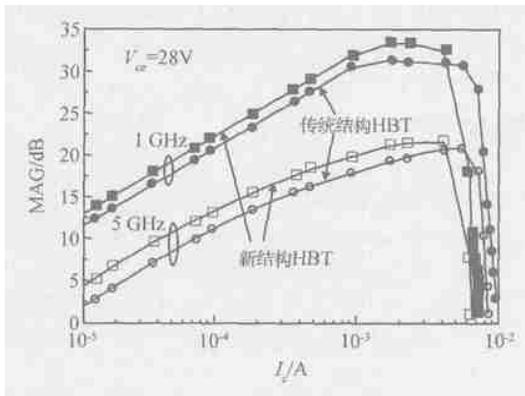


图 6 两种结构的器件的 MAG 随集电极直流电流的变化 (高压)

Fig. 6 MAG versus DC collector current of the novel and conventional SiGe HVHBTs

构的 f_{max} 和 f_T 均在 $I_c = 18\text{mA}$ 时达到峰值. 新结构 f_{max} 和 f_T 的峰值分别为 17.5GHz 和 51GHz ; 而传统结构 f_{max} 和 f_T 的峰值分别为 17.9GHz 和 41GHz . 从这个仿真数据可以看到, 虽然两种结构的 f_T 几乎一样, 但是新结构的 f_{max} 要高出传统结构 24% , 由此可见新结构因 C_{bcx} 的减小而使器件的高频性能得到改善. 而对于高压工作情况 ($V_{ce} = 28\text{V}$), 新结构和传统结构的 f_T 峰值分别为 5.7GHz 和 5.5GHz ; f_{max} 峰值分别为 63GHz 和 57GHz . 因为在高压工作情况下, SiO_2 槽的厚度 ($2\mu\text{m}$) 仅为集电区厚度 ($4.5\mu\text{m}$) 一半, 所以 f_{max} 相对于传统结构只增加了 10% , 不如低压工作情况明显, 后者的外基区下的集电区全部被 SiO_2 取代.

通过对每个器件的交流小信号分析的结果进行

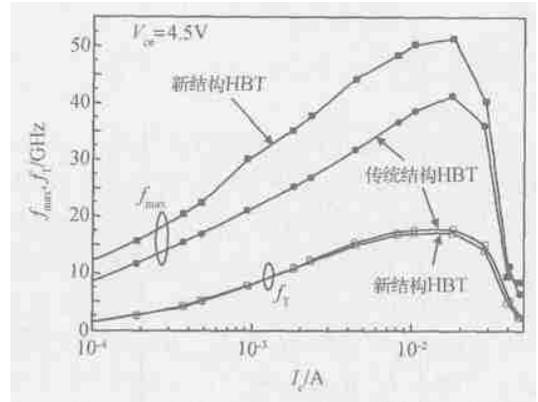


图 7 两种结构的器件的 f_{max} 和 f_T 随集电极直流电流的变化 (低压)

Fig. 7 Frequency performance versus DC collector current for the novel and conventional SiGe LVHBTs

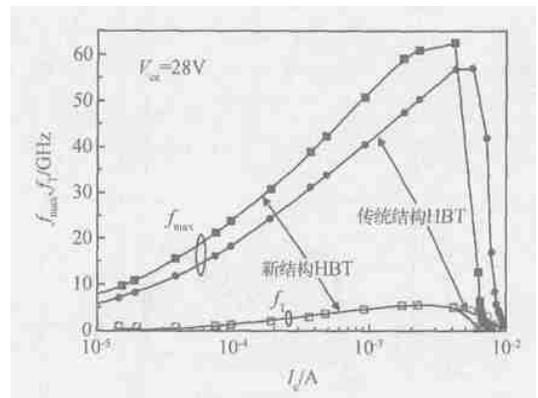


图 8 两种结构的器件的 f_{max} 和 f_T 随集电极直流电流的变化 (高压)

Fig. 8 Frequency performance versus DC collector current for both the novel and conventional SiGe HVHBTs

数值分析, 较为精确地计算出器件模型中影响 f_{max} 大小的主要参数. 其中 C_{bc} 和基极电阻 R_b 可用下面的公式^[15]计算:

$$R_b = \text{Re}(Z_{11} - Z_{12}) \quad (4)$$

$$C_{bc} = \frac{-1}{\text{Im}(Z_{22} - Z_{21})} \quad (5)$$

表 3 中列出了器件的小信号模型的参数值.

表 3 根据交流小信号仿真结果提取的参数

Table 3 Extracted small signal parameters of simulated HBTs

模型参数	LVHBT		HVHBT	
	传统结构器件	新结构器件	传统结构器件	新结构器件
R_b/Ω	10.3	11.5	8.1	8.7
C_c/fF	8.4	3.7	0.41	0.19
I_c/mA	20	20	6	4
(at peak f_{max})				

4 讨论

通过对小信号模拟结果的数值分析可以看出新结构 SiGe HBT 的高频特性得到了明显的改善. 如图 5 和图 6 所示, 新结构器件的功率增益比传统结构要高出 2dB, 而且新结构器件的最高振荡频率也比传统结构有了很大的改善, 但是 f_{\max} 的改变并没有与 C_{bc} 平方根成反比, 主要是因为实际情况中器件的基极电阻与 C_{bc} 形成网络结构排列^[16], 对于小尺寸器件不能用简单的模型来精确地推算 f_{\max} 与 C_{bc} 的关系. 新结构也有一些缺点, 例如抑制了集电区电流的横向扩散, 使基区外推现象 (Kirk effect) 提前发生^[17]. 如图 8 所示, 在高压工作的情况下, 新结构器件的 f_{\max} 和 f_T 在 $I_c = 4\text{mA}$ 的时候就开始下降, 而传统结构的两个值在 $I_c = 7\text{mA}$ 时才开始下降. 相对来说在低压工作情况下没有出现如此明显的差别, 这一问题可以从图 9 中得到解释. 图 9 给出了在各个

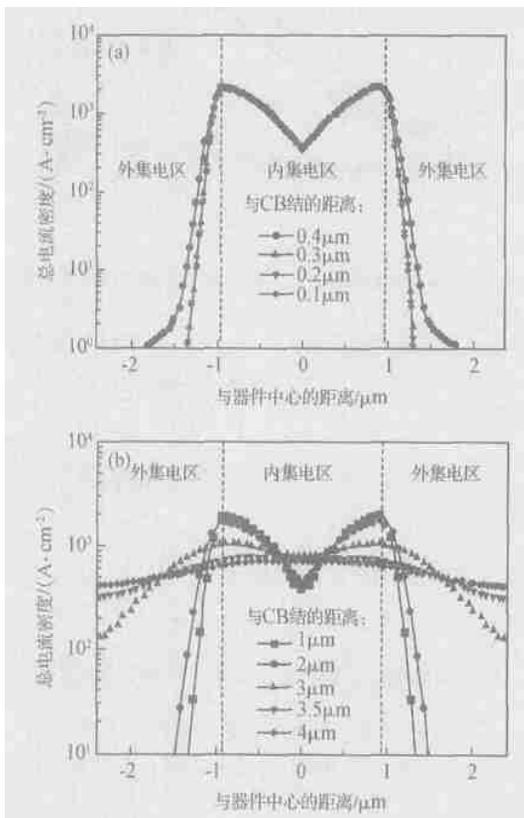


图9 传统结构器件集电区中的电流密度横向分布
(a) LVHBT; (b) HVHBT

Fig.9 Lateral profiles of the collector current density for the conventional SiGe LVHBT (a) and HVHBT (b)

集电区深度的总电流密度, 在高压情况下电流向外集电区扩展的现象要比低压情况明显得多, 所以因 SiO_2 槽引起的基区扩展提前发生的现象要比低压明显得多. 因此在高压工作情况下 SiO_2 槽的结构仍需进一步优化.

5 结论

对一种新结构 SiGe HBT 进行了二维的器件仿真和分析, 并和传统的器件仿真结果相比较, 发现这种新结构器件高频性能有明显的改善. 其 C_{bc} 减少了大约 55%, 而最大有效功率增益较传统结构有 2dB 的提高; 在低压和高压工作情况下 f_{\max} 分别提高了 24% 和 10%. 虽然在仿真中看到在高压工作情况下器件的基区扩展效应提前发生, 但这一问题可以通过增加基极和发射极的宽度得到改善.

参考文献

- [1] Jia Hongyong, Zhu Wenbin, Liu Zhihong, et al. Development of microwave SiGe heterojunction bipolar transistors. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(10): 970
- [2] Schöppen A, Gerlach S, Dietrich H, et al. 1-W SiGe power HBTs for mobile communication. IEEE Microw Guided Wave Lett, 1996, 6(9): 341
- [3] Hobart K D, Kub F J, Papanicolaou N A, et al. Si/Si_{1-x}Ge_x heterojunction bipolar transistors with high breakdown voltage. IEEE Electron Device Lett, 1995, 16(5): 205
- [4] Botraj P A, Petrosky K J, Hobart K D, et al. A 230-Watt S-band SiGe heterojunction bipolar transistor. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1996, 44(12): 2392
- [5] Johansson T, Ni Weixin. Feasibility study of 25V SiGe RF-power transistors for cellular base station output amplifiers. Mater Sci Eng, 2002, B89: 88
- [6] Asbeck P M, Miller D L, Anderson R J, et al. GaAs/(Ga,Al)-As heterojunction bipolar transistors with buried oxygen-implanted isolation layers. IEEE Electron Device Lett, 1984, 5(8): 310
- [7] Miyamoto Y, Rios J M M, Dentai A G, et al. Reduction of base-collector capacitance by undercutting the collector and subcollector in GaInAs/InP DHBTs. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(3): 970
- [8] Chen W L, Chau H F, Tutt M, et al. High-speed InGaP/GaAs HBTs using a simple collector undercut technique to reduce base-collector capacitance. IEEE Electron Device Lett, 1997, 18(7): 355
- [9] Washio K, Ohue E, Oda K, et al. Self-aligned selective-epitaxial-growth SiGe HBTs: process, device, and ICs. Thin Solid Films, 2000, 369(1/2): 352

- [10] Grahn J V. A low-complexity 62-GHz f_T SiGe heterojunction bipolar transistor process using differential epitaxy and in situ phosphorus-doped poly-Si emitter at very low thermal budget. *Solid-State Electron*, 2000, 44(3) :549
- [11] Wang Zhe ,Cheng Xu ,Kang Baowei ,et al. A new surface-planarization technology for isolation structure. *Semiconductor Technology*, 2002, 27(7) :26 (in Chinese) [王哲,程序,亢宝位,等. 一种新的隔离结构表面平坦化技术. *半导体技术*, 2002, 27(7) :26]
- [12] Schonenberg K, Chan S W, Hareme D. The stability of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ strained layers on small-area trench-isolated silicon. *Materials Research Society*, 1997, 12(2) :364
- [13] Jungemann C, Neinh \ddot{u} B. Comparative study of electron transit times evaluated by DD, HD, and MC devices simulation for SiGe HBT. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(10) :2216
- [14] Slotboom J W, De Graff H C. Measurements of bandgap narrowing in Si bipolar transistors. *Solid-State Electron*, 1976, 19(10) :857
- [15] Lee S, Ryum B R, Kang S W. A new parameter extraction technique for small-signal equivalent circuit of polysilicon emitter bipolar transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(2) :233
- [16] Gøbert Y, Tasker P J, Bachem K H. A physical, yet simple, small-signal equivalent circuit for the heterojunction bipolar transistor. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1997, 45(2) :149
- [17] Zampardi P J, Pan D S. Delay of Kirk effect due to collector current spreading in heterojunction bipolar transistors. *IEEE Electron Device Lett*, 1996, 17(10) :470

Numerical Analysis of A Novel Microwave Power SiGe HBT

Liu Liang¹, Wang Yuqi², Xiao Bo¹, Kang Baowei¹, Wu Yu¹, and Wang Zhe¹

(1 College of Electronic Science & Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(2 Physics Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract : A novel structure for microwave power SiGe HBTs is presented, which can improve the high frequency characteristics of devices by etching away the collector layers underneath the extrinsic base region and filling the resultant trenches with SiO₂. The simulation results of the novel and similar conventional structures are studied and compared. It is observed that the novel structure HBTs have a 55% reduction of the total base-collector capacitance. Due to this reduction, the novel structure device gives rise to a 2dB higher maximum available gain and higher maximum oscillation frequency (increases of 24% for low voltage SiGe HBT and 10% for high voltage SiGe HBT) than the conventional one does.

Key words : microwave power SiGe HBT; MSG/MAG; maximum oscillation frequency

EEACC : 1350F; 2560P

Article ID : 0253-4177(2005)01-0096-06