

# Ge 组分分布对基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT 温度特性的影响\*

张瑜洁<sup>†</sup> 张万荣 金冬月 陈亮 付强 郭振杰 邢光辉 路志义

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2012 年 8 月 1 日收到; 2012 年 8 月 31 日收到修改稿)

众所周知, 双极型晶体管的设计主要是基区的设计. 一般而言, 基区的杂质分布是非均匀的. 本文首先研究了非均匀的杂质高斯分布对器件温度分布、增益和截止频率的温度特性的影响, 发现增益和截止频率具有正温度系数, 体内温度较高. 随后研究了基区 Ge 组分分布对这些器件参数的影响. 均匀 Ge 组分分布和梯形 Ge 组分分布的 SiGe 异质结双极型晶体管增益和截止频率具有负温度系数, 具有较好的体内温度分布. 进一步的研究表明, 具有梯形 Ge 组分分布的 SiGe 异质结双极型晶体管, 由于 Ge 组分缓变引入了少子加速电场, 不但使它的增益和截止频率具有较高的值, 而且保持了较弱的温度敏感性, 在增益、特征频率大小及其温度敏感性、体内温度分布达到了很好的折中.

**关键词:** SiGe 异质结双极型晶体管, 温度特性, 基区杂质分布, Ge 组分分布

**PACS:** 44.10.+i, 72.20.Pa, 85.30.-z

**DOI:** 10.7498/aps.62.034401

## 1 引言

SiGe 异质结双极型晶体管 (HBT), 在温度特性、直流特性和频率特性方面都具有比 Si 双极型晶体管 (BJT) 优越的性能. 对于双极型晶体管的设计主要是基区的设计, 改变基区杂质分布会影响双极型晶体管的热电特性, 改变基区 Ge 组分分布也会影响 SiGe HBT 的热电特性. 目前, 很多学者研究了基区杂质分布 (均匀的、高斯形式的、指数形式的分布) 对器件电学特性的影响<sup>[1-2]</sup>, 或是在基区杂质为均匀分布的情况下研究 Ge 组分对器件电学特性的影响<sup>[3,4]</sup>, 但是很少有学者研究 Ge 组分分布对基区杂质分布不均匀的 SiGe HBT 电学特性的影响, 几乎没有对器件温度特性影响的研究. 而 SiGe HBT 温度特性也是极其重要的, 比如在大功率应用时 (器件自热), 不同的温度环境工作, 人们希望器件特性不发生漂移, 特性参数热稳定<sup>[5-8]</sup>.

实际的双极型晶体管的基区杂质分布一般来说是不均匀的, 比如基区本身掺杂就不均匀, 即使

原本掺杂均匀, 在后续的制作过程中, 热过程也可能导致基区杂质外扩, 最终使杂质分布不均匀. 为了减少发射结和集电结的电容和隧穿泄漏电流, 改善两结的击穿电压, 基区杂质浓度在两结处应保持较低的值. 基区杂质的非均匀分布, 因杂质浓度向发射极侧的减小产生了少子阻滞电场, 杂质浓度向集电极侧的减小产生了少子加速电场, 而阻滞电场会对器件产生一些消极的影响. 因此, 对于基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT, 将基区 Ge 组分设计成先缓变再恒定的梯形分布, 可以使能隙缓变引起的自建电场部分地补偿杂质减小而产生的阻滞电场, 以减弱其对器件的消极影响.

本文基于 SILVACO 软件, 用高斯分布来表征基区杂质的不均匀性, 研究了杂质不同高斯分布对器件温度分布和电学特性的影响, 在选择了峰值浓度在基区中间位置的高斯分布的基础上, 研究 Ge 组分分布对基区杂质高斯分布的 SiGe HBT 的热电特性的影响, 发现 Ge 组分梯形分布的 SiGe HBT 具有较好的温度分布, 较高的增益、截止频率及其弱的温度敏感性.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60776051, 61006059, 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: zhangyujie.2000@yahoo.com.cn

## 2 器件模型

使用 SILVACO 软件对器件进行二维建模、模拟仿真. SILVACO 软件是一个集成半导体工艺模拟、器件和电路仿真等功能的大型综合商业软件, 包括 ATHENA, ATLAS, DEVEDIT, TONYPLOT 等模块. 本文通过 DEVEDIT 对器件进行建模, 使用 ATLAS 运行源代码. 由于双极型晶体管的横向结构具有对称性, 我们只选取器件的一半来建模, 器件模型如图 1 所示. 发射极条宽为  $1.6 \mu\text{m}$ , 基区宽度取  $50 \text{ nm}$ , 对于基区 Ge 分布的选取, 当研究基区杂质分布对器件特性的影响时, Ge 含量为 0, 即为 Si BJT; 当研究 Ge 分布对基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT 特性的影响时, 采用两种 Ge 分布: 均匀分布时, Ge 组分为 0.16; 梯形分布时, Ge 先缓变后恒定, 但保持总 Ge 含量不变. 在使用 ATLAS 模拟器件热电特性时, 加入的物理模型有: 能带变窄模型 (bgn)、SRH 浓度依赖的寿命模型 (consrh)、俄歇复合模型 (auger) 和 Arora 模型 (arora), 同时还加入了 SRH 复合模型, 以及与温度和浓度相关的迁移率模型 (analytic) 和俄歇复合模型 (hnsaug).

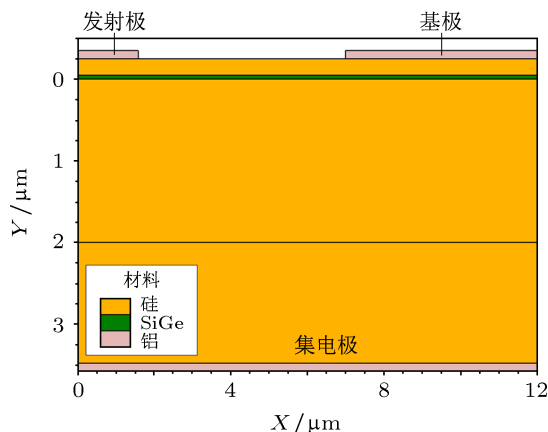


图 1 SILVACO/DEVEDIT 建立的器件模型

## 3 基区杂质高斯分布对器件特性的影响

本实验中, 器件选取双极型晶体管, 并且基区杂质采用不同的高斯分布形式, 即杂质峰值浓度在基区的位置不同, 如图 2 所示. 杂质峰值浓度在中性基区的位置从发射极侧到集电极侧分别为 0, 10, 20, 30, 40 nm, 这五种高斯分布在基区中的浓度分布  $N_B(x)$  可以用下式表示 [9,10]:

$$N_B(x) = \begin{cases} N_0 \exp \left[ \ln \left( \frac{N_P}{N_0} \right) \left( \frac{x}{x_T} \right)^2 \right], & (0 \leq x \leq x_T), \\ N_P & (x = x_T), \\ N_P \exp \left[ -\ln \left( \frac{N_P}{N_{W_b}} \right) \left( \frac{x - x_T}{W_b - x_T} \right)^2 \right], & (x_T \leq x \leq W_b), \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $N_0$  为中性基区发射极侧的杂质浓度,  $N_P$  为杂质峰值浓度,  $N_{W_b}$  为中性基区集电极侧的杂质浓度,  $x_T$  为杂质峰值浓度在中性基区的位置,  $W_b$  为中性基区宽度. 本实验中, 杂质峰值浓度位置为  $x_T/W_b = 0$  的杂质分布的物理量为  $N_0 = N_P = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{W_b} = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; 其他杂质分布的物理量为  $N_0 = N_{W_b} = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_P = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

### 3.1 温度分布

在相同的偏置条件, 即  $I_b = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_{CE} = 3 \text{ V}$  的情况下, 采用 SILVACO 中基于物理的器件模拟模块 ATLAS 对器件温度分布进行了模拟. 图 3 是峰值浓度在基区不同位置的杂质高斯分布对器件温度特性的影响. 可以看到, 随着杂质峰值浓度的位置从基区发射极侧向集电极侧移动, 器件的最高

结温和整体温度都有所下降, 器件温度分布的非均匀性得到了一定程度的改善.

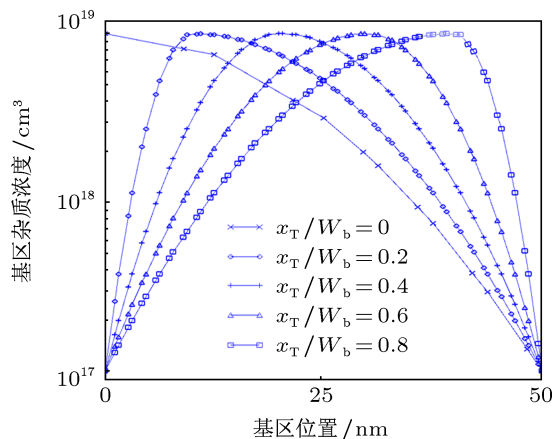


图 2 基区杂质分布图

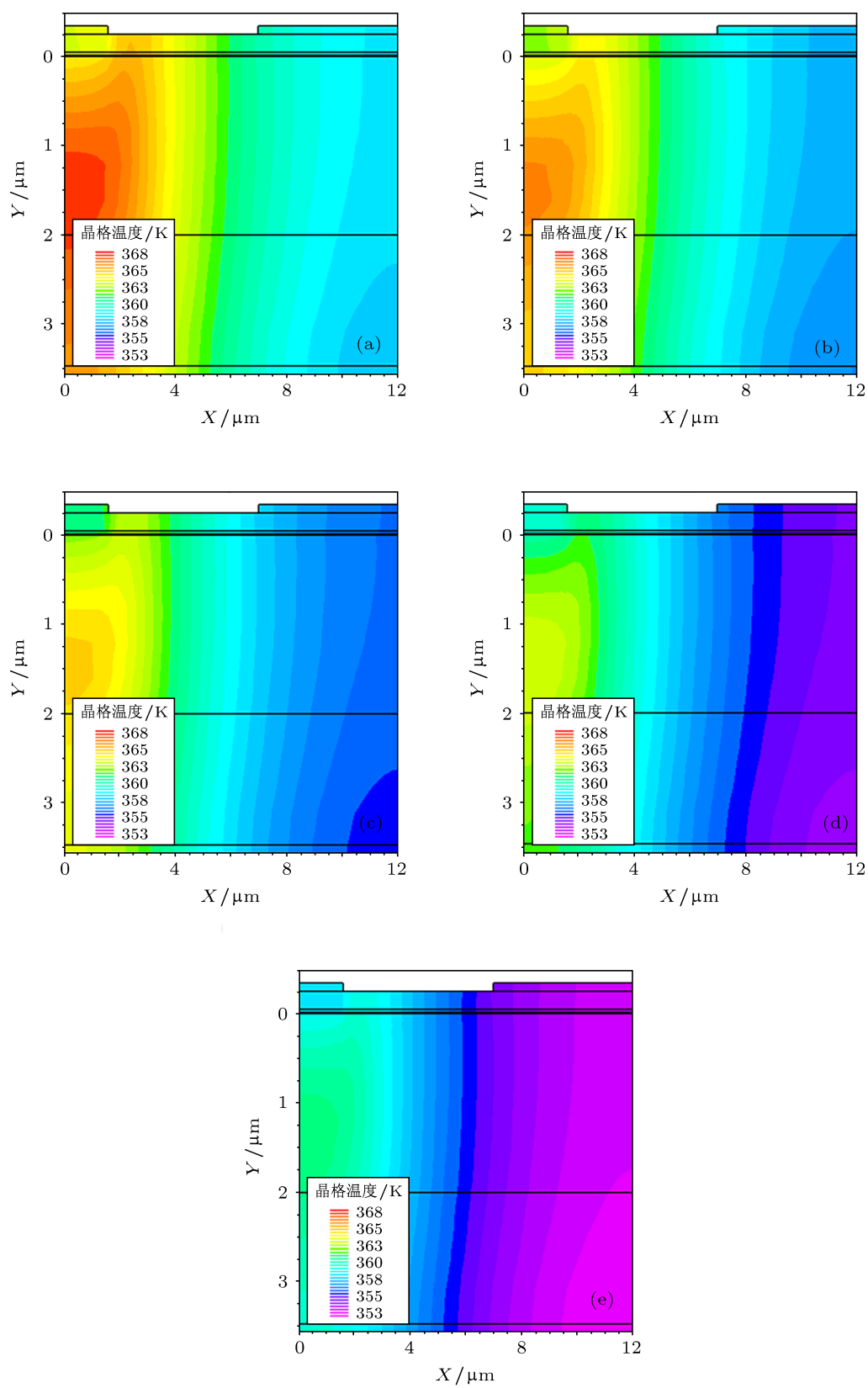


图3 杂质峰值浓度在中性基区不同位置的器件晶格温度

### 3.2 增益的温度特性

图 4 是基区不同杂质高斯分布的器件直流增益  $\beta$  对温度的依赖关系. 从图中可以看到, 对一定杂质分布 (即一定的杂质峰值浓度的位置) 的双极型晶体管, 随着温度的升高, 增益是增大的, 说明器件增益具有正温度系数, 这对器件的热稳定是不利的. 在相同的温度下, 随着杂质峰值浓度从中性基区的发射极侧向集电极侧移动, 器件的直流增益呈下降趋势, 这是因为基区杂质浓度向发射极侧的减小, 产生了少子减速电场, 这个电场会对器件增益产生不利影响. 随着杂质峰值浓度在中性基区的位置向集电极侧移动, 对少子起减速作用的电场范围扩大, 使得载流子的输运系数减小, 从而导致器件增益降低. 另外, 器件增益对温度的依赖性也有所减弱.

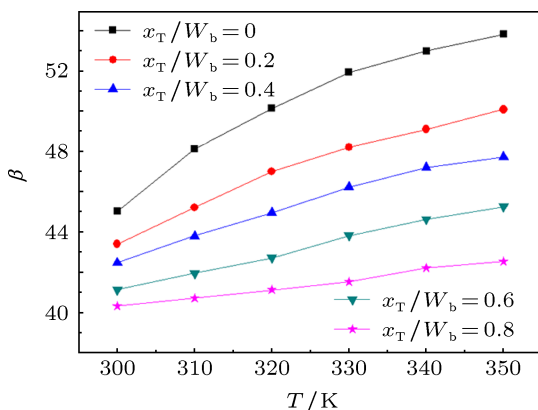


图 4 基区不同杂质高斯分布的器件增益与温度的关系

### 3.3 频率的温度特性

图 5 是基区不同杂质高斯分布的器件特征频率  $f_T$  随温度的变化关系. 对一定的杂质分布, 随着温度的升高, 器件特征频率增大, 说明器件内部存在热电正反馈. 在相同的温度下, 随着杂质峰值浓度的位置向集电极侧靠近, 器件的特征频率逐渐降低, 这是由于中性基区中的阻滞电场阻碍了载流子的运动, 杂质峰值浓度的位置越靠近集电极侧, 少子加速电场范围越小, 从而使基区渡越时间增大, 导致了器件特征频率的减小. 从图中还看到, 特征频率随温度的变化程度相差不大.

通过上述对基区杂质不同高斯分布的器件热电特性的研究和分析, 综合考虑器件的一些参数, 我们在下面的实验中将基区杂质分布选为杂质峰值浓度在中性基区中间位置的高斯分布, 并在此基

础上, 研究 Ge 组分分布对基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT 特性的影响.

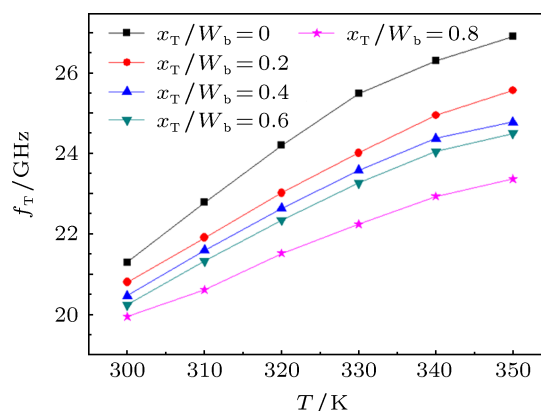


图 5 基区不同杂质高斯分布的器件特征频率与温度的关系

## 4 Ge 分布对器件热性能的影响

在本节中, 基区杂质分布保持不变: 即基区杂质为高斯分布, 峰值浓度选在中性基区的中间位置. 研究 Ge 组分分布对器件温度分布、电流增益和截止频率的温度特性的影响.

由于杂质缓变在靠近基区发射极侧产生少子减速电场, 所以考虑将 SiGe HBT 的基区靠近发射极侧的 Ge 组分设计为缓变分布, 那么就可以利用能隙缓变引起的自建电场来补偿因杂质浓度向发射极侧减小而产生的减速电场. 本实验中, 为了体现引入 Ge 以及引入 Ge 梯度给器件特性带来的影响, 我们将 Ge 梯形分布 (先线性缓变再均匀分布) 和 Ge 均匀分布的 SiGe HBTs 与 Si BJT 的一些器件参数做比较, Ge 分布情况如图 6 所示. Ge 组分梯形分布和均匀分布的总量保持一致, 其参数设为: 中性基区发射极侧的 Ge 含量为 0.01, 中性基区集电极侧的 Ge 含量为 0.21, 而对于缓变到均匀的转折点在基区的位置  $Y_T/W_b$  一般不选择太靠近发射极侧或太靠近集电极侧, 所以本实验将转折点选择在中性基区的中间位置.

### 4.1 温度分布

在偏置为  $I_c = 2 \text{ mA}$ ,  $V_{CE} = 3 \text{ V}$  的条件下, Ge 组分均匀分布和梯形分布的 SiGe HBTs 以及 Si BJT 的温度分布, 如图 7 所示. 可以看到, Si BJT 的体内温度较高, 这是由于双极型晶体管发射区重掺杂, 致使电流增益随温度的升高而增加, 加剧了热电正反馈. 引入 Ge 以后, 器件的峰值温度以及体内温度

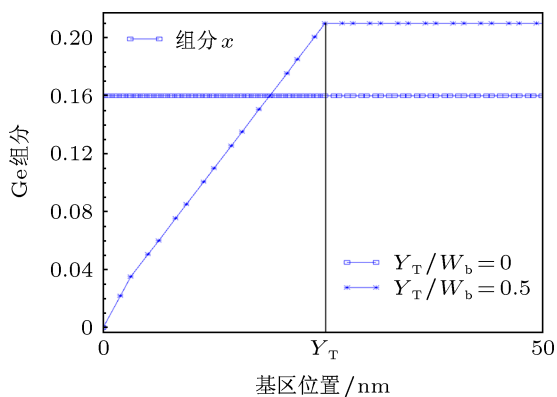


图6 基区 Ge 组分分布

都明显降低. 利用 SILVACO 中的 TONYPLOT 模块提取出器件发射极下的体内温度分布, 如图 8 所示. 可以看到, Ge 组分均匀分布和梯形分布的器件最

高结温比 Si BJT 分别降低了大约 25 和 18 K. 与 Si BJT 相比, SiGe HBT 具有更优异的热性能.

### 4.2 增益的温度特性

图 9 是两种 Ge 组分分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 的直流增益  $\beta$  与温度的依赖关系. 可以看到, 双极型晶体管的增益具有正温度系数, 而 SiGe HBT 的电流增益却具有负的温度系数, 其体内的热电负反馈使 SiGe HBT 的增益随温度的升高而降低, 这对器件热稳定性是很有益处的. 同时, 由于 Ge 的引入, 使器件增益大幅提高. 引入 Ge 梯度, 即 Ge 梯形分布, 使器件增益进一步提高, 但是器件增益随温度的变化并没有变得剧烈, 说明 Ge 组分梯形分布的器件不仅提高了增益, 增益也保持了弱的温度敏感性.

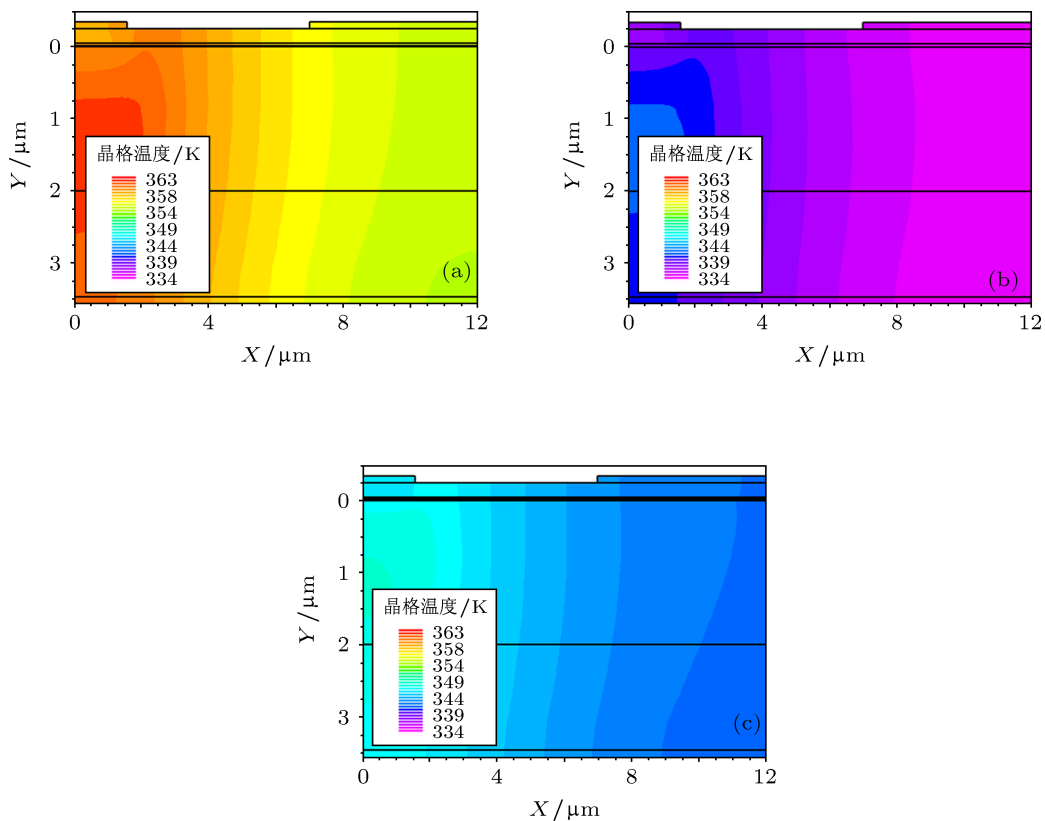


图7 Ge 组分均匀分布和梯形分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 的晶格温度分布 (a) Ge 含量为 0; (b) Ge 均匀分布; (c) Ge 梯形分布

### 4.3 频率的温度特性

图 10 是两种 Ge 组分分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 的特征频率  $f_T$  与温度的关系曲线. 同样, 双极性晶体管的特征频率也具有正温度系数, 而 SiGe

HBT 的特征频率具有负温度系数, 使  $f_T$  随温度的升高而降低. 与 Si BJT 相比, SiGe HBT 的特征频率值有了很大的提高, 并且特征频率具有较弱的温度敏感性. 在这两种 Ge 分布的 SiGe HBTs 中, 对于 Ge 梯形分布的 SiGe HBT, Ge 组分线性缓变的部分

在中性基区发射极侧产生了一个由能带缓变引起的加速少子运动的自建电场, 这个电场部分补偿了杂质浓度减小所引起的阻滞电场, 缩短了少子的基区渡越时间, 使器件特征频率进一步提高。

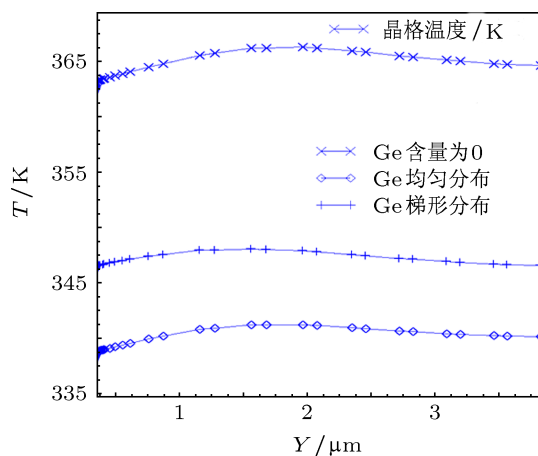


图8 Ge 组分均匀分布和梯形分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 体内的温度分布

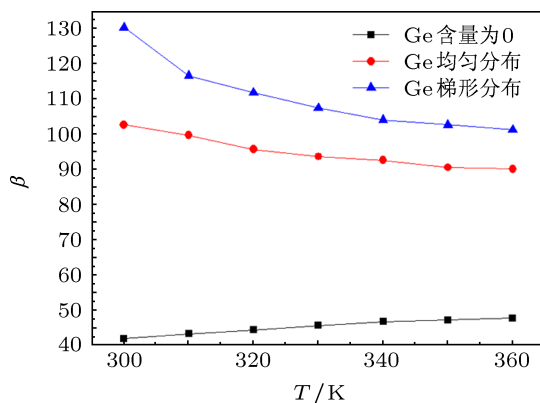


图9 Ge 组分均匀分布和梯形分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 的直流增益与温度的关系

通过分析我们发现, 相比于 Si BJT, SiGe HBT 由于 Ge 的引入, 器件的温度特性得到很大改善, 并且使器件的增益和特征频率的值大幅提高, 而且也增强了电学特性的热稳定性. 而在 SiGe HBT 中引入 Ge 梯度 (Ge 组分梯形分布), 可以在保证器件具

有好的温度特性的同时, 使器件增益和特征频率的值得到进一步的提高。

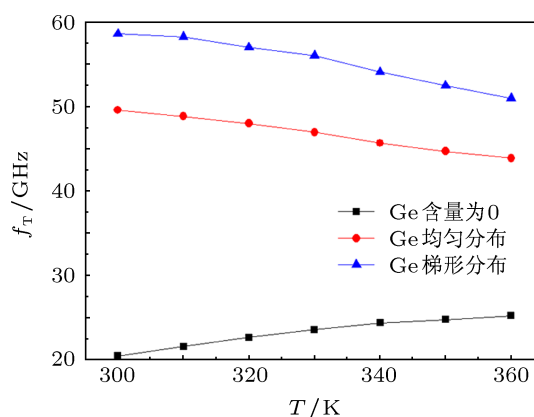


图10 Ge 组分均匀分布和梯形分布的 SiGe HBTs 及 Si BJT 的特征频率与温度的关系

## 5 结论

在实际的器件中, 基区的杂质一般不会是均匀分布的, 本文用高斯分布来表征杂质的不均匀性, 研究了峰值浓度在基区不同位置的杂质高斯分布对双极型晶体管温度分布、直流增益、特征频率的温度特性的影响. 之后, 在 SiGe HBT 中, 基区杂质选取峰值浓度在中性基区中间位置的高斯分布, 研究了 Ge 组分均匀分布和梯形分布对基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT 的温度分布、增益和截止频率的温度特性的影响. 结果表明, BJT 的体内温度较高, 增益和特征频率的值较低且具有正温度系数, 而引入 Ge 以后, 器件的电流增益和特征频率值大幅提高且具有负温度系数, 而且器件体内温度大大降低, 具有更好的热稳定性. 其中, 具有 Ge 梯形分布的基区杂质非均匀分布的 SiGe HBT, 由于 Ge 的缓变引入的少子加速电场部分补偿了由于杂质缓变所引起的阻滞电场, 使器件在提高了增益和特征频率值的同时保证了电学特性的热稳定性及器件的温度特性, 在热电特性方面达到了很好的折中. 这些结果对 SiGe HBT 特性的进一步研究有一定的参考价值。

[1] Rahmani A, Seryasat O, Hosseini S E 2010 *International Conference on Software Technology and Engineering(ICSTE)* Kuala Lumpur, Malaysia, October 3-5, 2010 p404  
 [2] Ma L, Gao Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 303  
 [3] Zhao X, Zhang W R, Jin D Y, Fu Q, Chen L, Xie H Y, Zhang Y J 2012

*Acta Phys. Sin.* **61** 134401 (in Chinese) [赵昕, 张万荣, 金冬月, 付强, 陈亮, 谢红云, 张瑜洁 2012 物理学报 **61** 134401]  
 [4] Xiao Y, Zhang W R, Jin D Y, Chen L, Wang R Q, Xie H Y 2011 *Chin. Phys. Sin.* **60** 044402-1 (in Chinese) [肖盈, 张万荣, 金冬月, 陈亮, 王任卿, 谢红云 2011 物理学报 **60** 044402-1]

- [5] 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]
- [6] Chen L, Zhang W R, Jin D Y, Xie H Y, Xiao Y, Wang R Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 018105-1
- [7] Zhang W R, Yang J W, Liu H J 2004 *International Conference on Microwave and Milli-wave Technology (ICMMRT)* Beijing, China, 2004 p594
- [8] Chen L, Zhang W R, Jin D Y, Xie H Y, Xiao Y, Wang R Q, Ding C B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078501-1 (in Chinese) [陈亮, 张万荣, 金冬月, 谢红云, 肖盈, 王任卿, 丁春宝 2011 物理学报 **60** 078501-1]
- [9] Kunihiro S 1991 *IEEE Transactions on Electron Devices* **38** 2128
- [10] Rabbi F, Arafat Y, Ziaur Rahman Khan M 2011 *International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)* Kuala Lumpur, Malaysia, April 25–27 2011 p54

## Effects of Ge profile on thermal characteristics of SiGe heterojunction bipolar transistor with non-uniform doping profile in base region\*

Zhang Yu-Jie<sup>†</sup> Zhang Wan-Rong Jin Dong-Yue Chen Liang Fu Qiang  
Guo Zhen-Jie Xing Guang-Hui Lu Zhi-Yi

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

(Received 1 August 2012; revised manuscript received 31 August 2012)

### Abstract

As is well known, base region is the design focus of bipolar junction transistor (BJT). Generally, the doping distribution in base is non-uniform. In this paper, the effects of different Gaussian dopings in the base on bulk temperature distribution, temperature dependences of current gain and cut-off frequency are first studied. It is found that current gain and cut-off frequency of BJT have positive temperature coefficients, and the temperature in bulk is high. Then, the effect of Ge composition distribution on these device parameters is investigated. It is found that the SiGe heterojunction bipolar transistors (HBTs) with box Ge composition distribution and trapezoidal Ge composition distribution have negative temperature coefficients of current gain and cut-off frequency, and have good bulk temperature distributions. Furthermore, the SiGe HBT with trapezoidal Ge profile has higher current gain and cut-off frequency, and its temperature insensitivity is kept. The good trade-off is made among the magnitudes of current gain and cut-off frequency, temperature sensitivity and bulk temperature distribution.

**Keywords:** SiGe heterojunction bipolar transistor, thermal characteristic, base doping, Ge-profile

**PACS:** 44.10.+i, 72.20.Pa, 85.30.-z

**DOI:** 10.7498/aps.62.034401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60776051, 61006059, 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: zhangyujie.2000@yahoo.com.cn