

SiGe HBT 的 Mextram 504 模型温度参数提取与模型改进

任 铮[†] 胡少坚 蒋 宾 王 勇 赵宇航

(上海集成电路研发中心, 上海 201203)

摘要: 针对 IMEC 0.13 μm 准自对准 SiGe BiCMOS 工艺制成的基区 Ge 组分二阶分布结构 SiGe 异质结双极晶体管, 在 25~125 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 对其进行了包括 Early 电压, Gummel 图形等在内的完整双极晶体管特性曲线测量, 提取了该器件在 25~125 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度可变 Mextram 504 模型参数. 在此基础上, 为 Mextram 504 模型对 0.13 μm 基区 Ge 组分二阶分布 SiGe 异质结双极晶体管探索了完整的模型提取方案. 提出了对 Mextram 504 模型温度参数提取方法的改进, 优化了提取流程. 对 SiGe 异质结双极晶体管雪崩电流受温度影响的特性进行了讨论, 为 Mextram 模型提出了雪崩外延层的有效厚度的温度变化经验公式和新的雪崩电流温度变化参数, 提高了 Mextram 模型对不同温度下 SiGe 双极型晶体管进行模拟仿真的精确度.

关键词: Mextram 模型; 0.13 μm 锗硅工艺; 异质结双极晶体管; 参数提取

PACC: 7340Q EEACC: 2530N; 2560B; 2560Z

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)05-0960-05

1 引言

SiGe 技术是驱动诸如数字无线手机等低价、轻便的通信器材以及数字机顶盒、卫星直播、PDA 等信息科技产品迅猛发展的强大力量. 它的技术核心是锗硅异质结双极晶体管(以下简称 SiGe HBT), 这种器件的高速特性使得它在通信电路应用尤其是射频电路方面表现突出. Mextram 模型从双极晶体管模型的工业标准 Spice-Gummel-Poon 模型基础上发展而来, 是目前业界应用最为广泛的一种针对双极型晶体管的先进紧凑模型, 它提供了对 SiGe HBT 的支持. 在目前领先的锗硅工艺节点对 SiGe HBT 进行 Mextram 模型参数提取与优化进行探索性研究, 对于高频集成电路设计开发有着非常重要的意义和广泛的应用价值.

2 基区 Ge 组分二阶分布结构 SiGe HBT

常见的 SiGe HBT 基区结构为基区 Ge 组分不变的箱型结构与基区 Ge 组分纵向缓变结构^[1]. 采用基区 Ge 组分缓变结构的 SiGe HBT 基区内的 Ge 缓变层将产生一个方向由集电极指向发射极的电场, 从而提高流经基区的少数载流子漂移速率, 减小基区渡越时间, 并有助于提高晶体管的 Early 电压^[2]. 采用 Ge 组分恒定结构的 SiGe HBT 则由于拥有更高的发射极基极边界处 Ge 引入的能带偏移值而更易于获得更高的电流增益和发射区渡越时间^[3]. 本文所研究的 SiGe HBT 采用了 Ge 组分二阶分布基区结构, 该结构兼具基区 Ge 组分缓变结构和 Ge 组分恒定结构的优点, 在减小基区渡越时间, 提高

Early 电压同时能够保持足够高的电流增益和发射区渡越时间. 图 1 给出了本文 SiGe HBT 的剖面结构示意图. 图 2 显示了它的基区组分割面, SiGe 层采用两步生长 SiGe 法生成. 其中低 Ge 组分台阶 Ge 组分比例为 8%, 高 Ge 组分台阶比例为 15%, 采用比利时 IMEC 0.13 μm quasi-self-aligned (QSA) SiGe BiCMOS 工艺制成, 发射极长宽为 0.13 $\mu\text{m}/2\mu\text{m}$.

3 Mextram 模型温度参数的提取方法

用于提取 Mextram 温度可变模型参数的电学特性测量包含了对同一 SiGe HBT 在不同温度下的测量数据(本文的温度测量范围为 25~125 $^{\circ}\text{C}$ 共 5 组). 传统 Mextram 模型温度参数提取方法依据同一电学参数在

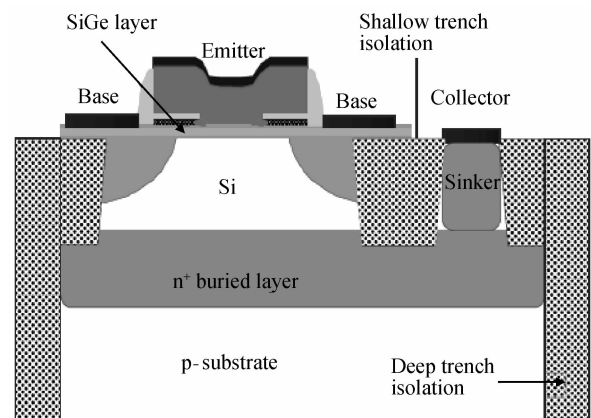


图 1 SiGe 异质结双极晶体管剖面结构示意图
Fig. 1 Schematic cross-section of SiGe HBT

[†] 通信作者. Email: alancatrz@icrd.com.cn

2007-10-10 收到, 2008-01-08 定稿

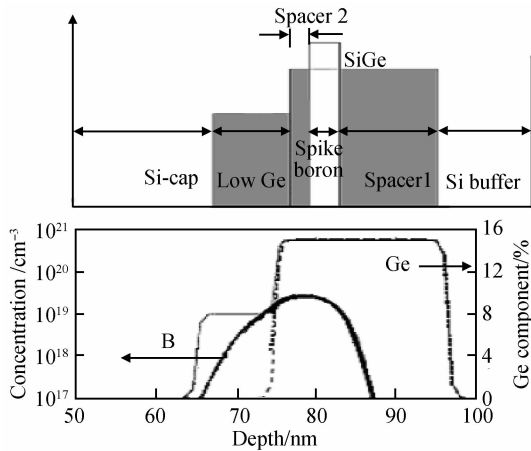


图 2 基区 Ge 组分二阶分布 SiGe HBT 基区结构
Fig.2 Base design of 2-step profile SiGe HBT

不同温度下的数值差异,按 Mextram 定义的参数温度变化规则计算相应的温度参数数值^[6].以提取正向 Gummel 图形相关温度参数为例,如图 3(a)~(e)所示,首先需要分别在 5 个不同温度下依据晶体管正向 Gummel 图形提取集电极饱和漏电流 I_s 、正向电流增益 B_F 与非理想基极漏电流 I_{BF} ,具体提取方法参见文献[7];其次如图(f)~(h)所示,根据 I_s, B_F, I_{BF} 的 Mextram 温度变化公式可知, I_s 的温度参数 $V_{GB}, DVGBF$ 的温度参数 V_{GJ} 以及 I_{BF} 的温度参数 $DVGBF$,与测量时环境温度 T 和参考温度之差 ΔT 呈线性关系,斜率分别为 I_s, B_F, I_{BF} 自然对数的相反数.因此根据 I_s, B_F, I_{BF} 的温度变化公式结合其提取数值在不同的 ΔT 下的平滑曲线斜率可计算得到上述模型温度参数.该提取方法不足之

处在于:首先,必须在所有测量温度下对同一晶体管的电学参数数值进行提取,过程繁琐效率低.其次,温度参数的提取基于不同温度下电学参数的提取值而非客观的测量数据,温度参数提取的精确程度将极大地依赖于电学参数提取的精确程度.

针对不足,本文提出改进的 Mextram 模型温度参数提取流程:(1)针对参考温度下的晶体管特性测量数据提取 Mextram 电学参数数值.(2)不再提取其他温度下的电学参数,参考 Mextram 模型所提供的参数取值范围并以实验得到的同工艺 SiGe HBT 各温度参数的典型值作为各温度参数的初值.(3)采用拟牛顿算法对各温度参数初值进行优化实现所有测量温度下晶体管特性仿真曲线对测量曲线的拟合,以实现最终均方根误差最小温度参数数值为最终值.以正向 Gummel 相关温度参数为例,首先根据参考温度下的正向 Gummel 图形提取 I_s, B_F 以及 I_{BF} 3 参数,其次为 3 电学参数的对应温度参数 V_{GB}, V_{GJ} 和 $DVGBF$ 选定初值,再进行数值迭代优化对全部测量温度下的正向 Gummel 测量曲线同时拟合得到 3 参数的最终值.图 3(i)显示了对全部 5 组测量温度下正向 Gummel 图形中 I_c 测量曲线的最终拟合情况.

改进的提取流程只需在参考温度下对电学参数数值进行一次提取,大大减少了参数提取过程的步骤,提高了提取效率.并且,它通过对测量数据曲线拟合进行温度参数优化得到最终温度参数数值而非传统方法通过对电学参数的提取值进行计算,减小了电学参数提取过程中可能引入的温度参数提取误差.图 4(a)和(c)显示了采用传统温度参数提取方法进行提取之后 I_s 提取

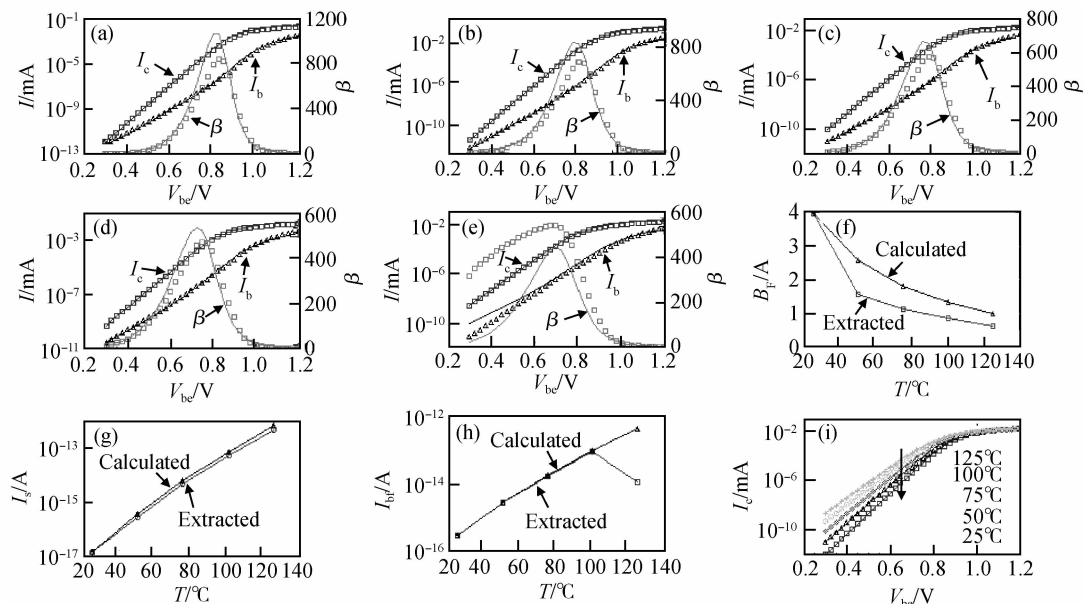


图 3 (a)~(e)25~125°C下晶体管正向 Gummel 仿真、测量对照图形;(f)~(h) B_f, I_s, I_{bf} 参数提取值与根据温度参数计算值随温度变化的对照图;(i) 25~125°C 不同温度下正向 Gummel 图形中 I_c 曲线的仿真、测量对照图
Fig.3 (a)~(e) Simulated and measured curves of forward Gummel plots from 25°C to 125°C ;(f)~(h) Plots of B_f, I_s, I_{bf} extracted at each temp and their value calculated by temp scaling rules;(i) Simulated and measured curves of I_c in Gummel plots from 25°C to 125°C

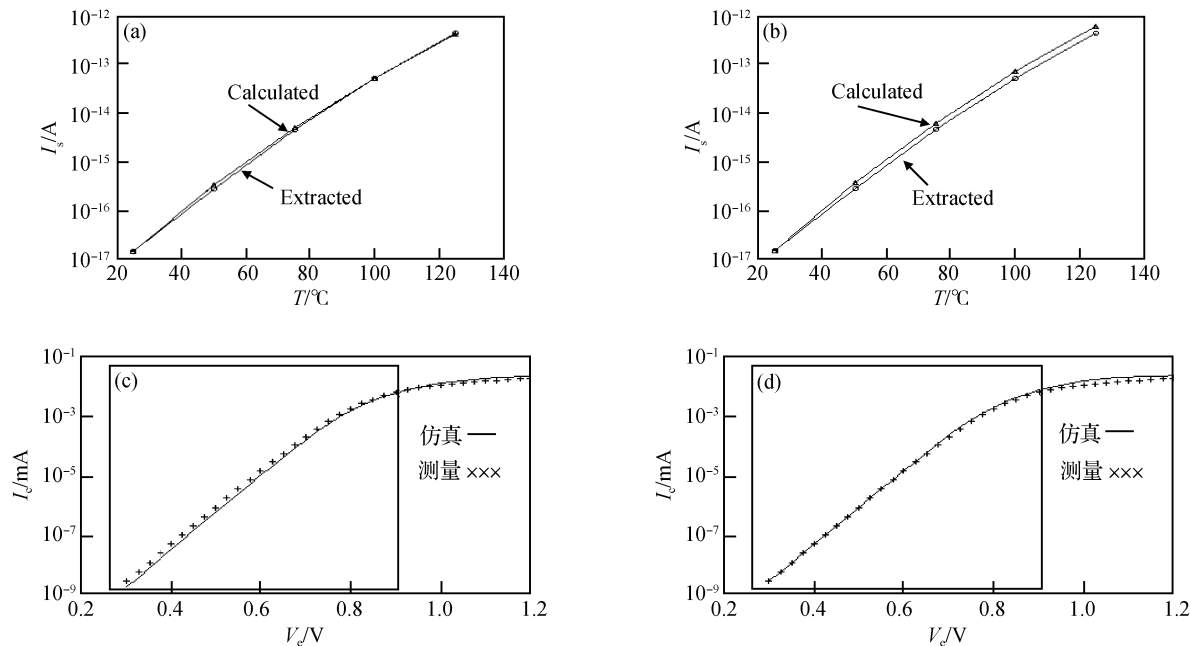


图 4 (a)采用传统方法提取温度参数后, I_s 提取值与根据温度参数计算值随温度变化的对照图;(b)采用改进提取方法提取后的对照图;(c)传统方法提取温度参数之后,125℃下正向 Gummel 中 I_c 仿真曲线与测量曲线的最终拟合情况;(d)采用改进提取方法提取的最终拟合情况

Fig.4 (a) Plot of I_s extracted at each temp versus calculated by temp parameters and temp scaling rules after parameters extraction with traditional method;(b) With optimized method;(c) Comparison between the simulated and measured I_c in forward Gummel plot at 125℃ after parameters extraction with traditional method;(d) With optimized method

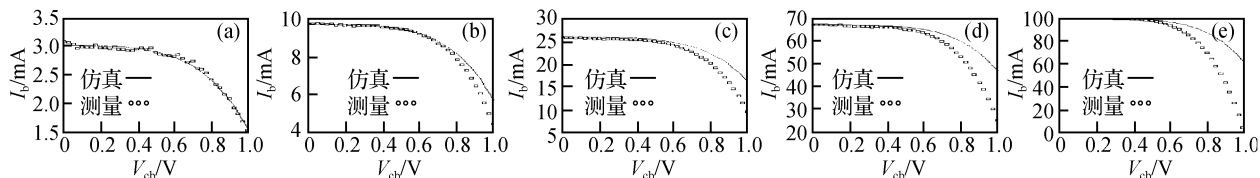


图 5 在进行模型参数提取之后,25~125℃下对正向 Early 电压图形 I_b - V_{cb} 曲线进行仿真与测量曲线拟合情况(基区 Ge 组分二阶分布,发射极长宽为 $0.13\mu\text{m}/2\mu\text{m}$)

Fig.5 Comparison between the simulated and measured I_b versus V_{cb} curves of forward Early voltage plots after parameters extraction at temperature from 25℃ to 125℃

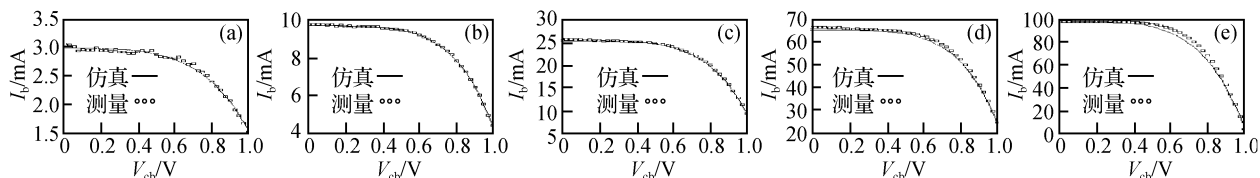


图 6 采用改进后 Mextram 504 模型在 25~125℃对正向 Early 电压 I_b - V_{cb} 测量数据进行参数提取之后,仿真曲线与测量曲线拟合情况

Fig.6 (a)~(e) Comparison between the simulated and measured curves of forward Early voltage plots at temp from 25℃ to 125℃ after WAVL temp scaling equation is added

值与计算值随温度变化的对照与对最高测量温度下正向 Gummel 中 I_c 测量曲线的最终拟合情况的对照. 图 4(b)和(d)显示了采用本文提出的改进提取方法的最终拟合情况. 由图可见采用传统温度参数提取方法,虽然各温度下电学参数的计算值与提取值接近一致,但用其

所提取的参数对晶体管特性进行仿真的曲线与测量曲线差异(图 4(c)中相对均方根误差为 25.80%)反而大于改进方法最终提取的仿真曲线(图 4(d)中相对均方根误差 8.878%).

表1 基区 Ge 二阶分布 SiGe HBT,发射极长宽 $0.13\mu\text{m}/2\mu\text{m}$,在不同温度下提取的 WAVL

Table 1 Value of WAVL extracted at different temperatures at this work

Temperature/ °C	25	50	75	100	125
WAVL/nm	127.8	114.6	111.3	110.0	109.7

4 Mextram 模型中雪崩电流计算公式的改进

Mextram 504 模型的雪崩电流值计算公式由(1)式给出,其中 I_{C1C2} 表示去除集电极电阻影响的集电极电流, x_d 表示耗尽层厚度, E_m 表示空间电荷区最大电场. A_n 和 B_n 为确定的晶体管雪崩常数. 根据 Mextram 504 模型计算公式, x_d 正比于参数 WAVL, 反比于参数 WAVL 的二分之一次方. WAVL 为雪崩外延层有效厚度, WAVL 为雪崩电流的曲率决定电压.

$$I_{av}/I_{C1C2} = \int_{x=0}^{x=x_d} A_n \exp(-B_n/|E(x)|) dx \quad (1)$$

通过图 5 所示在模型参数提取之后不同温度下正向 Early 电压 I_b-V_{cb} 的曲线拟合情况可以发现,在大电流条件下温度越高仿真曲线与实际测量曲线间的差异越明显. 这表明不同温度下雪崩电流与晶体管集电极电流之比的数值并不相同,它随着温度的上升而增大. 由于 A_n 与 B_n 不受温度影响,故由(1)式可知基-集电极耗尽层宽度 x_d 随温度上升而减小. 这表明基-集电极空间电荷区受温度上升影响而变窄. 经过在不同温度下的再提取,发现 WAVL 数值正比于 x_d ,也随着温度的上升而减小,具体数值见表 1. 而 Mextram 并未提供 WAVL 的温度变化规则.

基于此,一个雪崩外延层有效厚度温度变化经验公式被提出以满足其随温度变化的趋势. 如(2)式所示,新参数 $WAVL_{tref}$ 表示在参考温度下的有效雪崩外延层厚度, WAVLT1 为其随温度变化的一阶系数, WAVLT2 则为二阶系数. 根据表 1 不同测量温度下的 WAVL 数值提取得到 $WAVL_{tref} = 1.27 \times 10^{-7} \text{ m}$,

$WAVLT1 = 4.8 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{°C}$, $WAVLT2 = -3.17 \times 10^{-12} \text{ m}/\text{°C}^2$. 如图 6 所示,经(2)式计算得到的各温度下 WAVL 参与仿真得到的仿真曲线与实际测量曲线非常吻合.

$$WAVL = WAVL_{tref} - (\text{Temp} - T_{ref}) \cdot WAVLT1 - (\text{Temp} - T_{ref})^2 \cdot WAVLT2 \quad (2)$$

5 结论

本文使用 Mextram 504 模型在 $25 \sim 125\text{°C}$ 范围内对 IMEC $0.13\mu\text{m}$ QSA SiGe BiCMOS 工艺基区 Ge 组分二阶分布结构 HBT 参数进行了提取. 对传统的温度参数提取方法进行了分析并提出了优化之后的新提取方法,较旧方法具有明显优势. 对雪崩电流受温度影响的特性进行了讨论,提出了一个雪崩外延层有效厚度受温度影响的经验修正公式,经修正公式计算得到的各温度下 WAVL 参与仿真得到的仿真数据与实际测量数据吻合得很好.

参考文献

- [1] Patton G L, Comfort J H, Meyerson B S, et al. 75GHz SiGe-base hetero junction bipolar transistors. IEEE Electron Device Lett, 1990, 11: 171
- [2] Cressler J D, Niu G. Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors. ArtechHouse, Boston Massachusetts, 2003: 56
- [3] Patton G L, Stork J M C, Comfort J H, et al. SiGe-base hetero-junction bipolar transistors: physics and design issues. Technical Digest International Electron Devices Meeting, 1990: 13
- [4] Wartenberg S A, Westgate C R. Modeling the temperature-dependent early voltage of a silicon germanium heterojunction bipolar transistor. IEEE Trans Electron Devices, 1999, 46(6): 1207
- [5] Tang Y T, Hamel J S. An electrical method for measuring bandgap grading in SiGe HBT. High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 1997: 267
- [6] Kloosterman W J, Geelen J A M, Klaassen D B M. Efficient parameter extraction for the MEXTRAM model. Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 1995: 70
- [7] Paasschens J C J, Kloosterman W J, Havens R J. Parameter extraction for the bipolar transistor model Mextram level 504. NXP, 2001: 58

Extraction of Temperature Parameters and Optimization of the Mextram 504 Model on SiGe HBT

Ren Zheng[†], Hu Shaojian, Jiang Bin, Wang Yong, and Zhao Yuhang

(Shanghai IC R&D Center, Shanghai 201206, China)

Abstract: In this work, our modeling research focuses on two-step Ge profile base SiGe heterojunction bipolar transistors (HBTs) manufactured by IMEC advanced 0.13 μm quasi-self-aligned SiGe BiCMOS process technology. From 25 $^{\circ}\text{C}$ to 125 $^{\circ}\text{C}$, measurements including Early voltage plots and Gummel plots of the SiGe HBT are taken and all parameters of the temperature scalable Mextram 504 model are extracted. Based on this, a complete solution of the temperature scalable modeling work is explored. The extracting method of the temperature scalable Mextram 504 model is improved and an optimized flow of model extraction for a 0.13 μm two-step Ge profile base SiGe HBT is suggested. The temperature impacted characteristics of the avalanche current are discussed and new temperature scaling parameters of the avalanche current are presented. Simulation of the Mextram model for SiGe HBTs at different temperatures becomes more accurate.

Key words: Mextram model; 0.13 μm SiGe process; HBT; parameter extraction

PACC: 7340Q **EEACC:** 2530N; 2560B; 2560Z

Article ID: 0253-4177(2008)05-0960-05

[†] Corresponding author. Email: alancatz@icrd.com.cn

Received 10 October 2007, revised manuscript received 8 January 2008