

微波功率 SiGe HBT 的温度特性*

杨经伟^{1,†} 张万荣¹ 金冬月² 邱建军¹ 高攀¹

(1 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

(2 辽宁大学物理系, 沈阳 110036)

摘要: 通过研究 SiGe 异质结双极型晶体管(HBT)的温度特性,发现 SiGe HBT 的发射结正向电压随温度的变化率小于同质结 Si 双极型晶体管(BJT). 在提高器件或电路热稳定性时,SiGe HBT 可以使用比 Si BJT 更小的镇流电阻. 同时 SiGe HBT 共发射极输出特性曲线在高电压大电流下具有负阻特性,而负阻效应的存在可以有效地抑制器件的热不稳定性效应,从而在温度特性方面证明了 SiGe HBT 更适合于微波功率器件.

关键词: SiGe HBT; 温度特性; 微波功率晶体管

EEACC: 2560P; 2560J

中图分类号: TN385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0231-04

1 引言

SiGe HBT 以其良好的性能及价格的优势在高频、大功率应用中占据了越来越重要的地位,近几年来发展十分迅速^[1]. 当晶体管被用作微波功率器件时,为保证其安全工作,一般要求器件工作在低压大电流模式下,这样很容易使器件温度上升,从而导致其各项性能参数变化,其中由于热电正反馈引起的二次击穿是造成晶体管永久失效的主要原因^[2]. 所以对器件相关参数的温度特性进行研究对晶体管的设计、制作及应用具有重要意义.

2 实验

本文所用器件样品为 Si/Si_{0.85}Ge_{0.15}/Si HBT, 其纵向结构及工艺参数分别如图 1 和表 1 所示.

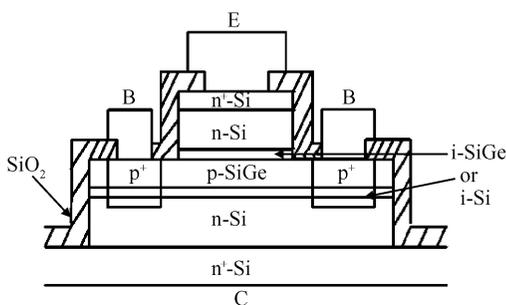


图 1 SiGe HBT 纵向剖面
Fig. 1 Schematic cross section of SiGe HBT

表 1 SiGe HBT 纵向结构参数
Table 1 Structure of SiGe HBT

	材料	厚度	浓度	Ge 组分 <i>x</i>
发射区帽层	n ⁺ -Si	50nm	>5×10 ¹⁸	0
发射区	n-Si	150nm	3×10 ¹⁷	0
基区	p ⁺ -SiGe	100nm	1×10 ¹⁹	0.15
集电区	n-Si	400nm	1×10 ¹⁷	0
衬底	n ⁺ -Si	>500μm	>5×10 ¹⁸	0

实验系统结构如图 2 所示,器件所在环境温度由程控温箱提供,从 23℃ 升至 260℃,温度间隔步长为 20℃,每个间隔上升时间为 15min,在每个温度点保持稳定 30min,然后分别在各温度点利用 Agilent 4155C 晶体管测试仪测量器件的温度参数,图 3 和图 4 分别给出了器件的共发射极输出特性和输入特性曲线.

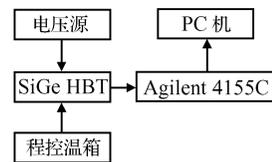


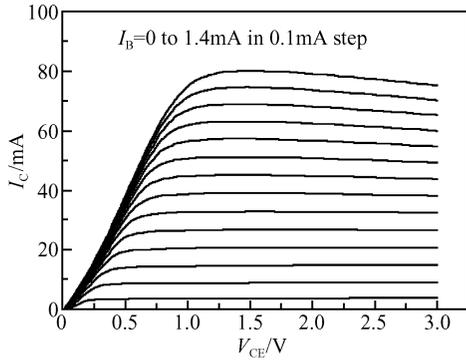
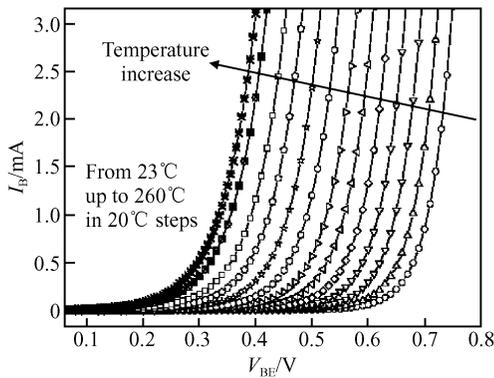
图 2 实验系统框图
Fig. 2 Block diagram of experimental system

从图 4 中分别提取当基极电流 $I_B = 3\text{mA}$, 1mA , $100\mu\text{A}$, $10\mu\text{A}$ 时在各个温度点下发射结电压 V_{BE} 的值,可得出在不同 I_B 下 V_{BE} 随温度的变化曲线,如图 5 所示.

* 国家自然科学基金(批准号:60376033),北京市优秀跨世纪人才基金(批准号:67002013200301)和模拟集成电路国家重点实验室基金资助项目

† 通信作者, Email: jwang@emails.bjut.edu.cn

2005-10-11 收到, 2006-01-09 定稿

图 3 SiGe HBT 在 23°C 时的共发射极 I - V 曲线Fig. 3 I - V curves of common emitter SiGe HBT at 23°C图 4 不同温度下 I_B 随 V_{BE} 的变化曲线Fig. 4 Variation of I_B with V_{BE} at different temperatures

由图 5 可知, 当 I_B 恒定时, V_{BE} 随温度的升高而降低. 当 I_B 为 1 mA 时, V_{BE} 的变化如表 2 所示.

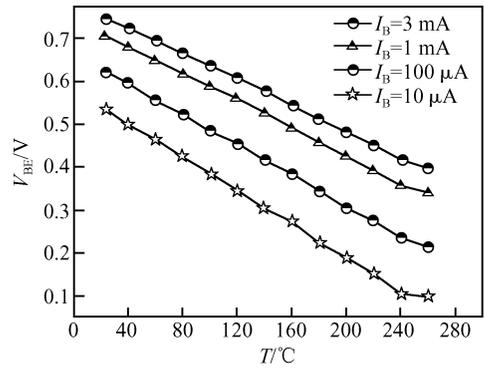
$$\frac{dV_{BE}}{dT} = \frac{V(7) + V(8) + V(9) + V(10) + V(11) + V(12) - V(1) - V(2) - V(3) - V(4) - V(5) - V(6)}{6 \times 20} \quad (1)$$

$$\left. \frac{dV_{BE}}{dT} \right|_{I_B = 1\text{mA}} \approx -1.59\text{mV}/^\circ\text{C} \quad (2)$$

同样可以得到, 当 $I_B = 3\text{mA}, 100\mu\text{A}, 10\mu\text{A}$ 时, dV_{BE}/dT 的值分别为 -1.53 , -1.76 和 $-1.92\text{mV}/^\circ\text{C}$.

3 讨论与分析

晶体管在功率应用时, 工作电压及电流往往比较大, 易出现热电正反馈, 形成二次击穿, 使器件瞬时烧毁. 由图 3 可看出, 当 SiGe HBT 工作在高电压和大电流时, 会产生负阻特性^[3], 即随着电压 V_{CE} 的

图 5 不同 I_B 下 V_{BE} 随温度的变化曲线Fig. 5 Variation of V_{BE} with temperature in different I_B 表 2 I_B 为 1 mA 时 V_{BE} 随温度的变化Table 2 Temperature dependence of V_{BE} at $I_B = 1\text{mA}$

Number(i)	$T/^\circ\text{C}$	$V(i)/\text{V}$
1	20	0.74437
2	40	0.72461
3	60	0.69413
4	80	0.66449
5	100	0.63564
6	120	0.60683
7	140	0.57802
8	160	0.54425
9	180	0.512932
10	200	0.48083
11	220	0.45119
12	240	0.41658

表 2 中, Number(i) 为温度点编号, T 为温度, $V(i)$ 为电流为 1 mA 时 V_{BE} 的值. 可得 V_{BE} 随温度变化率:

增大, 集电极电流 I_C 反而减小, 使得 SiGe HBT 本身具有抑制电流增大的特性, 从而减小器件发生击穿的可能性, 提高了器件的热稳定性, 这是普通 Si BJT 不具备的.

为防止二次击穿(尤其是正偏二次击穿), 通常采用加发射极镇流电阻的方法^[4], 加入了发射极镇流电阻 R_E , 对防止二次击穿是有效的, 但对晶体管功率增益参数带来了不利的影响, 因此必须适当控制发射极镇流电阻的阻值. 为了恰当选定发射极镇流电阻的阻值, 工程上一般规定, 当发射极结温变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 时, 镇流电阻要能将发射极电流的变化限制在 $\pm 5\%$ 以内. 假定外加发射极电压 V_{BE} 不变. 设 BE 结正向电压温度系数为 $V_T = |dV_{BE}/dT|$, 单位为

mV/°C, 当结温波动为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 时, 发射极结正向导通电压 V_{BE} 波动为 $\pm 5V_{\text{T}}$ (mV), 这时, 如果发射极所接镇流电阻 R_{E} 的阻值适当, 则发射极电流的最大变化为其平均值的 $\pm 5\%$, 可得发射极镇流电阻^[4]为:

$$R_{\text{E}} = \frac{10V_{\text{T}}(\text{mV})}{0.1I_{\text{E0}}} \quad (3)$$

从实验数据的分析中已经得出 SiGe HBT 正向电压温度系数 V_{T} 约为 $1.5 \sim 1.9\text{mV}/^\circ\text{C}$, 而对于 Si 器件, $V_{\text{T}} = 2\text{mV}/^\circ\text{C}$, 因此在同样的结温和电流限制条件下 SiGe 器件所需的发射极镇流电阻 R_{E} 比 Si 器件要小. 由于大 R_{E} 会使器件跨导下降, 而跨导下降导致频率性能降低, 因此, SiGe 器件的频率特性优于 Si 器件.

在高频大功率晶体管的设计中, 考虑到发射极镇流电阻 R_{E} 对功率增益的影响, 在输出匹配时, 高频功率增益 G_{p} 可表示为:

$$G_{\text{p}} = \frac{f_{\text{T}}}{8\pi f^2 (r_{\text{b}} + R_{\text{E}}) C_{\text{TC}}} \quad (4)$$

其中 f_{T} 为截止频率; f 为工作频率; r_{b} 为基极电阻; R_{E} 为发射极镇流电阻; C_{TC} 为 BC 结电容.

功率附加效率 PAE 定义为:

$$\text{PAE} = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{DC}}} = \eta_{\text{c}} \left(1 - \frac{1}{G_{\text{p}}}\right) \quad (5)$$

其中 P_{out} , P_{in} 分别为放大器的输出功率和输入功率; P_{DC} 为偏置直流电源提供的直流功率; $\eta_{\text{c}} = P_{\text{out}}/P_{\text{DC}}$, 称为集电极转化效率.

通过(4), (5)式可以得出, 由于 SiGe HBT 的发射极镇流电阻 R_{E} 较 Si BJT 小, 所以其高频功率增益 G_{p} 可以做得更高. 对固态微波放大器而言, PAE 越高, 则其功率特性也越好, SiGe HBT 可以有更高的 G_{p} , 因此可以得到更高的功率附加效率 PAE.

4 结论

由在不同温度下 Si/Si_{0.85}Ge_{0.15}/Si HBT 发射结的正向 $I_{\text{BE}}-V_{\text{BE}}$ 特性曲线, 得到 V_{BE} 随温度的变化率 dV_{BE}/dT 大约在 $-1.5 \sim -1.9\text{mV}/^\circ\text{C}$, 小于 Si BJT 的 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$. 通过分析得出, 在提高器件及电路的热稳定性时, SiGe HBT 可以使用比 Si BJT 更小的镇流电阻. 同时, 通过研究 SiGe HBT 的输出特性曲线得到器件在高电压大电流下具有负阻特性, 可以有效地抑制由于热电正反馈而引起的集电极电流的增大, 从而减小器件发生击穿的可能性, 这是普通 Si BJT 所不具备的. 所以 SiGe HBT 具有更好的频率特性和更高的功率增益, 以及更高的功率附加效率, 因此, SiGe HBT 比 Si BJT 更适合用做高频功率器件.

参考文献

- [1] Liu Zhinong, Xiong Xiaoyi, Huang Wentao, et al. Polysilicon emitter double mesa microwave power SiGe HBT. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(9): 897
- [2] Liu W, Nelson S, Hill D G, et al. Current gain collapse in microwave multi-finger HBTs operated at very high power densities. IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40(11): 1917
- [3] Zhang Wanrong, Li Zhiguo, Wang Lixin, et al. Negative resistance characteristics of Si/SiGe/Si double heterojunction bipolar transistors. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1128 (in Chinese) [张万荣, 李志国, 王立新, 等. Si/SiGe/Si 双异质结晶体管 (HBT) 的负阻特性. 电子学报, 2001, 29(8): 1128]
- [4] Gao Guangbo, Selim U M, Hadis M, et al. Emitter ballasting resistor design for current handling capability of AlGaAs/GaAs power HBTs. IEEE Trans Electron Devices, 1991, 38(2): 185

Temperature Characteristics of Microwave Power SiGe HBTs*

Yang Jingwei^{1,†}, Zhang Wanrong¹, Jin Dongyue², Qiu Jianjun¹, and Gao Pan¹

(1 College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(2 Physics Department, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Temperature characteristics of SiGe HBT are studied. Experiment data show that the variation of V_{BE} with temperature of SiGe HBT is smaller than that of homo-junction silicon BJT. The needed emitter ballast resistance in SiGe HBT is thus smaller than that in Si BJT when thermal stability of transistors is improved. At the same time, the negative differential resistance characteristics of SiGe HBT is also observed at a high collector-emitter voltage and high current, which can prevent the thermal instability of power transistors effectively, and this is not the case with Si devices. Therefore, SiGe HBT is proved to be more suitable for microwave power devices.

Key words: SiGe HBT; temperature characteristics; microwave power transistor

EEACC: 2560P; 2560J

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0231-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60376033), the Beijing Municipal Trans-Century Talent Project (No. 67002013200301), and the National Key Laboratory for Analog Integrated Circuits, China

† Corresponding author. Email: jwang@emails.bjut.edu.cn

Received 11 October 2005, revised manuscript received 9 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics