

能带工程对射频功率 SiGe 异质结双极晶体管热性能改善*

肖 盈[†] 张万荣 金冬月 陈 亮 王任卿 谢红云

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2010年6月21日收到; 2010年7月25日收到修改稿)

众所周知,基区“能带工程”可以改善 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区异质结双极晶体管 (HBT) 的直流、频率和噪声等特性,但“能带工程”对 HBT 热学特性的影响的研究还很少。本文基于三维热电反馈模型,分析了“能带工程”对射频功率 SiGe HBT 热性能的影响。考虑到电流增益随温度的变化以及发射结电压负温度系数,给出了器件热稳定所需最小镇流电阻 (R_{Emin}) 的表达式,在此基础上给出了非均匀镇流电阻的设计,进一步提高了 SiGe HBT 的热稳定性。研究发现,随基区 Ge 组分的增加,芯片表面温度降低,这是 SiGe HBT 内部产生了热电负反馈效应的结果。在相同的耗散功率下,随着基区 Ge 组分的增加,器件热稳定所需的镇流电阻减小。这些结果对器件的热学设计具有重要的参考意义,也有利于改善器件的饱和压降、功率增益、频率特性等整体性能。

关键词: SiGe HBT, Ge 组分, 热电反馈, 镇流电阻

PACS: 44. 10. + i, 72. 15. Jf, 85. 30. De

1. 引言

SiGe 基区异质结双极晶体管 (简称 SiGe HBT) 在具有高的频率特性的同时能够获得高的电流处理能力,在微波大功率领域得到越来越广泛的应用^[1-8]。而在大电流下工作下,其自身功率耗散而引起热效应变得非常显著。又因为发射极电流具有正温度系数,使热和电之间形成正反馈^[9],进一步加剧了热效应。而且,功率 HBT 通常采用梳状叉指结构^[10,11],指间的热耦合导致不同指上的温度分布不均匀,温度高的指将传导更多的电流,使温度更高,造成器件温度分布更加不均匀,可能形成热斑,甚至超过材料本征温度,最终造成器件烧毁。器件热效应不但影响器件的热稳定性,也会使器件的电学特性、频率特性、功率特性退化。

在减轻热效应的诸多方法中,镇流电阻技术因其有效易行的优势被广泛采用^[12]。通过加入镇流电阻来补偿温度升高引起的发射结电压的下降,减小器件的自热,提高器件的热稳定性。但是,镇流电阻

的引入退化器件饱和压降、功率增益、噪声、高频特性等性能,因此,我们希望加入的镇流电阻值在保证器件热稳定前提下尽可能得小。“能带工程”(基区加入 Ge)能够改善 SiGe HBT 的直流特性和频率特性,也使其电流增益具有负温度系数^[13],进而能够部分补偿热电正反馈,对于镇流电阻的选取有着积极作用,并且,基区 Ge 组分的不同使电流增益具有不同的温度系数,进而影响不同 Ge 组分 SiGe HBT 的热性能。但目前针对“能带工程”补偿器件热效应的讨论很少,文献[14]在实验结果中指出,由于 HBT 内部存在热电负反馈,建议可以减少镇流电阻值,但并没有进行理论分析。文献[15]中制作的梳状叉指功率 HBT 在每一指上加入了相同的镇流电阻,也通过实验结果猜测,利用 HBT 的特性,可减小加入镇流电阻值,但如何减少镇流电阻值并没有进一步分析。因此,本文将在建立三维热电反馈模型的基础上,分析不同 Ge 组分对器件表面温度的影响,考虑电流增益随温度变化以及发射结电压的负温度系数,给出器件热稳定所需的发射极最小镇流电阻表达式,并讨论不同 Ge 组分的 SiGe HBT 对

* 国家自然科学基金 (批准号: 60776051), 北京市自然科学基金 (批准号: 4082007), 北京市教委科技发展计划 (批准号: KM200710005015, KM200910005001) 资助的课题。

[†] E-mail: xiaoying@bjut.edu.cn

镇流电阻选取的影响,与BJT进行比较.最后给出非均匀镇流电阻设计,在补偿自热的同时改善热耦合效应,提高SiGe HBT的热稳定性.

2. 热电反馈模型的建立

制造在Si衬底上的梳状叉指结构SiGe HBT的稳态热分析模型如图1所示.该芯片长、宽及厚度分别为 L, W 和 d .每个发射极指长、宽分别为 l 和 w .考虑到每个指上的温度分布的非均匀性,我们将梳状叉指结构SiGe HBT的每个指分成 $M \times N$ 个热源单元来表征相应温度分布,此时在每个热源单元内的电流和温度分布可以认为是均匀的.

考虑到发射结电压负温度系数和发射极镇流电阻,SiGe HBT第 k 指上第 (i, j) 热源单元对应的电流密度 $J_{ck,ij}$ 与温度 T 的关系可表示为

$$J_{ck,ij} = J_{c0} \exp \left\{ \frac{q}{k_B T_0} [V_{BE} - lwJ_{ck,ij} \times R_{Ek} (1 + 1/h_{fek,ij}(T)) - \phi \cdot T(x_{k,ij}, y_{k,ij}, 0) + \phi \cdot T_0] \right\}, \quad (1)$$

其中 V_{BE} 和 V_{CE} 分别为发射结电压和集电极-发射极间电压, ϕ 为SiGe HBT发射结电压负温度系数($\phi = \partial V_{BE} / \partial T < 0$), k_B 为波尔兹曼常数, $h_{fek,ij}$ 为HBT的第 k 个发射极指上第 (i, j) 单元对应的电流增益.

考虑电流增益随温度变化、重掺杂禁带变窄效应和异质结的存在, $h_{fek,ij}$ 可进一步表示为

$$h_{fek,ijHBT}(T) = h_{fek,ij}^* \cdot \exp \left(\frac{\Delta E_v + \Delta E_g}{k_B T} \right), \quad (2)$$

其中, $h_{fek,ij}^*$ 是与温度无关的系数, ΔE_g 为基区重掺杂引起的禁带变窄量,以Klaassen等人^[16]提出的模型来计算,发射结价带不连续性能量差 ΔE_v 与Ge组分(x)的关系为 $\Delta E_v = 0.74x$ (eV).

对于SiGe HBT,基区加入Ge组分 x 使SiGe基区禁带宽度小于Si发射区的禁带宽度,在发射结处产生了能带断续,与BJT相比,减小了反向注入的基极电流,大大提高了电流增益,如(2)式所示.并且HBT注入效率的提高为增加基区掺杂浓度提供了可能,高的基区掺杂还有利于减小基区方块电阻,同时,通过减小基区厚度,还可减小基区渡越时间从而保证在具有大的电流增益下,获得高的频率特性,低的噪声特性,从而满足射频应用的要求.而且,基区的重掺杂和Ge组分的存在,使电流增益具有负温度系数.因此,能够部分补偿在大功率应用中恶化的热电正反馈.“能带工程”使HBT在功率应用中也有着同质结晶体管(BJT)不可比拟的优势.

对于射频功率HBT,热主要产生在集电结,而集电结结深远小于芯片厚度 d ,因此可以近似认为热源在芯片表面,相应于发射区处,热流由表面流向芯片内部.假设芯片表面(除发射区)及四周均为绝热,底面温度保持在恒定的热沉温度,即室温 T_0 下.由以上边界条件,我们通过解析稳态热传导方程(如(3)式所示),可得到芯片表面(即 $z = 0$)的温度分布.

$$\nabla[\kappa(T) \nabla T] = 0. \quad (3)$$

为便于数学求解,先假设热导率为常数($\kappa(T) = \kappa_0$),最终得到芯片表面某点 $(x, y, 0)$ 的温度表达式为

$$T(x, y, 0) = \frac{2w}{LW} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_m^2} \tanh(\lambda_m d) \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{P_{k,ij}}{\kappa_0} \cdot F(m, k, i, j) \cdot \cos(\lambda_m x) \right] + \frac{2l}{LW} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\mu_n^2} \tanh(\mu_n d) \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{P_{k,ij}}{\kappa_0} \cdot G(n, k, i, j) \cdot \cos(\mu_n y) \right] + \frac{4}{LW} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\lambda_m \mu_n \gamma} \tanh(\gamma d) \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[\frac{P_{k,ij}}{\kappa_0} \cdot F(m, k, i, j) \times G(n, k, i, j) \cdot \cos(\lambda_m x) \cdot \cos(\mu_n y) \right] \right\} + \frac{lwd}{LW} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{P_{k,ij}}{\kappa_0} + T_0, \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \lambda_m &= m\pi/L, \quad \mu_n = n\pi/W, \\ \gamma^2 &= \lambda_m^2 + \mu_n^2, \\ F(m, k, i, j) &= \sin\lambda_m(x_{k,ij} + l/2) \\ &\quad - \sin\lambda_m(x_{k,ij} - l/2), \\ G(n, k, i, j) &= \sin\mu_n(y_{k,ij} + w/2) \\ &\quad - \sin\mu_n(y_{k,ij} - w/2), \end{aligned}$$

第 k 指上第 (i, j) 热源单元的热流密度为

$$P_{k,ij} = J_{ck,ij} \cdot V_{CE}. \quad (5)$$

为使得到的芯片表面温度分布模拟结果更接近器件真实的温度分布,同时避免温度表达式的复杂化,我们在热导率(考虑随温度的变化: $\kappa(T) = 320/(T - 80)$)和 SiGe HBT 表面温度 $T(x, y, 0)$ 之间进行迭代,实现芯片表面温度与随温度变化的热导率 $k(T)$ 相一致.

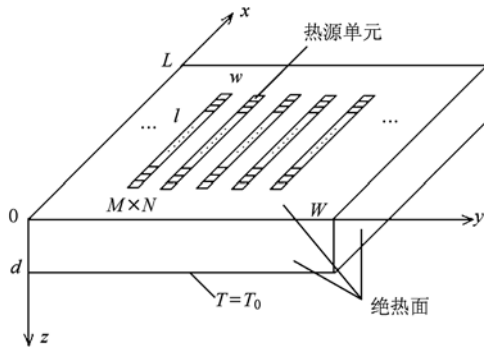


图1 三维热分析模型示意图

3. 结果与分析

3.1. 不同 Ge 组分对芯片表面温度的影响

本文以五指 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 为例,每个梳状叉指的长和宽分别为 $60 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$,相邻指的间距为 $17 \mu\text{m}$,每个指划分为 20 个小的热源单元 ($3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$). 器件工作在 0.9 W 功率下,初始电流增益 h_{fe0} (室温下) 为 152,对于 HBT,选取发射结电压负温度系数 $\varphi = -1.6 \text{ mV/K}^{[17]}$,令基区 Ge 组分 $x = 0.1, 0.16$ 和 0.2 ,分别计算出芯片表面温度分布.我们提取每个指的中心温度进行比较,如图 2 所示.当 $x = 0.2$ 时,中心指的峰值温度为 433.90 K ,边缘指中心温度为 415.83 K ,比 $x = 0.1$ 时分别降低了 11.53 和 8.75 K .随着基区 Ge 组分 x 的增加,芯片

表面温度降低.这是因为基区 Ge 组分的含量影响着发射结价带势垒高度,Ge 组分越大,空穴反向注入电流越小,它随工作温度升高而增加的程度越剧烈,体现在电流增益上,即随温度的升高,电流增益减小得越明显,因而形成的热电负反馈越明显.中心指与边缘指之间的温差由 20.85 K 减少到 18.07 K ,但其温度分布还是不均匀的,可见 Ge 组分增加对于温度分布不均匀性的改善没有明显的效果,温度分布的非均匀性可以通过调整镇流电阻的分布来改善,这部分将在后面做分析.

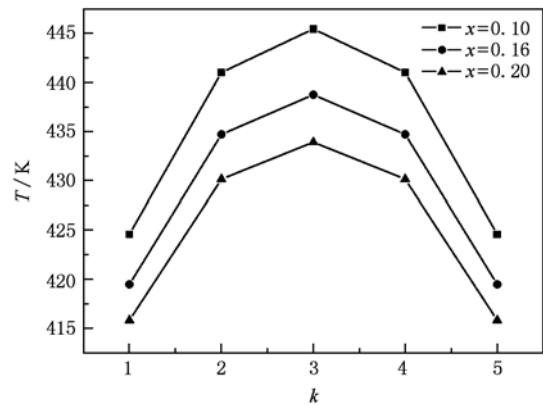


图2 Ge 组分 x 分别为 $0.1, 0.16$ 和 0.2 的 SiGe HBT 各指中心温度 T 的比较

对于同质结 BJT, $\Delta E_v = 0$,考虑发射区重掺杂效应,发射区禁带宽度减小了 ΔE_g ,电流增益可表示为

$$h_{fe\text{BJT}}(T) = h_{fe}^* \exp\left(-\frac{|\Delta E_g|}{k_B T}\right). \quad (6)$$

BJT 发射结电压负温度系数 $\varphi = -2 \text{ mV/K}$,在相同梳状叉指面积、工作条件和初始电流增益下,图 3 给出了计算得到的 BJT 表面温度分布.在相同条件下,BJT 中心指的峰值温度为 519.79 K ,比 Ge 组分 $x = 0.2$ 的 SiGe HBT 峰值温度增加了 85.89 K ,

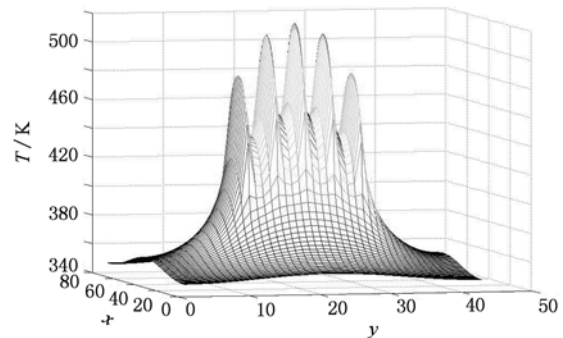


图3 BJT 表面温度 $T(x, y, 0)$ 分布

这是由于 BJT 发射区重掺杂,致使电流增益随温度的升高而增加,加剧了热电正反馈.

3.2. 不同 Ge 组分对发射极最小镇流电阻的影响

我们知道,热电反馈效应是造成器件热不稳定的根本原因.可以通过热稳定因子 S 来预测器件的热不稳定性,其表达式如下^[18]:

$$S = R_{th} V_{CE} \partial I_C / \partial T, \quad (7)$$

其中, R_{th} 为器件热阻.当 $S > 1$ 时,电流的微扰通过热电反馈被放大,结温不断升高,导致器件热不稳定,最终热奔;当 $S < 1$ 时,器件处于热稳定状态.因此,我们定义的器件热稳定所需的发射极最小镇流电阻,就是 $S = 1$ 时的镇流电阻.

令 $S = 1$,由(1),(2),(7)式计算得到器件热稳定所需的发射极最小镇流电阻表达式为

$$R_{Emin} = \frac{-\phi R_{th} V_{CE} - \frac{kT_0}{qI_C}}{1 + \frac{1}{h_{fe}(T)} + \frac{I_C}{h_{fe}(T)} \frac{\Delta E_v + \Delta E_g}{k_B T^2} R_{th} V_{CE}}. \quad (8)$$

器件的工作温度由公式 $T = T_0 + P_{diss} R_{th}$ 给出,其中 $P_{diss} = V_{CE} I_C$, $V_{CE} = 4 \text{ V}$, $R_{th} = 150 \text{ K/W}$,得到在不同 Ge 组分 x 下, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 热稳定所需发射极最小镇流电阻与耗散功率 P_{diss} 的关系,如图 4 所示.为便于比较,图中也同时给出了 Si BJT 热稳定所需发射极最小镇流电阻,我们是令 $\Delta E_v = 0$, $\phi = -2 \text{ mV/K}$,考虑发射区禁带宽度变窄效应得到的.

从图 4 中可以看出,在相同的耗散功率下,随着 Ge 组分的增加,器件热稳定所需的发射极最小镇流电阻是减小的.耗散功率为 0.9 W , $x = 0.1$ 时,热稳

定所需的发射极最小镇流电阻 $R_{Emin} = 0.79 \text{ } \Omega$, $x = 0.2$ 时, R_{Emin} 减小为 $0.65 \text{ } \Omega$.这是因为发射极加入镇流电阻是为了补偿温度升高引起的发射电压的下降,进而抑制电流随温度的升高而增加,达到减小 SiGe HBT 自热效应的目的,而 Ge 的存在,使电流增益具有负温度系数,其形成的热电负反馈同样补偿了器件的自热效应,与镇流电阻的作用一样达到减小自热的目的.因此,Ge 组分的增加有利于减小 R_{Emin} 的取值.

而对于 BJT,同样的耗散功率下, $R_{Emin} = 1.08 \text{ } \Omega$,远大于 HBT 情况下热稳定所需的发射极最小镇流电阻值.由于 BJT 的电流增益具有正温度系数,随耗散功率的增加,工作温度升高,电流增益增大,恶化了自热效应,需要补偿自热而加入的镇流电阻增大.

因此,正是基区 Ge 的存在,使 SiGe HBT 比 Si BJT 具有更好的热稳定性,并且在应用中考虑到 Ge 组分的作用,不仅可以提高射频功率 SiGe HBT 的热稳定性, R_{Emin} 的减小也同时降低了器件引入镇流电阻带来的负面影响(例如饱和压降、噪声、频率等的退化).

3.3. 非均匀镇流电阻设计

在前面的分析中,器件每个发射极指加入相同的镇流电阻,通过补偿自热效应来提高器件热稳定性,但是指与指之间的温度分布差距很大,而非均匀镇流电阻的设计方法可以通过调整每个指的自热,来改变指间的热耦合,不仅整体降低了器件表面温度,更使其表面温度分布趋于均匀化,大大减少了热斑的形成和热奔发生的概率,延伸了器件的工作温度范围,使器件具有更好的热稳定性.

从图 4 中提取在功率为 0.9 W 时,Ge 组分 $x = 0.2, 0.16$ 和 0.1 的 SiGe HBT 以及 BJT 的总 R_{Emin} 分别为 $0.65, 0.73, 0.79$ 和 $1.08 \text{ } \Omega$,对于五个发射极指并联的器件,以上四种情况下平均每个指所加镇流电阻值分别为 $3.95, 3.65, 3.25$ 和 $5.4 \text{ } \Omega$.以 Ge 组分 $x = 0.16$ 的 5 指 SiGe HBT 为例, R_{Ek} 表示第 k 指所加的镇流电阻值,采用均匀镇流电阻设计和非均匀镇流电阻设计的镇流电阻分布如表 1 所示,图 5 和图 6 为采用两种设计方法得到的器件表面温度分布,可以看出,与加入均匀镇流电阻相比,非均匀的镇流电阻设计使器件中间指温度显著下降,整体温度分布趋于均匀.

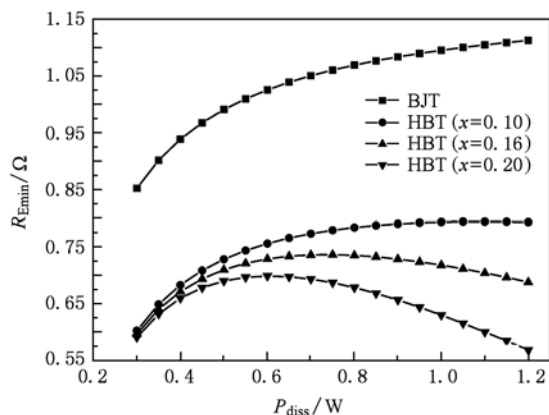
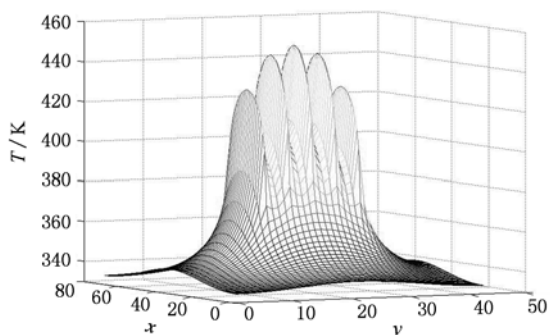
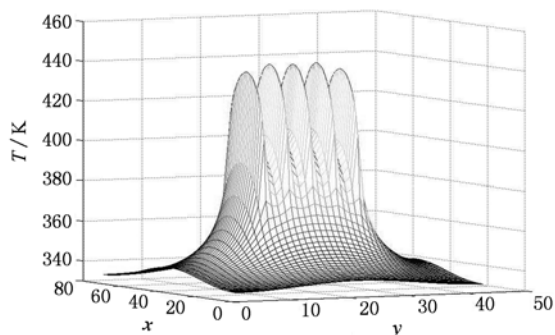


图 4 Ge 组分 x 分别为 $0.1, 0.16, 0.2$ 的 SiGe HBT 和 Si BJT 的耗散功率(不同 I_C)与发射极最小镇流电阻的关系

表1 镇流电阻分布

	R_{E1}/Ω	R_{E2}/Ω	R_{E3}/Ω	R_{E4}/Ω	R_{E5}/Ω
均匀镇流电阻设计	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65
非均匀镇流电阻设计	3.25	3.85	4.05	3.85	3.25

图5 采用均匀镇流电阻设计的SiGe HBT表面温度 $T(x,y,0)$ 分布图6 采用非均匀镇流电阻设计的SiGe HBT表面温度 $T(x,y,0)$ 分布

4. 结 论

本文研究了“能带工程”对射频功率 SiGe HBT 热性能的提高. 建立了三维热电反馈模型, 以五指 SiGe HBT 为例, 分析了 Ge 组分 (x) 对 SiGe HBT 表面温度的影响, 并给出了器件热稳定所需的最小镇流电阻 (R_{Emin}) 表达式. 结果表明, 随着基区 Ge 组分的增加, SiGe HBT 表面温度降低. 在相同功耗下, 随着 Ge 组分的增加, R_{Emin} 减小. 这是因为基区 Ge 的引入使 SiGe HBT 基区禁带变窄, 导致电流增益随温度的升高而降低, 部分补偿了热电正反馈, 进而减轻了自热效应. 镇流电阻的减少, 减小了引入镇流电阻带来的负面影响. 与 BJT 比, HBT 有更好的热稳定性, 并且可以利用热电负反馈来减少加入的镇流电阻. 最后, 本文给出了非均匀镇流电阻设计, 在补偿器件自热的同时也改善热耦合效应, 进一步提高了 SiGe HBT 的热稳定性. 如果在 SiGe HBT 的设计中, 考虑能带工程(基区 Ge 组分)的影响, 可以减小发射极加入的镇流电阻值, 有利于射频功率 SiGe HBT 直流特性、高频特性、噪声特性、功率特性等的改善, 提高器件的整体性能. 但需要注意的是, Ge 组分增加, 发生弛豫的临界厚度减少了, 同时对热过程带来了限制, 这是由 SiGe 和 Si 的晶格失配决定的, 所以在 SiGe HBT 基区中 Ge 组分的含量一般不超过 0.3.

[1] Comeau J P, Najafizadeh L, Andrews J M, Gnana A P, Cressler J D 2007 *IEEE Microw. Wirel Compon. Lett.* **17** 349

[2] Ma L, Gao Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 303

[3] Lin G J, Lai H K, Li C, Chen S Y, Yu J Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3479

[4] Dong W F, Yang Q Q, Li J, Wang Q M, Chui Q, Zhou J M, Huang Q 1996 *Chin. Phys.* **5** 456

[5] Lai C J, Li Z H, Li Z J, Zhang B, Zhang Y R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 763

[6] Hu H Y, Zhang H M, Dai X Y, Jia X Z, Cui X Y, Wang W, Ou J F, Wang X Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1439

[7] Cao Q J, Zhang Y M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4622

[8] Zhou S L, Huang H, Huang Y Q, Ren X M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2890 (in Chinese) [周守利、黄辉、黄永清、任晓敏 2007 *物理学报* **56** 2890]

[9] Vassighi A, Sachdev M 2006 *IEEE Trans. on Device Mater. Reliab.* **6** 300

[10] Liou J J, Liou L L, Huang C I 1994 *IEEE Proc. Circuits Device Syst.* **141** 469

[11] Shinohara Y, Ishikawa R, Honjo K 2008 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **56** 747

[12] Zhu Y, Twynam J K, Yagura M, Hasegawa M, Hasegawa T, Eguchi Y, Amano Y, Suematsu E, Sakuno K, Matsumoto N, Sato H, Hashizume N 1999 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest Anaheim, USA, June 13—19, 1999* p431

[13] Gao G B, Wang M Z, Gui X, Morkoc H 1989 *IEEE Trans. on Electron. Devices* **36** 854

[14] Hidaka O, Morizuka K, Mochizuki H 1995 *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** 886

[15] Schuppen A, Gerlach S, Dietrich H, Wandrei D, Seiler U, Konig U 1996 *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.* **6** 341

[16] Klaassen D B L, Slotboom J W, Degraaff H C 1992 *Solid-State Electron* **35** 125

- [17] Zhang W R, Yang J W, Liu H J 2004 *IEEE International Conference on Microwave and Milli-wave Technology* Beijing, China, August 18—21, 2004 p594
- [18] Hower P L, Govil P K 1974 *IEEE Trans. on Electron. Devices* **21** 617

Effect of bandgap engineering on thermal characteristic of radio frequency power SiGe heterojunction bipolar transistor*

Xiao Ying[†] Zhang Wan-Rong Jin Dong-Yue Chen Liang Wang Ren-Qing Xie Hong-Yun

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

(Received 21 June 2010; revised manuscript received 25 July 2010)

Abstract

As is well known, direct-current (DC) characteristic, frequency characteristic and noise characteristic of SiGe heterojunction bipolar transistor (HBT) can be improved by “bandgap engineering” (by Ge composition). However, the effect of “bandgap engineering” on the thermal characteristic of HBT has not been reported. In this paper, the effect of “bandgap engineering” is analyzed by the use of 3D thermal-electric feedback model. Considering the temperature dependence of emitter junction voltage and current gain, the expression of the minimum emitter ballasting resistance (R_{Emin}), which is necessary for SiGe HBT thermal stability, is presented. Furthermore, non-uniform ballasting resistance design is given so as to further enhance the thermal stability of device. It is found that the surface temperature of the device decreases with the increase of Ge composition in SiGe base. This is because SiGe HBT internally possesses the thermal-electrical negative feedback. For the same dissipated power, the R_{Emin} decreases as Ge composition increases, which is beneficial to the improvement of the performance of radio frequency (RF) power SiGe HBT. These results provide a good guide to further optimization of RF power SiGe HBT performance, especially thermal design.

Keywords: SiGe HBT, Ge composition, thermal-electric feedback, ballasting resistance

PACS: 44.10.+i, 72.15.Jf, 85.30.De

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60776051), the Beijing Municipal Natural Science Foundation, China (Grant No. 4082007), the Beijing Municipal Education Committee, China (Grant Nos. KM200710005015, KM200910005001).

[†] E-mail: xiaoying@bjut.edu.cn