

Si/ SiGe/ Si 双异质结晶体管(HBT) 的负阻特性

张万荣¹, 李志国¹, 王立新¹, 汪 东¹, 崔福现², 孙英华¹, 程尧海¹, 陈建新¹, 沈光地¹, 罗晋生³

(1. 北京工业大学电子系, 北京 100022; 2 信息产业部电子第 13 研究所, 河北石家庄 050051; 3 西安交通大学微电子研究所, 陕西西安 710049)

摘 要: 同质结硅双极晶体管在共射极状态下工作中, 在高集电极——发射极电压、大电流下, 由于热电正反馈, 容易发生热击穿, 这限制了晶体管的安全工作区域。本文报道了在在大电流下, 由于热电负反馈, 重掺杂基区 Si/ SiGe/ HBT 出现了负阻特性, 并对这一现象进行了新的解释, 认为这是由于大电流下耗散功率增加, 基区俄歇复合导致电流增益随温度增加而减小的结果。这一现象有利于改善大电流下双极晶体管的抗烧毁能力, 证明 Si/ SiGe/ HBT 适于大功率应用。

关键词: SiGe/ Si 异质结双极晶体管; 负阻; 输出特性

中图分类号: TN322.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)08-1132-03

Negative Resistance Characteristics of Si/ SiGe/ Si Double Heterojunction Bipolar Transistors

ZHANG Wan rong¹, LI Zhi guo¹, WANG Li xin¹, WANG Dong¹, Cui Fu xian², SUN Ying hua¹,
CHENG Yao hai¹, CHEN Jiar xin¹, SHEN Guang di¹, LUO Jin sheng³

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;

2. 13th Research Institute of Electronics, Ministry of Information Industry, Shijiazhuang, Hebei 050051, China;

3. Institute of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: For homojunction Si bipolar transistor operation under common emitter, because of the positive feedback of thermoelectricity, thermal breakdown occurs easily at high collector——emitter voltage and high current, this decreases the safe operation area of transistors. In this paper, due to negative feedback of thermoelectricity, negative resistance characteristics of Si/ SiGe/ Si double heterojunction bipolar transistors with heavily doped base at high currents is reported. A new interpretation to this phenomenon is given. This is resulted from Auger recombination in the base and decrease in current gain at high current as temperature increases. This phenomenon has benefit to improve anti burnout capability of bipolar transistors. The results suggest that Si/ SiGe/ HBT is suitable for high power applications.

Key words: Si/ SiGe/ Si double heterojunction bipolar transistors; negative resistance; output characteristics

1 引言

基于 SiGe HBT 技术在过去十几年里取得了飞速发展, 由于它与 Si 工艺兼容和 Si(Ge) 材料在很多方面优于 III-V 化合物材料, 如高的热导率, 价格便宜等, 使其在集成度、性能/ 价格比和大功率应用等方面是 GaAs 技术的有力竞争者, 因此倍受世界各国注意。为了充分发挥其高频优势, 一般 HBT 在大电流密度下工作。在 III-V 化合物材料 HBT 中, 当集电极电流大到一定程度时, 随集电极——发射极电压的增加, 集电极电流减少, 即出现了负微分输出电阻(NDR), 人们对这一现象进行了不同的解释^[1,2]。在硅 BJT 中, 在发生二次击穿时, 由于热和雪崩注入, 导致出现从高压小电流到低压大电流的负阻特性^[3]。这是两个完全具有不同机理的负阻现象。我们在测量 SiGe HBT 共射极输出特性曲线时, 也观察到了只有在 III-V 化合物材料 HBT 中才出现的负阻现象, 还没有见有文献报道。这

一现象对抑制像在硅 BJT 中出现的二次击穿有积极意义。根据 SiGe HBT 的特点, 我们对产生这一现象的机理进行了新探讨。

2 实验

2.1 SiGe HBT 的器件结构

SiGe HBT 的器件结构如图 1 所示。由于 HBT 不必利用发射区和基区杂质浓度比来保证注入比(发射效率), 基区采用 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的重掺杂^[4], 以降低基区电阻, 发射区选用 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以降低发射结电容, 集电区的低掺杂 ($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 主要是为了减少集电结电容和保证一定的集电极基极击穿电压 BV_{cb0} , 大的击穿电压, 是 HBT 具有大的功率输出的前提。为减小基区电阻, 基区宽度选得较大(100nm), 为使这个宽度不超过应变 Si_{1-x}Ge_x 层临界厚度和经受住制造工艺的热过程, x 取小些, 这里取 $x = 0.15$ 。

2.2 实验测试系统

为了准确地得到 Si/SiGe/Si HBT 特性曲线,减少人为因素,本实验设计并建立了全自动测试系统.该系统用 PC-586 计算机作主控器,以国际通用接口(HPIB)IEEE 488 总线为数据通讯基础,用 HPVEE 软件编制了程控程序,用于控制 HP6625A 双路电源、HP6031A 电源,HP3457A 万用表,把测得的数据经分析处理后显示在屏幕上并生成数据文件.用上述测量系统可以在较短的时间内测量出 HBT 的电特性,包括 EB 结和 CB 结正向、反向特性,输出特性曲线,从而确定结击穿电压、直流电流增益 $h_{FE}(I_c/I_b)$ 、小信号电流增益 $\beta(\Delta I_c/\Delta I_b)$.

3 测试结果与讨论

我们对上述结构的 Si/SiGe/Si HBT 进行了电学测试,发

现在大电流下都有程度不同的负阻现象,这说明负阻现象是 Si/SiGe/Si HBT 的固有特性,不是偶然现象.典型的具有负阻现象的 Si/SiGe/Si HBT 共射极输出特性曲线如图 2 所示,在线性区,在 $V_{ce} = 6V$ 时,其直流电流增益 $h_{FE}(I_c/I_b) = 2(I_c = 0.17864mA \text{ 时}), 5(I_c = 0.9272mA \text{ 时}), 7(I_c = 1.994mA \text{ 时}), 9.88(I_c = 5.0396mA \text{ 时}), 15(I_c = 12.7mA \text{ 时}), 13.46(I_c = 30.48mA \text{ 时}), 13.237(I_c = 39.7mA \text{ 时})$. 小信号电流增益 $\beta(\Delta I_c/\Delta I_b) = 13.8(I_b = 0.4 - 0.5mA), 19(I_b = 1.4 - 1.5mA), 15.2(I_b = 2.4 - 2.5mA), 12.2(I_b = 2.9 - 3.0mA)$. 从图 2 可以看出,在 $I_b \geq 0.9mA$ 就开始出现负阻特性,而且 I_b 越大(I_c 也越大),负阻现象越显著.我们认为这是由于 I_c 较大时,器件自加热,使器件结温增加(高于环境温度),重掺杂基区俄歇复合增加,少子寿命减少,基区复合增加,使电流增益随温度增加而减小的结果.

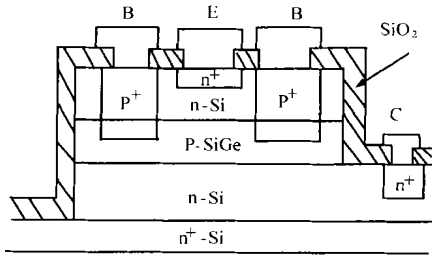


图 1 实验用 Si/SiGe/Si HBT 典型器件结构

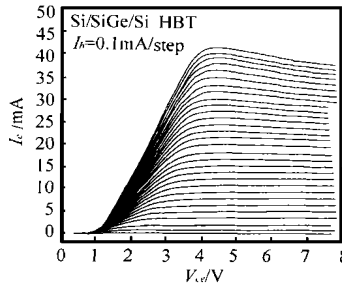


图 2 基区重掺杂的 Si/SiGe/Si HBT 的共射极输出特性曲线(大电流下具有负阻现象)

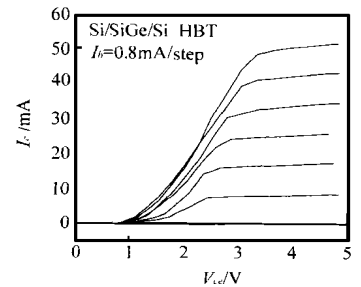


图 3 基区轻掺杂的 Si/SiGe/Si HBT 的共射极输出特性曲线(没有负阻现象)

在 Si/SiGe/Si HBT 中, BE 结存在价带能差,抑制了基区少子向发射区的反注入,大大提高了注入效率.在大电流下,基区复合电流的大小决定了电流增益,在重掺杂基区双异质结 HBT 中,由于重掺杂禁带变窄效应和异质结势垒效应的存在更是如此^[4-7].在这种条件下,设基区输运系数为 α ,则

$$\frac{I_c}{I_b} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (2)$$

对均匀基区晶体管,基区输运系数为 α 可表示为^[8]

$$\alpha = \sec h \left(\frac{W_b}{L_{nb}} \right) \quad (3)$$

式中 W_b 是基区宽度, L_{nb} 为少子扩散长度.在基区宽度 W_b 很小时,式(3)可近似为

$$\alpha = 1 - \frac{W_b^2}{2L_{nb}^2} = 1 - \frac{W_b^2}{2D_{nb}\tau_{nb}} \quad (4)$$

式中 D_{nb} 是基区少子扩散系数, τ_{nb} 为少子寿命.

D_{nb} 可由下式得到

$$D_{nb}(T) = (kT/q) \mu_{nb} \quad (5)$$

μ_{nb} 为少子的迁移率.

又迁移率^[9,10] $\mu_{nb} \propto T^{-m}$, m 在 -1 和 0 之间,所以

$$D_{nb}(T) \propto T^n, \quad n = 0 - 1 \quad (6)$$

在基区重掺杂时,俄歇复合决定了少子寿命^[10]:

$$\tau_{nb}(T) = \tau_{Auger}(T) \propto T^{-k}, \quad k = 1.18 \quad (7)$$

联合式(6)和式(7)可以得到

$$D_{nb}(T) \tau_{nb}(T) \propto T^{-r}, \quad r = 1.18 - 0.18 \quad (8)$$

因此,对式(4)微分可得

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T} < 0 \quad (9)$$

进而式(2)

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \frac{\partial \alpha}{\partial T} < 0 \quad (10)$$

因此在大电流下,随 V_{ce} 的增加,功耗增加,结温增加,电流增益下降,出现负阻现象.

相反,如果基区掺杂浓度不够高,SHR 复合决定少子寿命^[10],则式(7)变成

$$\tau_{nb}(T) = \tau_{SHR}(T) \propto T^{1.77} \quad (7a)$$

式(8)变成

$$D_{nb}(T) \tau_{nb}(T) \propto T^r, \quad r = 1.77 - 2.77 \quad (8a)$$

式(9)变成

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T} > 0 \quad (9a)$$

式(10)变成

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \frac{\partial \alpha}{\partial T} > 0 \quad (10a)$$

因此在大电流下,随 V_{ce} 的增加,功耗增加,结温增加,电流增益也增加,没有负阻现象.例如对同样结构和尺寸但基区采用 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂 Si/SiGe HBT,其输出特性曲线如图 3 所示,可以看出,即使在 $I_c = 50mA$ 也没有出现负阻现象.我们认为在基区 SHR 复合起主要作用,决定了少子寿命,少子寿

命随温度的增加而增加,使基区输运系数 α 随温度的增加而增加,进而电流增益随温度的增加也增加,不出现负阻现象.

4 结论和小结

在大电流下,重掺杂基区 Si/SiGe/Si HBT 共射极输出特性曲线出现负微分电阻现象(NDR),这是由于重掺杂俄歇复合决定了少子寿命,大电流下随 V_{ce} 的增加,温度增加,基区输运系数减少,使电流增益随温度的增加而减少,出现负阻现象.

参考文献:

- [1] Tiwari S, et al. Transport and Related Properties of (Ga, Al) As/ GaAs Double Heterostructure Bipolar Junction Transistors [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1987, 34(2): 185- 197.
- [2] Liu W, et al. Current Gain Collapse in Microwave Multifinger Heterojunction Bipolar Transistors Operated at very High Power Densities [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1987, 40(11): 1917- 1927.
- [3] 武世香. 双极型和场效应晶体管 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995: 168.
- [4] 张万荣, 李志国, 罗晋生, 陈建新, 沈光地. 应变 P 型 SiGe 层中载流子冻析 [J]. 电子学报, 1998, 26(11): 51- 54.
- [5] 张万荣, 曾峥, 罗晋生. Si/SiGe/Si 双异质结晶体管的异质结势垒效应 [J]. 电子学报, 1996, 24(11): 43- 47.
- [6] 吴文刚, 张万荣, 罗晋生. P 型 SiGe 应变层中重掺杂禁带窄变的计算 [J]. 电子科学学刊, 1996, 18(6): 638- 643.

- [7] Kim S I, et al. The Effect of Parasitic Potential Barrier on the Neutral Base Recombination Current of Si/SiGe/Si HBT [J]. Solid State Electronics, 1994, 37(3): 517- 519.
- [8] 武世香. 双极型和场效应晶体管 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995: 79.
- [9] Momose H S, et al. Analysis of the Temperature Dependence of Hot carrier induced Degradation in Bipolar Transistors for Bi CMOS [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(6): 978- 987.
- [10] Klaassen D M B. A Unified Mobility Model for Devices Simulation II. Temperature dependence of Carrier Mobility and Lifetime [J]. Solid State Electronics, 1992, 35(7): 961- 967.

作者简介:



张万荣 男. 1964 年 1 月生于河北省. 中国

电子学会高级会员, 副教授, 硕士生导师, 博士. 现在北京工业大学电子信息与控制工程学院工作. 1997 年入选北京市科技新星计划, 1999 年入选北京市优秀跨世纪人才工程. 已在国内外学术刊物和会议上发表论文 46 余篇, 其中第一作者 29 篇, 已知被 SCI 收录 2 篇, EI 收录 10 篇, ISTP 收录 4 篇, CA 收录 9 篇.

李志国 男. 1941 年生于北京. 毕业于北京大学, 现为北京工业大学电子系可靠性室主任、教授, 博士生导师. 长期从事半导体器件可靠性教学和科研工作. 获得省部级奖励科研项目多项. 已在国内外学术刊物和会议上发表论文几十篇.