

# 新型宽温区高热稳定性微波功率 SiGe 异质结双极晶体管\*

鲁东<sup>†</sup> 金冬月 张万荣 张瑜洁 付强 胡瑞心 高栋 张卿远  
霍文娟 周孟龙 邵翔鹏

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2012年12月12日收到; 2013年1月15日收到修改稿)

宽温区大电流下的热不稳定性严重制约着功率 SiGe 异质结双极晶体管 (HBT) 在射频和微波电路中的应用. 为改善器件的热不稳定性, 本文利用 SILVACO TCAD 建立的多指功率 SiGe HBT 模型, 分析了器件纵向结构中基区 Ge 组分分布对微波功率 SiGe HBT 电学特性和热学特性的影响. 研究表明, 对于基区 Ge 组分为阶梯分布的 HBT, 由于 Ge 组分缓变引入了少子加速电场, 使它与均匀基区 Ge 组分 HBT 相比, 具有更高的特征频率  $f_T$ , 且电流增益  $\beta$  和  $f_T$  随温度变化变弱, 这有利于防止器件在宽温区工作时电学特性的漂移. 同时, 器件整体温度有所降低, 但器件各指温度分布均匀性较差. 考虑多指 HBT 各发射极指散热能力存在差异, 在器件纵向结构设计为基区 Ge 组分阶梯分布的同时, 对其横向版图进行发射极指间距渐变结构设计, 用于改善器件各指温度分布的均匀性, 进而提高 HBT 的热稳定性. 结果表明, 与基区 Ge 组分为均匀分布的等发射极指间距结构 HBT 相比, 新器件各指温度分布均匀性明显改善,  $f_T$  保持了较高的值, 且  $\beta$  和  $f_T$  随温度变化不敏感, 热不稳定性得到显著改善, 显示了新器件在宽温区大电流下工作的优越性.

**关键词:** SiGe 异质结双极晶体管, Ge 组分分布, 发射极指间距渐变技术, 热稳定性

**PACS:** 44.10.+i, 72.20.Pa, 85.30.De

**DOI:** 10.7498/aps.62.104401

## 1 引言

与 Si 同质结双极晶体管 (bipolar junction transistor, BJT) 相比, SiGe 异质结双极晶体管 (heterojunction bipolar transistor, HBT) 在具有高电流处理能力、大电流增益和高厄利电压的同时, 还具有优异的高频特性, 现已广泛应用于移动电话系统、蓝牙、卫星系统、汽车雷达等射频和微波电路中<sup>[1-3]</sup>. 在上述电路中, SiGe HBT 通常处于大电流密度下 (集电极电流密度  $J_C \geq 1.0 \text{ mA} \cdot \mu\text{m}^{-2}$ ), 且工作在较宽的温度范围内<sup>[4]</sup>. 为提高电流处理能力, SiGe HBT 通常采用多发射极指并联结构, 然而由

器件自身耗散功率引起的自加热效应以及各发射极指间的热耦合效应将会导致器件中心区域各指温度较高. 又由于发射极电流具有正温度系数, 中心指将传导更多的电流, 从而产生更多的热, 即在热和电之间形成正反馈, 使器件各指温度分布变得极其不均匀, 将产生电流增益“倒塌”现象, 退化器件的工作特性 (如电流增益、功率增益、特征频率等), 引起器件和电路特性的漂移, 使 SiGe HBT 处于热不稳定状态, 严重限制了器件的高功率工作<sup>[5-8]</sup>. 因此, 如何抵消热电正反馈对器件的影响, 特别是在较宽的温度范围内使器件特性不漂移, 进而维持器件热稳定工作, 成为微波功率 SiGe HBT 设计所面临的重要问题之一.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61006059, 60776051, 61006049)、北京市自然科学基金 (批准号: 4082007)、北京市优秀跨世纪人才基金 (批准号: 67002013200301)、北京市教委科技发展计划 (批准号: KM200710005015, KM200910005001) 和北京市属市管高等学校人才强教服务北京计划资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: ludong@emails.bjut.edu.cn

为改善微波功率 SiGe HBT 的热稳定性, 国内外学者大都从热学角度通过对器件横向版图进行设计来改善温度分布均匀性, 包括发射极指间距渐变技术 [9,10]、发射极指长渐变技术 [11,12] 以及发射极指分段技术 [13] 等, 很少考虑从电学角度对 SiGe HBT 进行纵向结构设计引入热电负反馈来改善热稳定性. 众所周知, “能带工程”(基区加入 Ge) 能够改善 SiGe 的直流特性和频率特性, 也使其电流增益  $\beta$  具有负温度系数, 进而能够部分补偿热电正反馈. 同时, 上述研究均在单一工作温度下进行的设计, 没有考虑宽温区大电流下工作温度  $T$  变化对器件热稳定性的影响. 本文首先从电学角度对 SiGe HBT 的基区 Ge 组分分布进行优化设计, 在保证补偿热电正反馈的同时, 使  $\beta$  随  $T$  变化趋势变缓, 避免引起特性漂移, 保证器件热稳定工作. 在此基础上, 进一步从热学角度采用发射极指间距渐变技术改善各发射极指上温度分布的均匀性, 最终设计出一款在较宽工作温度范围内具有高热稳定性的微波功率 SiGe HBT.

Si 发射区 12 nm
Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> 层 5 nm
Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> 基区 50 nm $N_b = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> 层 15 nm
Si 缓冲层 5 nm
N <sup>-</sup> 集电区 3.48 $\mu\text{m}$ $N_c = 1 \times 10^{16}$
N <sup>+</sup> 衬底 $N_s = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$

图 1 SiGe HBT 纵向结构参数示意图

## 2 器件模型的建立

本文采用半导体仿真工具 SILVACO TCAD 中的二维工艺仿真模块 ATHENA 建立了 SiGe HBT 的二维模型, 其中器件的纵向结构参数如图 1 所示. 以 6 指 SiGe HBT 为例, 本文建立的多指功率 SiGe HBT 器件模型如图 2 所示. 在该模型中, 发射极指宽为 3  $\mu\text{m}$ , 发射极指间距为 20  $\mu\text{m}$ . 进一步利用二维器件仿真模块 ATLAS 对 SiGe HBT 的电学特性和热学特性进行仿真, 其中加入了迁移率受杂质浓度影响模型 (conmob), 迁移率受电场影响模型 (fldmob), 与浓度和温度有关的迁移率模型 (analytic), 禁带变窄模型 (bgn), 参数受温度影响模

型 (selb), 同时还加入了 SRH 复合模型, 依赖于温度的俄歇复合模型 (klaaug) 以及依赖于杂质浓度的载流子寿命模型 (consrh).

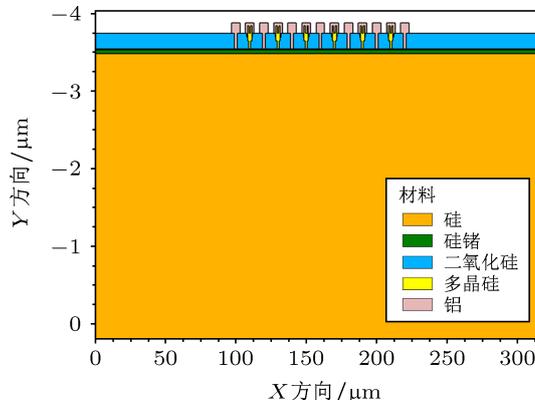


图 2 6 指 SiGe HBT 器件模型

## 3 模拟和分析

### 3.1 从纵向结构角度研究基区 Ge 组分分布对 SiGe HBT 的影响

利用上述模型, 本文对传统的基区 Ge 组分为均匀分布的 SiGe HBT (HBT-1) 的电学特性进行了仿真, 其中器件的基区 Ge 组分总量  $x$  为 0.16, 基极电流  $I_b = 50 \mu\text{A}$ , 工作电压  $V_{cc} = 6 \text{V}$ . HBT-1 的  $\beta$  与  $T$  的关系曲线如图 3 实线所示. 可以看出,  $\beta$  随着  $T$  升高而降低, 即“能带工程”(基区加入 Ge) 能够补偿热电正反馈, 相关结果已在我们先前发表的文献 [14] 中进行了验证. 然而, HBT-1 的  $\beta$  随  $T$  变化过于剧烈, 当  $T$  从 300 K 增大至 360 K 时,  $\beta$  减小量达 74.1, 易引起静态工作点的漂移, 不利于功率器件在宽温度范围内稳定工作.

为此, 本文在基区 Ge 组分总量不变的情况下, 对 SiGe HBT 的基区 Ge 组分分布进行了优化设计, 提出基区 Ge 组分为阶梯分布的新型 SiGe HBT (HBT-2), 该器件可在保证充分补偿热电正反馈的同时, 使  $\beta$  随  $T$  的变化趋势变缓. 图 4 为 HBT-2 的基区 Ge 组分分布示意图, 其中,  $W_b$  为基区宽度,  $x_1, x_2, x_3$  和  $x_4$  将基区五等分,  $y_1$  和  $y_3$  分别为基区靠近发射结侧和基区靠近集电结侧的 Ge 组分的含量, 且  $y_2 = (y_1 + y_3)/2$ .

利用本文建立的器件模型, 我们对 HBT-2 的电学特性进行了仿真, 其  $\beta$  与  $T$  的关系曲线如图 3 虚线所示, 其中  $I_b = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_{cc} = 6 \text{V}$ . 可以看出, 当  $T$

从 300 K 增大至 360 K 时, HBT-2 的  $\beta$  减小量仅为 31.6. 与 HBT-1 相比, HBT-2 的  $\beta$  随  $T$  变化的敏感度改善了 57.3%, 这有利于器件在宽温区内热稳定工作.

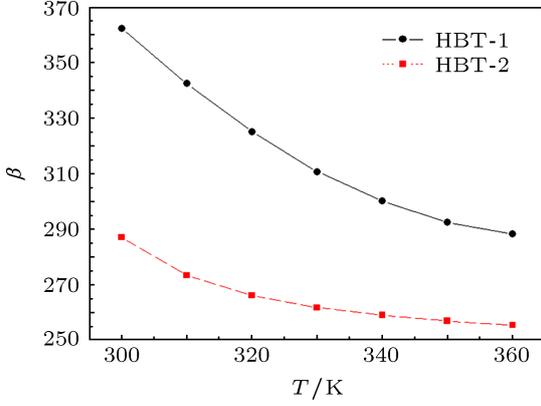


图 3 不同基区 Ge 组分分布的 SiGe HBTs 电流增益 ( $\beta$ ) 随温度 ( $T$ ) 变化曲线

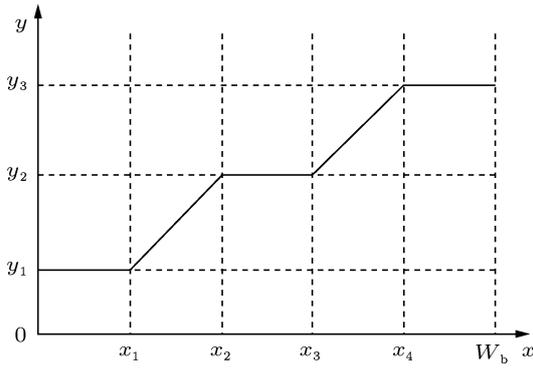


图 4 基区 Ge 组分阶梯分布示意图

下面对两种器件 (HBT-1 和 HBT-2) 的  $\beta$  及其与  $T$  的关系进行简单分析. 对于基区 Ge 组分为阶梯分布的 HBT-2, 其  $\beta$  表达式为 [15]

$$\begin{aligned} & (\beta_{\text{SiGe}})_{\text{HBT-2}} \\ &= \beta_{\text{Si}} \left\{ \frac{x_1 \gamma \eta}{W_b} e^{\frac{c y_1}{kT}} + \gamma \eta \frac{c(y_2 - y_1)}{kT} \frac{e^{\frac{c y_1}{kT}}}{1 - e^{-\frac{c(y_2 - y_1)}{kT}}} \right. \\ & \quad \times \left( \frac{x_2 - x_1}{W_b} \right) + \gamma \eta e^{\frac{c y_2}{kT}} \left( \frac{x_3 - x_2}{W_b} \right) \\ & \quad + \gamma \eta \frac{c(y_3 - y_2)}{kT} \frac{e^{\frac{c y_2}{kT}}}{1 - e^{-\frac{c(y_3 - y_2)}{kT}}} \left( \frac{x_4 - x_3}{W_b} \right) \\ & \quad \left. + \gamma \eta e^{\frac{c y_3}{kT}} \left( \frac{W_b - x_4}{W_b} \right) \right\} \\ &= \beta_{\text{Si}} \frac{\gamma \eta}{5} \left\{ e^{\frac{0.08c}{kT}} + \frac{0.08c}{kT} \frac{e^{\frac{0.08c}{kT}}}{1 - e^{-\frac{0.08c}{kT}}} + e^{\frac{0.16c}{kT}} \right\} \end{aligned}$$

$$+ \frac{0.08c}{kT} \frac{e^{\frac{0.16c}{kT}}}{1 - e^{-\frac{0.08c}{kT}}} + e^{\frac{0.24c}{kT}} \left\} \quad (1)$$

其中,  $c = 688 \text{ meV}$ ,  $\gamma = [(N_c N_v)_{\text{SiGe}} / (N_c N_v)_{\text{Si}}]$ ,  $\eta = [(D_n)_{\text{SiGe}} / (D_n)_{\text{Si}}]$ ,  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为环境温度,  $D_n$  为电子扩散系数,  $N_c, N_v$  分别为导带和价带的有效态密度.

对于 HBT-1 而言, 只须令 (1) 式中  $y_1 = y_2 = y_3$  即有,

$$(\beta_{\text{SiGe}})_{\text{HBT-1}} = \beta_{\text{Si}} \gamma \eta e^{\frac{0.16c}{kT}}. \quad (2)$$

从 (1) 式和 (2) 式不难看出, HBT-1 和 HBT-2 的  $\beta$  均为  $T$  的函数, 将它们分别对  $T$  求偏导并相减可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial T} (\beta_{\text{SiGe}})_{\text{HBT-2}} - \frac{\partial}{\partial T} (\beta_{\text{SiGe}})_{\text{HBT-1}} \\ &= \frac{\gamma \eta}{5} \frac{0.16c}{kT^2} \frac{3 \left( 1 - e^{-\frac{0.16c}{kT}} \right) + e^{\frac{0.08c}{kT}} \left( e^{\frac{0.08c}{kT}} - \frac{3}{2} \right)}{\left( 1 - e^{-\frac{0.08c}{kT}} \right)^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

从 (3) 式可以看出, 等式右侧分子中的第一项永远大于 0, 第二项中的  $e^{\frac{0.08c}{kT}}$  部分也永远大于 0, 第二项中的  $\left( e^{\frac{0.08c}{kT}} - 3/2 \right)$  部分是关于  $T$  的单调递减函数, 不难得出仅当  $T = 3132.5 \text{ K}$  时,  $e^{\frac{0.08c}{kT}} - 3/2 = 0$ , 即当  $T$  小于  $3132.5 \text{ K}$  时,  $\left( e^{\frac{0.08c}{kT}} - 3/2 \right)$  永远大于 0. 因此在 SiGe HBT 正常工作范围 (小于  $500 \text{ K}$ ) 内 (3) 式永远大于 0, 即 HBT-2 的  $\beta$  随  $T$  变化趋势较 HBT-1 平缓, 因此采用基区 Ge 组分阶梯分布设计可有效削弱  $\beta$  对  $T$  的依赖关系. 同时, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的  $\beta$  有所下降, 这是因为在 Ge 组分总量一定的情况下, HBT-2 中性基区靠近发射结侧的 Ge 组分含量较低, 形成的空穴势垒较低, 抑制空穴从基区向发射区注入的能力变弱, 从而降低了发射结注入效率, 导致  $\beta$  的下降.

进一步利用二维器件仿真模块 SILVACO/ATLAS 模拟得到 HBT-1 和 HBT-2 的纵向温度分布, 如图 5 所示, 其中  $I_b = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_{ce} = 6 \text{ V}$ . 可以看出, 在基区 Ge 组分总量一定的情况下, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的整体温度较低, HBT-2 的峰值温度下降达  $11.7 \text{ K}$ , 各发射极指间的温差有所降低, 但各指温度分布仍不均匀. 后面本文会进一步采用发射极指间距渐变技术对其进行改善.

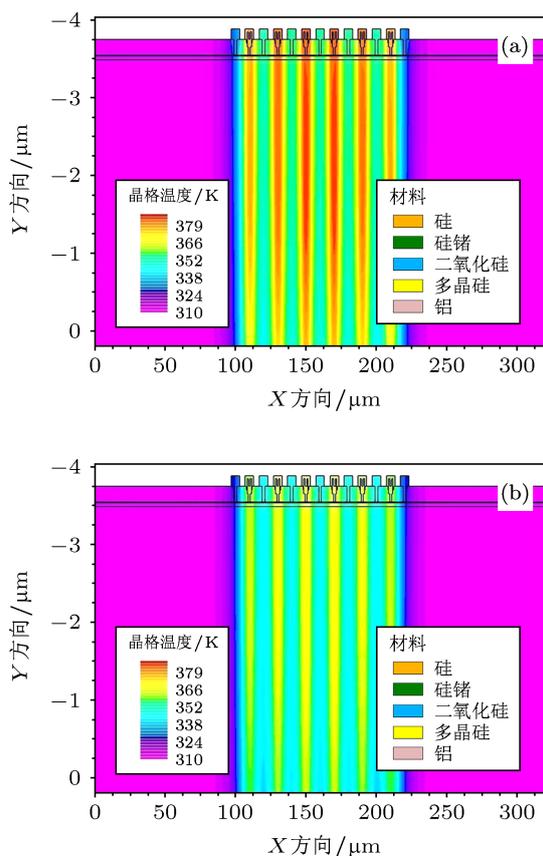


图5 不同基区 Ge 组分分布的 SiGe HBTs 纵向温度分布 (a) HBT-1; (b) HBT-2

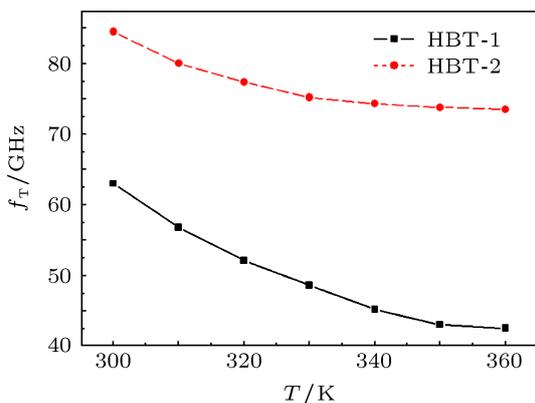


图6 不同基区 Ge 组分分布的 SiGe HBTs 特征频率 ( $f_T$ ) 随温度 ( $T$ ) 变化曲线

此外, 本文还模拟得到不同 Ge 组分分布情况下 SiGe HBT 的特征频率  $f_T$  与  $T$  的依赖关系, 如图 6 所示. 可以看出, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的  $f_T$  提高 34.1% 以上. 这是由于 HBT-2 基区 Ge 组分阶梯分布的存在使得基区靠近发射结侧的禁带宽, 靠近集电结侧的禁带窄, 禁带宽度缓变在基区形成一个加速少子运动的内建电场, 从而减小了基区少子渡越时间, 提高了器件的  $f_T$  [16,17]. 同时, HBT-2 的  $f_T$

随  $T$  变化趋势变缓, 当温度在 300—360 K 范围内变化时, 与 HBT-1 相比, 其温度变化的敏感度改善了 46.3%.

### 3.2 从横向版图角度研究发射极指间距渐变技术对 SiGe HBT 的影响

在前面的分析中, 虽然我们采用基区 Ge 组分阶梯分布设计可有效降低 SiGe HBT 峰值温度, 削弱器件  $\beta$  与  $T$  的依赖关系, 但器件各指温度分布仍不均匀, 中心发射极指与外侧发射极指间的温度相差 6.7 K. 因此, 本文进一步从热学角度研究改善器件各指温度分布均匀性的方法. 对于多指功率 SiGe HBT, 由于中心区域各发射极指会受到两个方向热流的影响, 而两侧发射极指只会受到来自一个方向热流的影响, 因此中心指散热能力较外侧指差. 在我们前期研究 [18] 中发现, 增大中心区域发射极指的指间距值可以增大向下散热途径, 有效阻止相邻发射极指热流的流入.

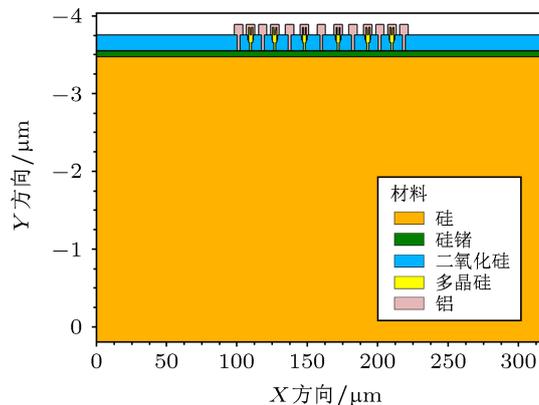


图7 基区 Ge 组分为阶梯分布的发射极指间距渐变结构 6 指 SiGe HBT 器件模型

基于以上考虑, 我们设计出基区 Ge 组分为阶梯分布且发射极指间距为渐变结构的 6 指 SiGe HBT (HBT-3), 其中各发射极指间距分别为 17, 21, 24, 21 和 17  $\mu\text{m}$ . HBT-3 的器件模型如图 7 所示. 利用 SILVACO 软件, 对 HBT-3 的温度分布进行了模拟仿真. 为便于清晰比较, 我们进一步给出三种器件 (HBT-1, HBT-2 和 HBT-3) 在  $I_b = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_{ce} = 6 \text{V}$  时沿器件各指中心线上的温度分布, 如图 8 所示. 与 HBT-1 相比, HBT-2 和 HBT-3 的峰值温度分别降低了 11.7 K 和 21.6 K, 各发射极指上温度分布的均匀性分别改善了 39.4% 和 82.1%.

同时, 我们对 HBT-3 的  $\beta$  和  $f_T$  随  $T$  变化关系进行了模拟, 并与 HBT-1 和 HBT-2 进行比较, 如图

9 和图 10 所示. HBT-3 具有与 HBT-2 相比拟的  $\beta$  和  $f_T$ , 且与 HBT-1 相比, 它们的  $\beta$  和  $f_T$  均在比较大的温度范围内具有较低的热敏感性, 这有利于微波功率 SiGe HBT 在较宽的温度范围内热稳定工作.

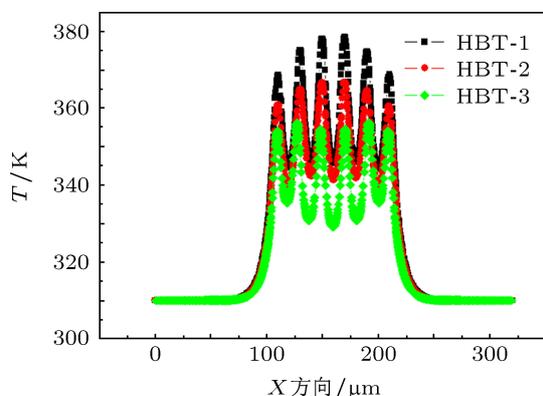


图 8 三种 SiGe HBTs 沿发射极指中心线上的温度分布

#### 4 结论

为提高微波功率 SiGe HBT 在宽温区大电流下工作的热稳定性, 本文首先从器件纵向结构方面研究了基区 Ge 组分分布对 HBT 热学和电学特性的影响. 结果表明, 在 Ge 组分总量一定的情况下, 与基区 Ge 组分均匀分布相比, 采用基区 Ge 组分阶梯分布可提高特征频率  $f_T$  达 34.1% 以上, 电流增益  $\beta$  和  $f_T$  随温度变化的敏感度分别改善 57.3% 和 46.3%, 器件整体温度有所降低, 但器件各指温度分布均匀性较差. 考虑到多指 HBT 各发射极指散热能力存在差异, 本文进一步从器件横向版图方面提出采用指间距渐变结构来进一步改善 HBT 表面温度分布. 在此基础上, 将横向版图和纵向结构设计相结合, 提出了兼顾器件温度分布均匀性、频率和电流增益及其随温度变化敏感性的新型微波功率

SiGe HBT. 结果表明, 与传统的基区 Ge 组分为均匀分布的等指间距 HBT 相比, 新器件在保持高  $f_T$ , 以及  $\beta$  和  $f_T$  的低温度敏感性的同时, 各指温度分布均匀性改善高达 82.1%, 将显著削弱热电反馈的影响, 大幅提高微波功率 SiGe HBT 在宽温区大电流下的热稳定性, 这对设计和制造高性能微波功率 SiGe HBT 具有重要的参考价值.

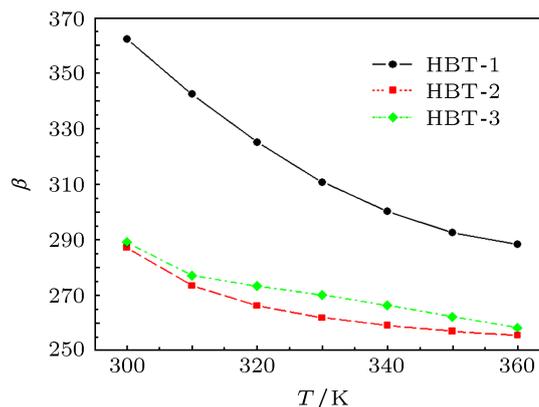


图 9 三种 SiGe HBTs 电流增益 ( $\beta$ ) 随温度 ( $T$ ) 变化曲线

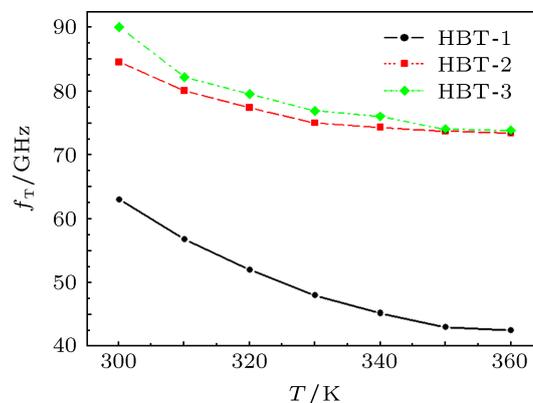


图 10 三种 SiGe HBTs 特征频率 ( $f_T$ ) 随温度 ( $T$ ) 变化曲线

[1] Li Y, Lopez J, Lie D Y C, Chen K, Wu S, Yang T Y, Ma G K 2011 *IEEE Trans. Circuits and Systems I: Regular Papers* **58** 893

[2] Comeau J P, Najafzadeh L, Andrews J M, Prakash A P G, Cressler J D 2007 *IEEE Microwave Wirel. Components Lett.* **17** 349

[3] Giannello V, Ragonese E, Palmisano G 2012 *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **60** 1676

[4] Joseph A J, Cressler J D, Richey D M, Niu G F 1999 *IEEE Trans. Electron Dev.* **46** 1347

[5] Zhang Y J, Zhang W R, Guo Z J, Xing G H, Lu Z Y 2012 *ICMMT* Beijing, China, May 5–8, 2012 p1

[6] Fox R M, Lee S G, Zweidinger D T 1993 *IEEE J. Solid-State Circuits* **28** 678

[7] Zhang Q Y, Yang Z M, Jiang Z H, Zhao C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3106 (in Chinese) [张勤远, 杨中民, 姜中宏, 赵纯 2006 物理学报 **55** 3106]

[8] Zhu Y B, Bao Z, Yang Y J, Cai C J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7833 (in Chinese) [朱亚波, 鲍振, 杨玉杰, 蔡存金 2009 物理学报 **58** 7833]

[9] Lee J G, Oh T K, Kim B, Kang B K 2001 *Solid State Electron.* **45** 27

[10] Chang Y H, Chiang C C, Lee Y C, Liu C C 2002 *The Proceedings of the International Electron Devices Meeting Hong Kong*, 22 June, 2001 p95

[11] Zhou W, Sheu S, Liou J J, Huang C I 1996 *Solid State Electron.* **39** 1709

[12] Liu Y, Bayraktaroglu 1993 *Solid State Electron.* **36** 125

- [13] Rieh J S, Greenberg D, Liu Q Z, Joseph A J, Freeman G, Ahlgren D C 2005 *IEEE Trans. Electron Dev.* **52** 2744
- [14] Xiao Y, Zhang W R, Jin D Y, Chen L, Wang R Q, Xie H Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044402 (in Chinese) [肖盈, 张万荣, 金冬月, 陈亮, 王任卿, 谢红云 2011 物理学报 **60** 044402]
- [15] Harame D L, Comfort J H, Cressler J D, Crabb C E F, Sun J Y C, Meyerson B S, Tice T 1995 *IEEE Trans. Electron Dev.* **4** 455
- [16] Song J, Yuan J S, Schwierz F, Schipanski D 1996 *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* **2** 876
- [17] Patri V S, Kumar M J 1999 *IEE Proc.-Circuits Dev. Syst.* **146** 291
- [18] Jin D Y, Zhang W R, Chen L, Fu Q, Xiao Y, Wang R Q, Zhao X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064401

# Novel microwave power sige heterojunction bipolar transistor with high thermal stability over a wide temperature range\*

Lu Dong<sup>†</sup> Jin Dong-Yue Zhang Wan-Rong Zhang Yu-Jie Fu Qiang Hu Rui-Xin  
Gao Dong Zhang Qing-Yuan Huo Wen-Juan Zhou Meng-Long Shao Xiang-Peng

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 12 December 2012; revised manuscript received 15 January 2013)

## Abstract

Thermal instability of power SiGe heterojunction bipolar transistor (HBT) at high current over a wide temperature range restricts the applications of the device in RF and microwave circuits. In order to improve the thermal instability, the influences of Ge profile in a base region on the electrical and thermal characteristics of microwave power SiGe HBT are studied with the aid of the model of multi-finger power SiGe HBT established by SILVACO TCAD. It is shown that for the HBT with graded step Ge profile, a higher cut-off frequency  $f_T$  can be achieved due to the accelerating electric field caused by the graded step Ge concentration in the base region when compared with the device with uniform Ge profile. The influences of temperature on current gain  $\beta$  and  $f_T$  are weakened, which avoids the drift of electrical characteristics over a wide temperature range. Although the temperature of device is lowered, the temperature of each emitter finger is still non-uniform. Considering the difference in heat dissipation among emitter fingers, a new device with non-uniform emitter finger spacing in layout and a graded step Ge profile in base region is designed. For the new device, the uniformity of temperature among emitter fingers is achieved, higher  $f_T$  is kept,  $\beta$  and  $f_T$  are less sensitive to temperature variation. Hence the thermal instability is obviously improved compared with the device with uniform emitter finger spacing and uniform Ge profile in base region, indicating the superiority of the new device at high current over a wide temperature range.

**Keywords:** SiGe heterojunction bipolar transistor, Ge-profile, non-uniform emitter finger spacing, thermal stability

**PACS:** 44.10.+i, 72.20.Pa, 85.30.De

**DOI:** 10.7498/aps.62.104401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61006059, 60776051, 61006049), the Beijing Municipal Natural Science Foundation, China (Grant No. 4082007), the Beijing Municipal Trans-Century Talent Project, China (Grant No. 67002013200301), the Beijing Municipal Education Committee, China (Grant Nos. KM200710005015, KM200910005001), and Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning under the Jurisdiction of Beijing Municipality, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: ludong@emails.bjut.edu.cn