

基区 Ge 组分分布对 SiGe HBTs 热学特性的影响*

赵昕[†] 张万荣 金冬月 付强 陈亮 谢红云 张瑜洁

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2011 年 11 月 22 日收到; 2011 年 12 月 7 日收到修改稿)

基区 Ge 组分的加入可以改善 SiGe HBT 的直流特性、频率特性和噪声特性, 但 Ge 组分及其分布对 HBT 热学特性的影响报道还很少. 本文利用 SILVACO 半导体器件仿真工具, 建立了多指 SiGe HBT 模型, 对基区具有不同 Ge 组分梯度结构的 SiGe HBTs 的热学特性和电学特性的热稳定性进行了研究. 研究发现, 在 Ge 组分总量一定的条件下, 随着 Ge 组分梯度的增大, 器件的特征频率明显提高, 增益 β 和特征频率 f_T 随温度变化变弱, 器件温度分布的均匀性变好, 但增益变小; 而基区均匀 Ge 组分 (Ge 组分梯度为零) 的 HBT 的增益较大, 但随温度的变化较大, 器件温度分布的均匀性也较差. 在此基础上, 将基区 Ge 组分均匀分布和 Ge 组分缓变分布相结合, 提出了兼顾器件热学特性、增益特性和频率特性的新型基区 Ge 组分分布 - 分段分布结构. 结果表明, 相比于基区 Ge 组分均匀分布的器件, 新器件温度明显降低; β 和 f_T 保持了较高的值, 且随温度的变化也较小, 显示了新结构器件的优越性. 这些结果对 HBT 的热学设计具有重要的参考意义, 是对 SiGe HBT 性能研究的一个补充.

关键词: SiGe 异质结双极晶体管 (HBT), 热学特性, Ge 组分分布, SILVACO

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

1 引言

近年来随着无线和有线通讯技术的迅速发展, SiGe 异质结双极晶体管 (heterojunction bipolar transistor, HBT) 由于具有开启电压低、电流处理能力强、噪声低、输出电阻大、频率特性好、增益高等优点, 被广泛应用于通信, 雷达, 电子计算机, 自动控制装置, 电子仪器, 家用电器等领域^[1,2]. 这主要得益于 SiGe HBT 在基区引入 Ge, 形成了窄带隙的 SiGe 基区, 晶体管的电流增益不再像 Si BJT 那样只能通过发射区的高掺杂和基区的低掺杂来实现, 而是可以通过调节基区 Ge 组分来获得. 增加基区浓度, 可减少基极电阻, 减少基区宽度, 反而有利于提高特征频率、最大振荡频率和减少噪声系数. 基区 Ge 组分的缓变, 还可以引入少子加速电场, 减少渡越时间, 提高特征频率 f_T . 因此, 文献上, 基区 Ge 组分及其分布对 HBT 直流特性、频率特性和噪声特性的影响成为研究重点和热点^[3], 但

对 HBT 热学特性、温度特性的研究很匮乏.

功率 HBT 通常采用多个子晶体管单元并联构成, 即采用多 (发射极) 指结构. 当多指 HBT 在大功率下工作时, 发射极指的自加热效应将使发射极指上的温度升高, 而发射极指的热电正反馈将使得温度较高的发射极指传导更多的电流, 发射极指电流的增大将继续增加发射极指温度, 造成器件温度分布更加不均匀, 可能形成热斑, 最终造成器件烧毁^[4,5]. 因此, 各指上的温度分布也是人们所关心的, 人们总希望各指上的温度分布均匀, 电流分布均匀. 近年来, 为了改善 SiGe HBT 的热学特性, 国内外学者提出了诸多减轻热效应的方法^[6,7], 比如非均匀指长设计、非均匀指间距设计、非均匀镇流电阻设计等等, 但这些都是对器件的横向参数设计. 对于器件纵向结构参数, 特别是能带工程 (Ge 组分分布) 对器件热学特性改善的研究却几乎为零.

本文基于商用 SILVACO 半导体器件仿真工具, 分析了基区不同 Ge 组分分布对 SiGe HBT 热学特性的影响. 结果表明, 随着基区 Ge 组分梯度的增大,

* 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)、北京市教委科技发展计划 (批准号: KM200710005015, KM200910005001)、北京市优秀跨世纪人才基金 (批准号: 67002013200301) 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.

[†] E-mail: zhaox0314@sohu.com

器件温度分布均匀性变好, f_T 变大, 温度对 f_T 的影响减弱; 而且随着基区发射结侧 Ge 组分含量 X_0 的增大, 器件增益 β 变大, 温度对 β 的影响增大, 热学特性变差. 在此基础上将基区 Ge 组分均匀分布和基区 Ge 组分缓变分布相结合, 提出可以兼顾器件热学特性和电学参数热稳定性的新型基区 Ge 组分分段分布结构. 借助 SILVACO 半导体器件仿真验证表明, 相比于传统均匀 Ge 组分 SiGe HBT, 新型 Ge 组分分段结构的 SiGe HBT 温度明显降低. 并且, 随着温度升高, 器件的 β 和 f_T 变化也较为缓慢. 这表明, 具有新型基区 Ge 组分分布分段结构的 SiGe HBT 除了具有较好的热学特性外, 电学特性也相对稳定.

2 SiGe HBT 器件结构和建模

基于常见的 SiGe HBT 的基本参数, 本文采用 SILVACO/ATHENA 工艺模拟模块建立 SiGe HBT 二维器件模型. 图 1 为器件的一个单元的结构参数. 图 2 是本文建立的多指 SiGe HBT 器件模型. 利用 SILVACO/ATLAS 模块进行仿真, 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, 浓度和温度依赖迁移率模型 analytic, 能带变窄模型 bgn, 参数受温度影响模型 selb, 依赖于温度的俄歇复合模型 klaaug, 温度和浓度系数俄歇复合模型 hnsaug. 计算模型采用 Block Newton 迭代法, 考虑到晶格加热时的扩散漂移, 实现热电反馈.

Si 发射极	12 nm
$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	5 nm
$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区	50 nm $N_b = 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	15 nm
Si 缓冲层	5 nm
N^- 集电区	3.48 μm $N_c = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
N^+ 衬底	$N_s = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

图 1 单元 SiGe HBT 结构参数示意图

3 基区 Ge 组分梯度对 SiGe HBT 特性的影响

3.1 Ge 组分分布对温度分布的影响

在本实验中, 为了对比的公正性, 我们保持基

区中 Ge 的总量一样. 所设计的 Ge 组分分布如图 3 所示. 其中 X_{W_b} 为基区中集电结侧的 Ge 组分; X_0 为基区中发射结侧的 Ge 组分, W_b 为基区宽度.

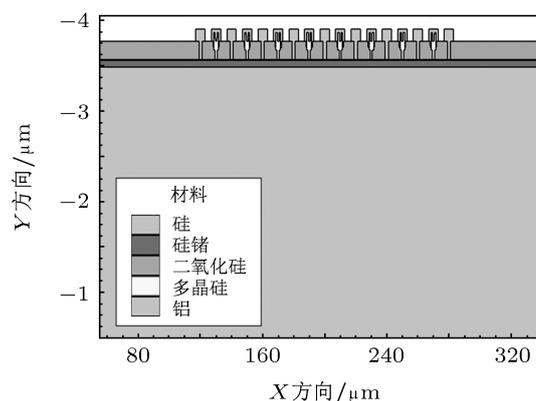


图 2 SILVACO/ATHENA 模块建立 SiGe HBT 器件结构

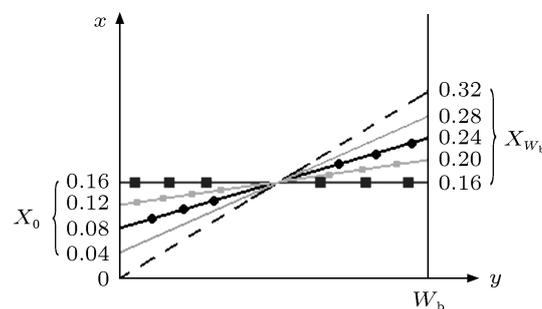


图 3 基区中 Ge 组分分布示意图

对五种不同 Ge 组分分布的 SiGe HBTs, 在 $I_B = 50 \mu\text{A}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$ 的工作情况下, 利用 SILVACO/ATLAS 模块模拟了其纵向温度分布, 如图 4 所示. 可以看到, 在基区 Ge 组分含量一定的条件下, 随着基区 Ge 组分梯度的增大, 器件的温度降低, 指间温差降低, 温度分布的均匀性得到改善. 为了看得更清晰, 我们提取了器件表面温度进行对比, 如图 5 所示.

由图 5 可以很清楚的看到, 在 Ge 组分总量一定的条件下, 在整个基区 W_b 范围内, 当 Ge 组分缓变量从 0 meV 增大到 268 meV 时, 器件的峰值温度下降 58 K, 指间温差从 15 K 缩小为 5 K. 这表明, Ge 组分梯度的存在, 可以改善器件的热学特性.

3.2 Ge 组分分布对器件增益和特征频率的影响

图 6 为我们实际模拟的在不同 Ge 组分梯度下的 SiGe HBT 器件增益与温度的依赖关系. 从图中

我们可以看到,随着 Ge 组分梯度的增大,器件增益减小,但增益随温度的变化幅度变小,这对器件热稳定有益.对 Ge 组分梯度为零(即均匀的 Ge 组分分布),增益最大,但增益随温度变化也最大,这对器件热稳定不利.

下面我们对 Ge 组分梯度对电流增益及其与温度的关系作一简单分析.

考虑到 Ge 组分缓变,理想状态下 SiGe HBT 的增益表达式可表示为 [8,9]:

$$\beta_{\text{SiGe}} = \frac{\delta \lambda \exp[\Delta E_{g,\text{Ge}}(X_0)/kT] [\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade})/kT]}{1 - \exp[-\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade})/kT]} \beta_{\text{Si}}, \quad (1)$$

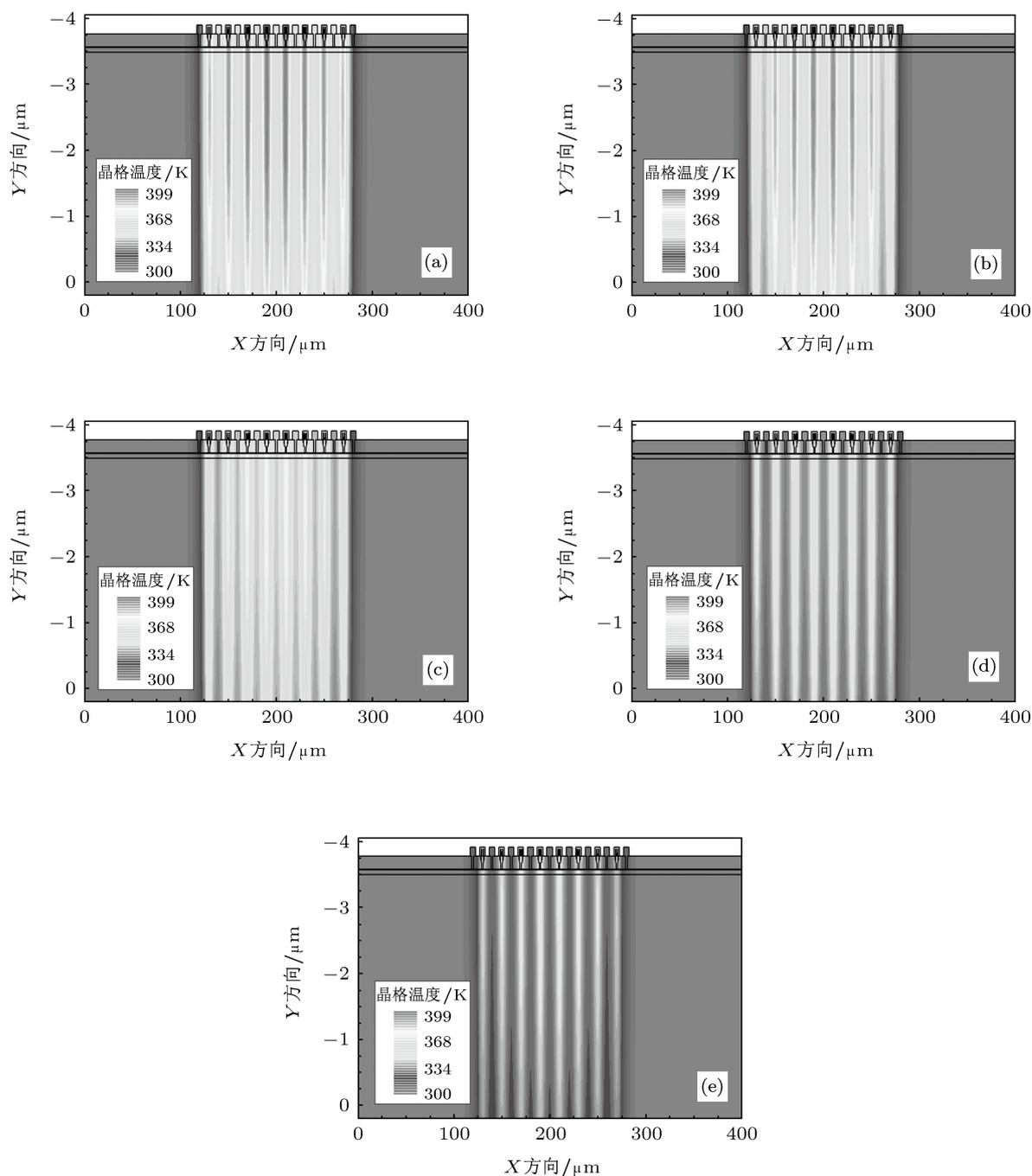


图 4 不同 Ge 组分梯度的 SiGe HBT 晶格温度分布 (a) $\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade}) = 0 \text{ meV}$; (b) $\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade}) = 67 \text{ meV}$; (c) $\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade}) = 134 \text{ meV}$; (d) $\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade}) = 174 \text{ meV}$; (e) $\Delta E_{g,\text{Ge}}(\text{grade}) = 268 \text{ meV}$

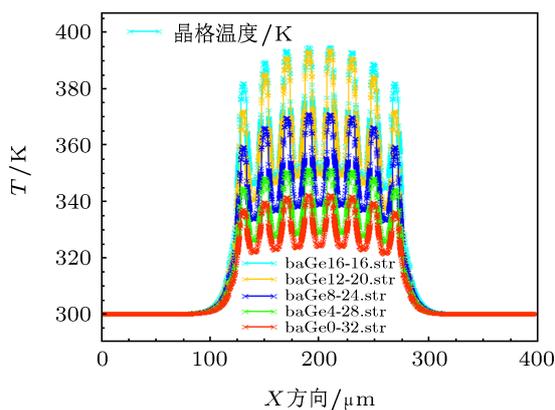


图5 五种 Ge 组分分布的 SiGe HBT 温度分布对比

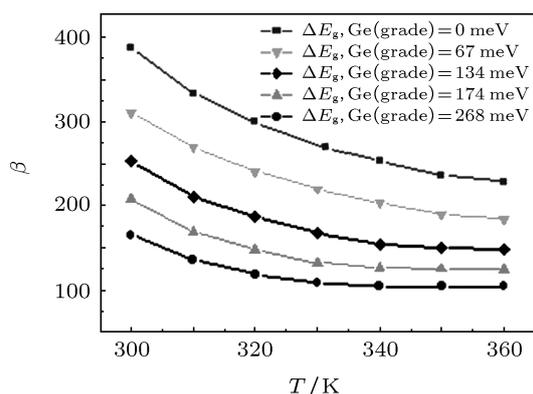


图6 不同 Ge 组分分布的 SiGe HBT 的增益与温度关系图

其中

$$\begin{aligned} \Delta E_{g,Ge(\text{grade})} &= \Delta E_{g,Ge}(X_{W_b}) - \Delta E_{g,Ge}(X_0), \\ \delta &= [(N_C N_V)_{\text{SiGe}} / (N_C N_V)_{\text{Si}}], \\ \lambda &= [(\mu)_{\text{SiGe}} / (\mu)_{\text{Si}}]. \end{aligned}$$

当基区 Ge 组分为均匀分布时,

$$\Delta E_{g,Ge(\text{grade})} = 0,$$

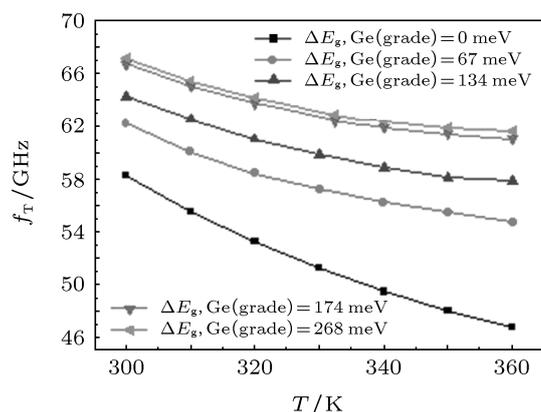
此时 (1) 式简化为:

$$\beta_{\text{SiGe}} = \delta \lambda \exp[\Delta E_{g,Ge}(X_0)/kT] \beta_{\text{Si}}, \quad (2)$$

可以看到, 指数项 $\Delta E_{g,Ge}(X_0)/kT$ 是影响增益的主要量. 在相同 Ge 组分总量下, 从图 3 看出, 随着基区 Ge 梯度的增大, X_0 是降低的, 则 $\Delta E_{g,Ge}(X_0)$ 变小, 随温度变化 $\Delta E_{g,Ge}(X_0)/kT$ 变化量变小. 因此, 随着 Ge 组分梯度增大, 增益有所下降, 增益对温度的依赖关系减弱.

图 7 为不同 Ge 组分梯度下的 SiGe HBT 特征频率与温度的依赖关系. 从图中我们可以看到, 随

着 Ge 组分梯度的增大, 器件特征频率增大, 而且特征频率随温度的变化幅度变小, 频率特性得到改善.


 图7 不同 Ge 组分分布的 SiGe HBT 的 f_T 与温度关系图

下面我们对 Ge 组分梯度对特征频率及其与温度的关系作一简单分析.

HBT 特征频率表达式可以表示为:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}}, \quad (3)$$

式中, τ_{ec} 为载流子的总渡越时间. 其中影响最大, 且与 Ge 组分梯度密切相关的量是基区渡越时间. τ_b [10]:

$$\tau_b = \int_0^{W_b} \frac{n_i^2}{N_B(x)} \int_x^{W_b} \frac{N_B(y) dy}{D_n(y) n_i^2(y)} dx, \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} n_i^2(x) &= n_i^2(0) e^{[\Delta E_g(0) + \Delta E_g^{\text{app}}]/kT} \\ &\times e^{\Delta E_{g,Ge(\text{grade})}x/kT}, \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} \tau_b &= kTW_b^2 \left[1 + (e^{-\Delta E_{g,Ge(\text{grade})}/kT} - 1) \right. \\ &\times \left. \left(1 + \frac{kT}{\Delta E_{g,Ge(\text{grade})}} - 1 \right) \right], \quad (5) \end{aligned}$$

由公式 (5) 可以看到随着 $\Delta E_{g,Ge(\text{grade})}$ 的增大, 由于引入了少子加速电场, τ_b 变小, 且其随温度的变化率减小. 因此, 随着 Ge 组分梯度的增大, 特征频率 f_T 不仅增大了, 而且对温度的依赖关系也减弱了.

4 SiGe HBT 基区 Ge 组分分布优化设计

在上面结果与分析的基础上, 我们提出了基区 Ge 组分优化分布——基区 Ge 组分分段分布结

构,如图 8 所示. 它结合了传统均匀 Ge 组分分布和缓变 Ge 组分分布,是一种新型的 Ge 组分分布结构. 发射结处 Ge 组分含量 X_0 是为了保证器件具有适当的电流增益,而基区 Ge 组分梯度可以提高器件的特征频率、改善器件的热学特性、降低器件增益和特征频率随温度的变化率,从而达到兼顾器件热学特性,增益和频率特性的目的.

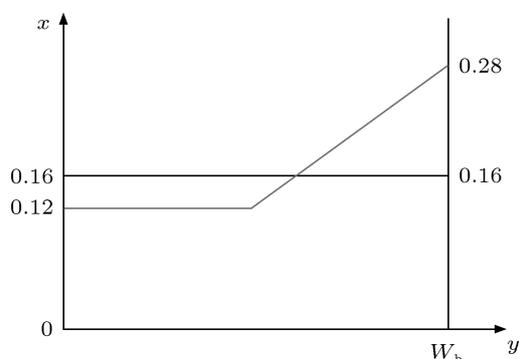


图 8 Ge 组分优化设计示意图

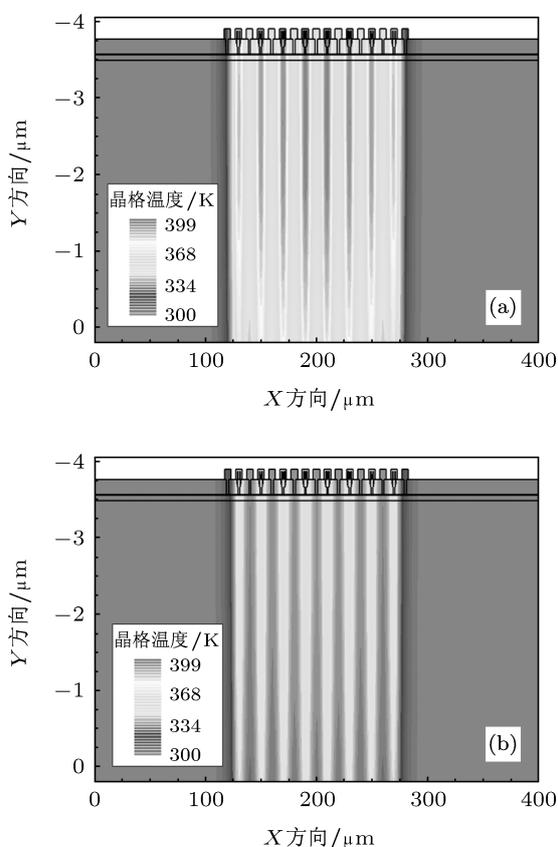


图 9 均匀 Ge 组分结构和优化 Ge 组分结构的 SiGe HBTs 晶格温度分布 (a) 基区均匀 Ge 组分分布; (b) 新型基区 Ge 组分分段结构

在 $I_B = 50 \mu A$, $V_{CE} = 5 V$ 的偏置下,利用 SILVACO/ATLAS 模块模拟了图 8 所示的两种 Ge 组分

分布的 SiGe HBT 晶格温度,如图 9 和 10 所示. 可以看到在基区 Ge 组分含量一定的条件下,相比于传统基区 Ge 组分均匀分布结构,具有优化的 Ge 组分分段分布的 SiGe HBT 器件的峰值温度下降 37 K,指间温差从 15 K 缩小为 7 K,温度分布的均匀性得到了极大改善.

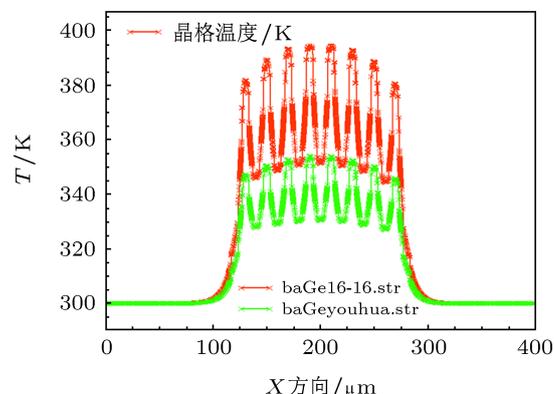


图 10 均匀 Ge 组分结构和优化 Ge 组分结构 SiGe HBT 温度分布对比

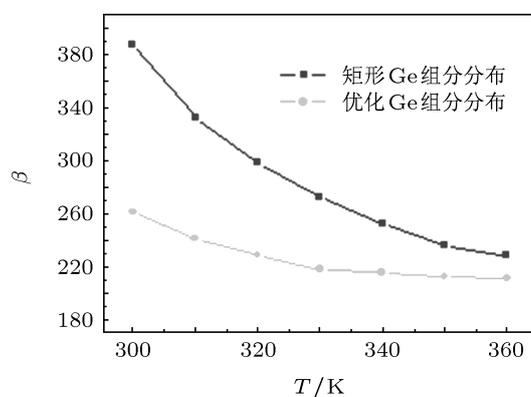


图 11 SiGe HBTs 的 β 与温度关系图

我们对具有优化的 Ge 组分分段的 SiGe HBT 器件增益和特征频率随器件温度的变化进行了模拟,并与传统均匀 Ge 组分的 SiGe HBT 进行对比,如图 11 和图 12 所示.

从图中我们可以看到,相比于均匀基区 Ge 组分分布的 SiGe HBT,具有新型基区 Ge 组分分段结构的 SiGe HBT 虽增益有所下降,但也保持了较高的值,其增益对温度的敏感性降低,提高了器件的温度分布的均匀性和降低了器件峰值温度.同时,由于保持了大的 Ge 组分缓变,不但特征频率有一定提高,而且对温度的敏感性降低.这些结果预示着新型基区 Ge 组分分布的 SiGe HBT 除了温度分布较好外,电学特性也较好且相对热稳定,对实际

应用很有价值.

5 结论

本文研究了基区 Ge 组分分布梯度对 SiGe HBT 热学及电学特性的影响. 结果表明, 在 Ge 组分总量一定的情况下, 随着基区 Ge 组分分布梯度的增大, SiGe HBT 峰值温度降低, 器件温度分布的均匀性变好; 同时, f_T 有所上升, β 有所下降, 温度对器件 β 和 f_T 的影响减弱. 在此基础上, 提出了兼顾器件温度分布均匀性, 增益特性和频率特性及其热稳定性的新型基区 Ge 组分分段分布结构. 结果表明, 相比于传统均匀基区 Ge 组分分布的 HBT, 具有优化的 Ge 组分分布结构的 SiGe HBT 器件的温度降低, 器件温差变小, 温度分布的均匀性得到极大改善; 同时, 其增益和特征频率对温度的敏感性变弱, 这表明基区采用新型 Ge 组分分布结构不但提

高了器件温度分布的均匀性, 还改善了电学特性的热稳定性. 这些研究结果是对 SiGe HBT 性能研究的补充, 对 SiGe HBT 的设计、制作和应用具有重要的参考价值.

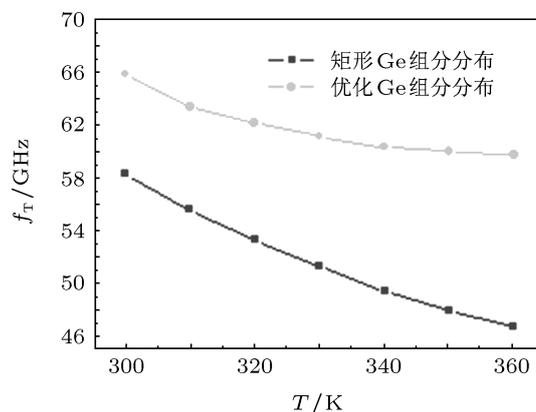


图 12 SiGe HBTs 的 f_T 与温度关系图

- [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] William E Ansley, John D Cressler, David M Richey 1998 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* (USA May, 1998) **46** 653
- [4] 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]
- [5] 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]
- [6] 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 (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]
- [7] Chen L, Zhang W R, Jin D Y, Xie H Y, Xiao Y, Wang R Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 018105
- [8] Rahim A F A, Hashim M R, Rahim A I A 2002 *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics Proceedings (ICSE) USA, Florida Jun, 2002* **2** 365
- [9] Wang D Q, Ruan G, Xue L C 1999 *Research&Progress of SSE* **19**190
- [10] Song J, Yuan J S 1997 *Solid-State Electronics* (USA, Florida December, 1997) **41** 1957

Effects of Ge profile in base region on thermal characteristics of SiGe HBTs*

Zhao Xin[†] Zhang Wan-Rong Jin Dong-Yue Fu Qiang Chen Liang
Xie Hong-Yun Zhang Yu-Jie

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

(Received 22 November 2011; revised manuscript received 7 December 2011)

Abstract

As is well known, the base Ge composition can improve the DC characteristics, frequency characteristics and noise characteristics of SiGe HBTs. However, the reports about the effects of Ge profile on HBTs thermal characteristics are rare. In this paper, by use of SILVACO simulator, the effects of different Ge gradients on thermal and electrical characteristics of SiGe HBT are investigated. It is found that under the same total Ge amount condition, as Ge gradient increases, the f_T of device increases significantly, the uniformity of temperature distribution becomes better, the influences of temperature on the β and f_T are weakened, but the gain β becomes smaller. For the device with uniform Ge composition, the β is high, but the influence of temperature on the β is enormous, the uniformity of temperature distribution is poor. Based on these results, in order to make a tradeoff among thermal, gain and frequency characteristics, a novel Ge composition structure with the combination of the uniform and graded Ge composition is proposed. The results show that the novel Ge composition structure SiGe HBT has good performances lower peak temperature, better uniform temperature profile, smaller variabilities of β and f_T with temperature, sufficient high β and f_T compared with the uniform Ge composition device. These new results provide valuable reference for the device thermal design, and are supplemental to the research and application of SiGe HBTs.

Keywords: SiGe Heterojunction bipolar transistor (HBT), thermal stability, Ge-profile, SILVACO

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

* 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 Education Committee, China (Grant Nos. KM200710005015, KM200910005001), the Beijing Municipal trans-century Talent Project (Grant No. 67002013200301), and Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality.

[†] E-mail: zhaox0314@sohu.com