

# 超结硅锗碳异质结双极晶体管机理研究与特性分析优化\*

刘静<sup>†</sup> 郭飞 高勇

(西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

(2013年9月24日收到; 2013年10月31日收到修改稿)

提出一种超结硅锗碳异质结双极晶体管 (SiGeC HBT) 新结构. 详细分析了新结构中 SiGeC 基区和超结结构的引入对器件性能的影响, 并对其电流输运机制进行研究. 基于 SiGeC/Si 异质结技术, 新结构器件的高频特性优良; 同时超结结构的引入, 在集电区内部水平方向和垂直方向都建立了电场, 二维方向上的电场分布相互作用大大提高了新结构器件的耐压能力. 结果表明: 超结 SiGeC HBT 与普通结构 SiGeC HBT 相比, 击穿电压提高了 48.8%; 更重要的是 SiGeC HBT 器件中超结结构的引入, 不会改变器件高电流增益、高频率特性的优点; 新结构器件与相同结构参数的 Si 双极晶体管相比, 电流增益提高了 10.7 倍, 截止频率和最高震荡频率也得到了大幅度改善, 很好地实现了高电流增益、高频率特性和高击穿电压三者之间的折中. 对超结区域的柱区层数和宽度进行优化设计, 随着柱区层数的增多, 击穿电压显著增大, 电流增益有所提高, 截止频率和最高震荡频率减低, 但幅度很小. 综合考虑认为超结区域采用 pnpn 四层结构是合理的.

**关键词:** 硅锗碳, 超结, 异质结双极晶体管

**PACS:** 85.30.Pq, 85.30.De, 73.40.Lq

**DOI:** 10.7498/aps.63.048501

## 1 引言

基于异质结能带工程, 近年来 SiGe, SiGeC 异质结双极晶体管 (HBT) 高速发展, 在射频、微波领域其性能可与 III-V 族双极晶体管 (BJT) 媲美. 先进的 SiGe HBT 其截止频率和最高震荡频率分别高达  $f_T = 300$  GHz,  $f_{Max} = 350$  GHz<sup>[1-5]</sup>; 设计优良的 SiGeC HBT 其截止频率超过 500 GHz, 正在向太赫兹发展<sup>[6-9]</sup>. 然而, 目前商用的 SiGe, SiGeC HBT 的截止频率大多处于中等水平 (200 GHz 以内), 这主要是因为双极晶体管的频率和击穿电压之间存在不可调和的矛盾<sup>[10,11]</sup>. 虽然, SiGe HBT 基于异质结能带工程所带来的设计自由度对发射区物理限制更小, 使基区设计的基本思想简化为减小基区电阻和基区渡越时间, 以提高其频率特

性<sup>[12-15]</sup>. 但这带来的另一问题是器件击穿电压的降低, 通常截止频率为 200 GHz 的 SiGe HBT, 其击穿电压  $V_{CE0}$  小于 2 V. 在高频、微波应用中晶体管的击穿电压较低, 意味着器件必须在高输出功率和高信噪比之间进行取舍, 这使得人们不得不放弃低成本的 SiGe HBT 而去选择昂贵的 III-V 族器件. 虽然通过对基区掺杂浓度、厚度以及 Ge, C 含量和分布进行优化, 在一定程度上可以缓解这一问题, 但不能从根本上解决上述参数之间的矛盾. 对于一个截止频率  $f_T$  和击穿电压  $V_{CE0}$  分别为 120 GHz 和 1.8 V 的 SiGe HBT, 通过优化器件结构和掺杂浓度剖面得到  $f_T = 100$  GHz,  $V_{BCE0} = 1.9$  V 的器件<sup>[16]</sup>, 仅仅通过器件优化提高 HBT 的击穿电压收效甚微, 同时却会大幅牺牲器件的频率特性.

高性能的功率二极管和功率金属氧化物半导体 (MOS) 类结构器件中, 通过引入超结结构解决

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61204094)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20106118120003) 和陕西省教育厅科学研究计划 (批准号: 11JK0924) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: [jingliu@xaut.edu.cn](mailto:jingliu@xaut.edu.cn)

正向通态特性和反向击穿特性之间的矛盾,取得了很好的成效<sup>[17-20]</sup>.超结引入前后,垂直双扩散金属氧化物半导体场效应晶体管VDMOS结构中正向导通电阻和反向击穿电压之间的2.5次方关系,改善为1.32次方关系.超结结构通过在器件的不同维度上引入新的电场中和漂移区的载流子,获得高的击穿电压,很好地解决了导通电阻和击穿电压之间的矛盾<sup>[21]</sup>.本文将SiGeC/Si异质结和超结结构同时引入到双极晶体管中,提出一种新型的超结SiGeC HBT结构.新器件结构基于异质结能带工程提高器件的频率特性,基于超结技术改善器件的击穿特性.

## 2 新结构的提出

为了获得更强的放大能力,SiGeC HBT在电路中一般采用共发射极连接,这样集电极-发射极之间的击穿电压 $V_{CE0}$ 就成为限制施加到器件上的最高电压.集电结发生雪崩击穿时,碰撞电离产生的载流子会在发射结的作用下放大 $\beta$ (共发射极连接的电流增益)倍,集电极与发射极之间的击穿电压 $V_{CE0}$ 和集电极-基极之间的击穿电压 $V_{CB0}$ 满足如下关系

$$V_{CE0} = \frac{V_{CB0}}{\sqrt{\beta}}, \quad (1)$$

$m$ 为典型值,一般在3—6之间.SiGeC HBT具有更高的 $\beta$ ,因而其共发射极击穿电压 $V_{CE0}$ 比共基极击穿电压 $V_{CB0}$ 低很多.

限制SiGeC HBT击穿电压的另一个因素是频率特性的提高.为了获得较高的截止频率,一个有效的方法就是减小集电结空间电荷区载流子渡越时间,一般可以认为载流子以饱和速度穿过空间电荷区,为了减小载流子渡越时间需要增大集电区的掺杂浓度,从而会降低集电极-基极之间的击穿电压 $V_{CB0}$ ,这就限制了施加到SiGeC HBT集电极-发射极之间的最高电压,频率特性和击穿电压之间存在不可调和的矛盾.

超结SiGeC HBT结构如图1所示,与普通的Si双极晶体管结构相比(图2),新结构器件结构的改进主要体现在两个方面:1)基区采用SiGeC材料,其中Ge,C的含量分别为20%和0.5%;2)集电区采用p柱区和n柱区交替出现的超结结构.

在超结SiGeC HBT结构中,集电区中引入p柱区和n柱区交替出现的超结结构,在满足电荷平

衡条件时,柱区内每个电离施主的正电荷产生的电通量都被其近旁的电离受主的负电荷所吸收,意即其电力线横向流走了.由于这种横向电荷互相补偿的关系,对纵向来说,耐压层可以粗略地认为是本征型,提高器件的耐压.基于超结结构提高器件的击穿电压,不需要减小集电区的掺杂浓度,因而集电结空间电荷区的宽度不变,器件的频率特性几乎不受影响.

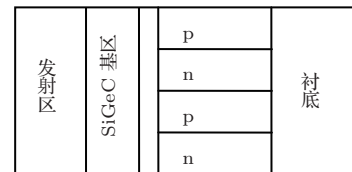


图1 超结 SiGeC HBT 结构示意图

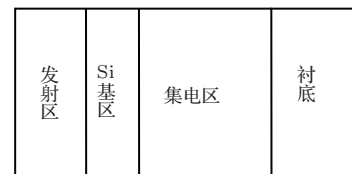


图2 Si BJT 结构示意图

## 3 器件特性分析

本文基于国际通用器件模拟软件ISE完成对新结构HBT的仿真分析,建立了能精确反映器件特性的关键物理参数模型,主要包括SiGeC材料迁移率模型、SiGeC/Si异质结能带结构模型、能带窄化和高场饱和模型等<sup>[22]</sup>.模拟中超结SiGeC HBT的结构参数和材料参数如表1所示,超结区域采用pnpn四层结构,柱区宽度比例相等, $W_p = W_n = 300 \text{ nm}$ ,总宽度为1200 nm.为了充分说明新结构器件特性的优越性能,同时还给出了普通结构SiGeC HBT和Si BJT器件的模拟结果.普通结构SiGeC HBT的结构参数与超结SiGeC HBT相比,只是在集电区用n型掺杂的Si材料取代超结结构中的pnpn结构,掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,其余参数完全相同.

图3为三种双极晶体管的Gummel曲线,其中图3(a)为Si BJT,图3(b)为SiGeC HBT,图3(c)为超结SiGeC HBT.模拟SiGeC HBT时,只是将新结构中的超结集电区换为普通集电区(掺杂类型为n型,浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),其余参数参照表1.Si BJT和SiGeC HBT相比只是基区材料类型不

同, 其余参数完全相同.

由图3可以看出, Si BJT和超结SiGeC HBT的电流增益 $\beta$ 分别为13.1和140.4, 新结构器件与Si BJT相比, 电流增益增大了10.7倍. 新结构器件基于SiGeC/Si异质结技术, 大大改善了器件的电流增益.

表1 超结SiGeC HBT结构参数和材料参数

区域名称	材料类型	掺杂类型	掺杂浓度/cm <sup>-3</sup>	厚度/nm
发射区	Si	n	$1 \times 10^{18}$	70
基区	SiGeC	p	$5 \times 10^{19}$	40
集电区	Si	n	$3 \times 10^{17}$	30
超结集电区	Si	p n p n	$3 \times 10^{17}$	470
衬底	Si	n	$2 \times 10^{19}$	300

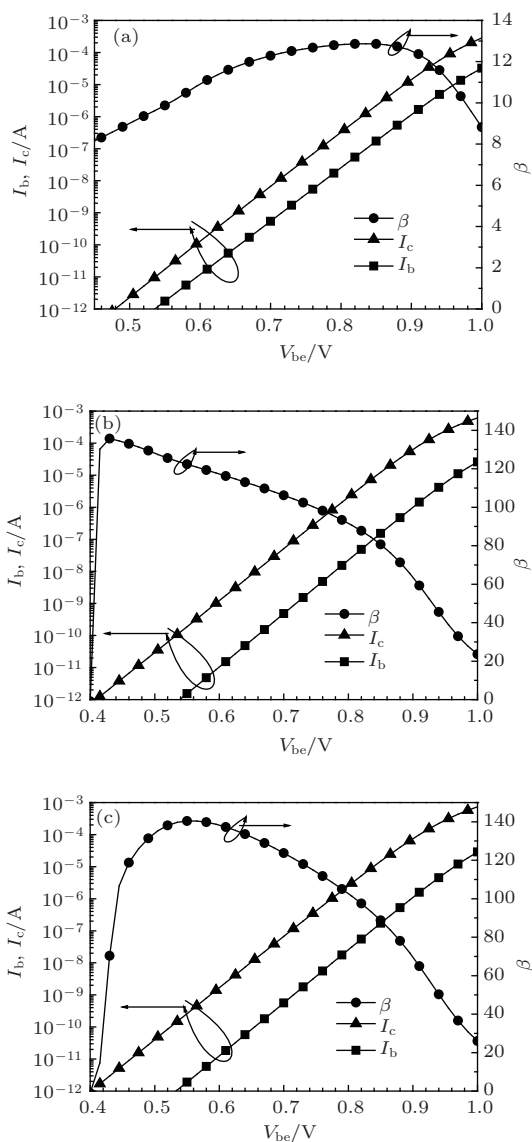


图3 三种结构晶体管Gummel曲线 (a) SiBJT; (b) SiGeC HBT; (c) 超结SiGeC HBT

Si BJT主要通过增大发射区和基区的掺杂浓度来提高发射结注入效率. 超结SiGeC HBT中发射结处的能带不连续, 极大地提高了电流增益. SiGeC/Si异质结热平衡时的能带结构如图4所示. 在新结构器件中, p型SiGeC基区的掺杂浓度比n型Si发射区的掺杂浓度高, 也即异质结两边宽禁带材料的掺杂浓度比窄禁带低, 这样势垒主要降落在宽禁带区. 当作为发射结的SiGeC/Si异质结处于正向偏置状态时, 其能带结构如图5所示. 正向偏压较小时, SiGeC/Si异质结能带结构属于负反向势垒的情形, 在界面处宽禁带材料的势垒尖峰低于异质结空间电荷区外的窄禁带材料的导带底<sup>[23]</sup>. 热平衡状态下, 电子由n型Si发射区的导带到p型SiGeC基区的导带需要越过的势垒为 $(qV_{D1} + qV_{D2} - \Delta E_C)$ , 而空穴由p型SiGeC基区的价带到n型Si发射区的价带需要越过的势垒为 $(qV_{D1} + qV_{D2} + \Delta E_V)$ . 因此, SiGeC HBT中, 从发射区注入到基区的电子电流 $J_n$ 要比从基区注入到发射区的空穴电流 $J_p$ 大得多, 发射结具有很高的注入效率. 因此, 超结SiGeC HBT与Si BJT相比电流增益显著提高.

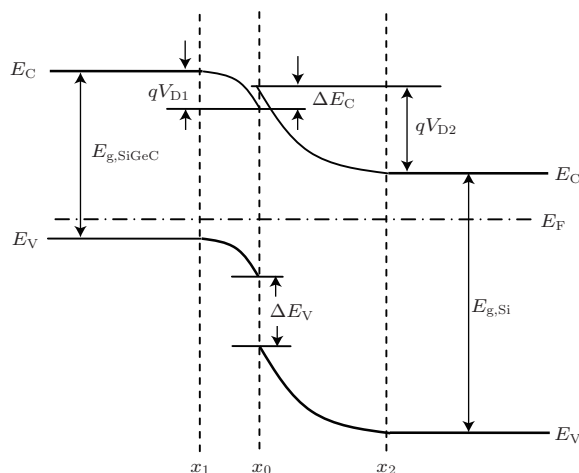


图4 SiGeC/Si发射结平衡状态能带结构

由图3同时可以看出, 超结SiGeC HBT的电流增益为140.4, 而SiGeC HBT的电流增益为136, 表明超结结构的引入使SiGeC HBT的电流增益有所增大, 但幅度较小只有3.2%. 这主要是因为新结构器件在集电区采用了超结结构, 超结结构的存在使集电区电场分布更加均匀, 集电结具有较小的反向饱和电流值, 这在一定程度上减小了基极电流的有效成分, 因而新结构器件电流增益会有所提高.

图6为超结引入前后两种SiGeC HBT击穿特

性对比曲线. 由图可以看出, 普通结构 SiGeC HBT 的击穿电压为 4.3 V, 而超结 SiGeC HBT 的击穿电压为 6.4 V, 击穿电压提高了 48.8%. 由 (1) 式可知, 共发射极连接的 SiGeC HBT, 其反偏集电结雪崩击穿电压是决定器件击穿电压的关键参数. 超结 SiGeC HBT 中存在 p 区和 n 区交替的超结结构, n 区中每个带正电荷的电离施主产生的电通量, 都被其近旁的 p 区中电离受主的负电荷吸收, 即电力线横向流走了. 这种横向电荷互补的关系, 对纵向来讲承受电压的集电区可以粗略地认为是本征层, 大大增加了器件的耐压能力.

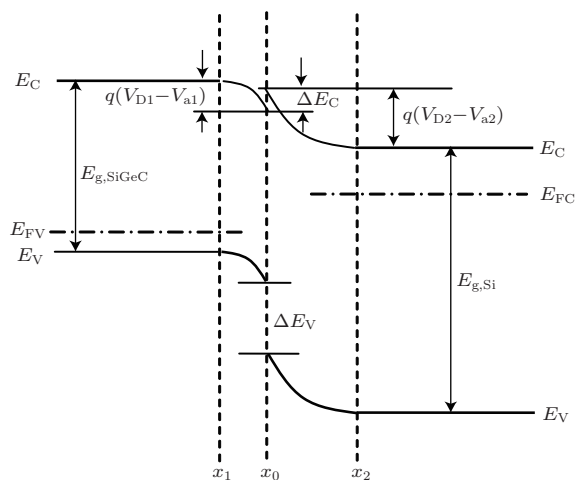


图5 SiGeC/Si 发射结正偏状态能带结构

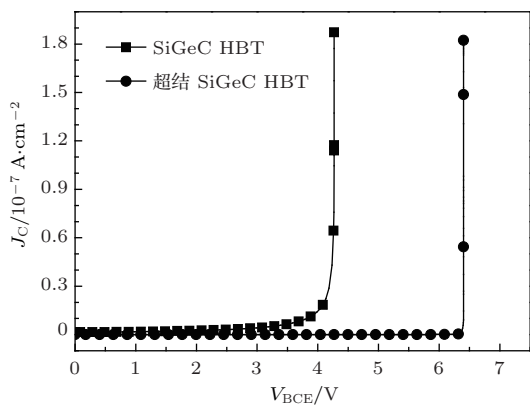


图6 超结引入前后两种 SiGeC HBT 击穿特性对比

图 7 为超结 SiGeC HBT 击穿过程中器件内部的电场分布, 超结结构中横向交替出现的 p 区和 n 区在水平方向和垂直方向都建立了电场, 二维方向上电场分布的相互作用产生了总的电场. 由图 7 可以看出, 击穿发生时超结 SiGeC HBT 集电区中 p 区和 n 区中的电场分布更加均匀, 沿着集电区内电场线进行积分可以得到较高的耐压值.

图 8 给出了普通结构 SiGeC HBT 中的电场分

布曲线, 由图可以看出, 击穿发生时集电区中心区的电场强度与集电结附近的电场强度相比低 5 个数量级, 电场分布极不均匀, 在集电区内沿电场线进行积分得到的耐压值远远小于超结 SiGeC HBT 中的耐压值.

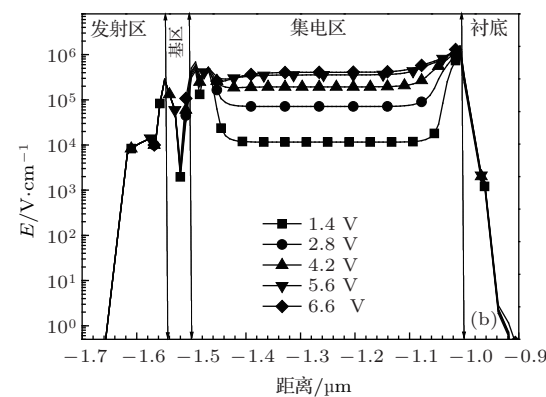
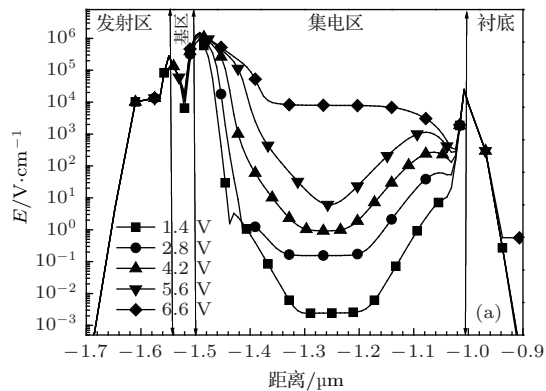


图7 超结 SiGeC HBT 击穿过程中器件内部电场分布 (a) n 柱区; (b) p 柱区

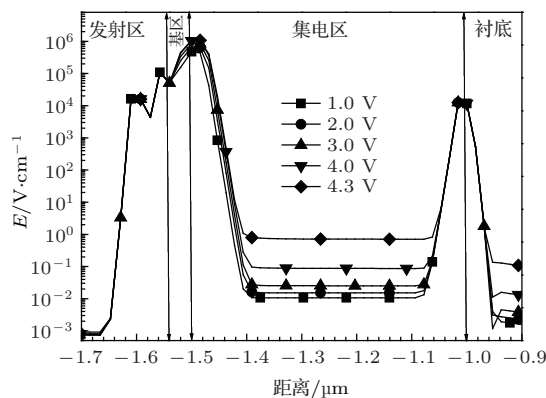


图8 击穿过程中 SiGeC HBT 中器件内部电场分布

对比图 7 和图 8 两种 SiGeC HBT 中的电场分布曲线可以发现, 超结引入前后主要影响集电区中部的电场分布, 而对其他区域的电场分布几乎没有影响, 这也说明了 SiGeC HBT 中超结的引入在提高器件击穿电压的同时不会对器件的其他特性造成显著影响.

图 9 (a) 和 (b) 分别给出了超结 SiGeC HBT, 普通结构 SiGeC HBT 和 Si BJT 三种器件截止频率和最高振荡频率的对比曲线. 由图可以看出, Si BJT 器件的截止频率和最高振荡频率分别只有 16.5 和 69.5 GHz, 普通结构 SiGeC HBT 的截止频率和最高振荡频率分别为 55 和 127 GHz, 超结 SiGeC HBT 的截止频率和最高振荡频率分别为 54.5 和 126.1 GHz. 超结 SiGeC HBT 和普通结构 SiGeC HBT 的频率特性远远优于 Si BJT 器件, 并且超结引入前后两种 SiGeC HBT 的截止频率和最高振荡频率的改变量均小于 1%. 在 HBT 器件中, 信号从发射极向集电极传送时产生的时间延迟是造成器件频率响应的原因, 这个延迟时间的长短决定了器件的频率特性. 在 SiGeC HBT 中存在五种主要的时间延迟: 基区渡越时间  $\tau_B$ 、发射结电容充电时间  $\tau_E$ 、发射结 SiGeC/Si 异质结能带不连续引起的延迟  $\tau_H$ 、集电结电容充电时间  $\tau_C$  和集电结耗尽层渡越时间  $\tau_D$ . 信号从发射极到集电结的全部时间延迟  $\tau_{EC}$  为

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_B + \tau_H + \tau_C + \tau_D. \quad (2)$$

SiGeC HBT 的截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{max}$  可以分别表示为

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

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi\tau_b C_{jc}}}. \quad (4)$$

超结 SiGeC HBT 与普通结构 SiGeC HBT 相比, 显然超结结构的引入不会对发射区和基区造成影响 (这一点从图 7 和图 8 两种器件的电场分布可以看出, 两种器件中发射区、基区中的电场分布相同), 同时该超结结构处于集电区内部距离集电结还有一定的宽度, 也不会对集电结的电容产生影响, 因此超结结构的引入只可能对上述五个时间延迟机制中的集电结耗尽层渡越时间  $\tau_D$  产生影响. 事实上可以认为载流子以饱和速度穿过集电结的空间电荷区, 那么

$$\tau_D = \frac{x_m}{v_s}, \quad (5)$$

其中,  $x_m$  为集电结空间电荷区宽度,  $v_s$  为载流子的饱和速度. 在两种 SiGeC HBT 结构中集电结耗尽层宽度相等, 超结结构的存在几乎不会对两种器件的集电结空间电荷区渡越时间  $\tau_D$  产生影响. 由 (2)—(4) 式可知, 两种器件的截止频率和最高振荡

频率几乎相等. 因此, SiGeC HBT 中超结结构的引入在提高器件击穿电压的同时不会对器件的其他特性带来负面影响.

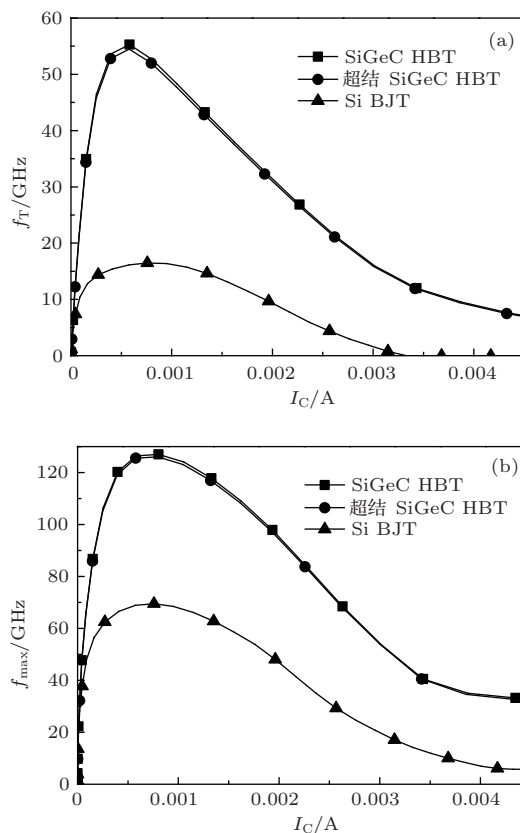


图 9 超结 SiGeC HBT、普通结构 SiGeC HBT 和 SiGeC HBT 频率特性对比曲线 (a) 截止频率; (b) 最高振荡频率

#### 4 超结参数优化设计

超结结构中 p 柱区和 n 柱区的宽度和层数是影响器件特性的关键参数, 模拟中固定柱区掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , p 柱区和 n 柱区总宽度为 1200 nm 保持不变; 考察超结区域为 2 层、4 层、6 层、8 层和 10 层结构时器件特性的变化, 相应的柱区宽度分别为 600, 300, 200, 150 和 120 nm. 图 10, 图 11 和图 12 分别为不同柱区宽度时超结 SiGeC HBT 反向阻断特性、Gummel 曲线和频率特性对比曲线.

由图 10 可以看出, 随着超结层数的增多, 超结 SiGeC HBT 的击穿电压显著增大, 并且反向漏电流有所减小. 当柱区层数由 2 层增加到 10 层时, 器件的击穿电压由 5.5 V 增大到 8.4 V, 随着柱区层数的增多, 横向电场的互补作用更加明显, 纵向电场分布更加均匀, 击穿电压增大. 当然, 在柱区层数增加的过程中, 一定要实现 p 柱区和 n 柱区内的电荷完全平衡, 否则器件的击穿电压会显著

降低。

由图 11 可以看出, 随着柱区层数的增加, 超结 SiGeC HBT 的电流增益增大, 但幅度非常小, 器件的电流增益几乎不受柱区宽度的影响. 图 12 (a) 和 (b) 分别为不同柱区层数时器件的截止频率和最高振荡频率特性曲线, 随着柱区层数的增大, 截止频率和最高振荡频率都有所减小. 柱区层数由 2 层变化到 10 层时, 截止频率由 54.8 GHz 减小到 52.3 GHz, 最高振荡频率由 126.2 减小到 125.1 GHz. 可以看出, 柱区层数增多时, 击穿电压和电流增益变大, 而截止频率和最高振荡频率变低, 尤其是击穿电压会随着柱区层数的增大显著增大, 但考虑到工艺难度和制造成本, 柱区层数取为 pnpn 的 4 层结构是合理的.

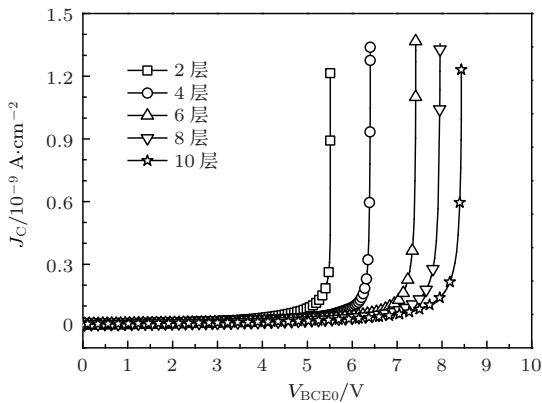


图 10 不同柱区层数超结 SiGeC HBT 击穿特性

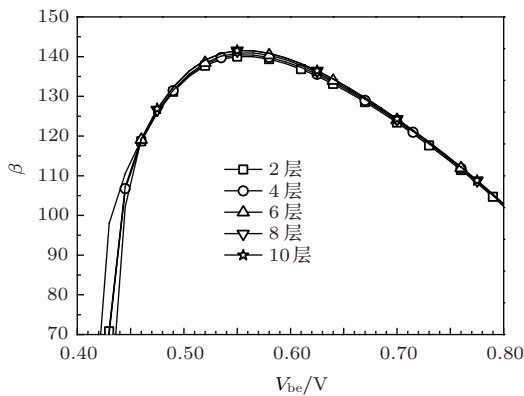


图 11 不同柱区层数超结 SiGeC HBT Gummel 曲线

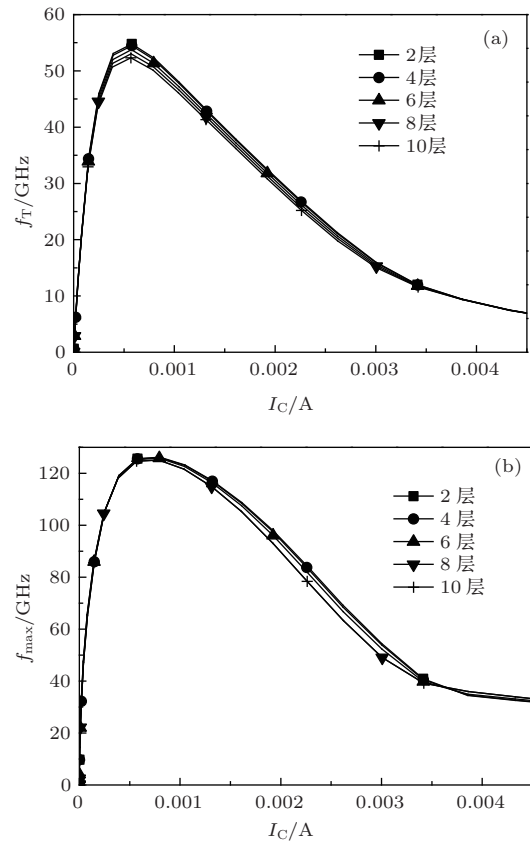


图 12 不同柱区层数超结 SiGeC HBT 频率特性 (a) 截止频率; (b) 最高振荡频率

域的应用. 本文针对这一问题, 将新型半导体材料 SiGeC 和超结结构相结合, 提出一种新型的超结 SiGeC HBT 新结构, 详细分析了新结构器件的电流运输机理, 重点研究了超结结构的引入对器件击穿电压的改善机制. 超结 SiGeC HBT 基于发射结 SiGeC/Si 异质结能带结构的不连续, 具有很高的发射结注入效率, 基区可以设计得更窄, 从而具有较小的基区渡越时间, 实现了电流增益和频率特性之间的折中; 同时, 基于集电区的超结结构, 在不影响高增益、高频率特性的前提下大大改善了器件的击穿电压, 因而超结 SiGeC HBT 很好地实现了电流增益、频率特性和击穿电压三者之间的折中. 超结结构是影响器件特性的关键参数, 本文对柱区的层数和宽度进行优化设计, 随着柱区层数的增多, 柱区宽度减小, 器件的电流增益和频率特性变化不明显, 但击穿电压显著增大. 综合考虑器件特性、工艺难度、制造成本等多种因素, 给出了超结区域的优化参数.

## 5 结 论

SiGeC HBT 具有高电流增益、高频率特性的优点, 但击穿电压低大大限制了其在射频、微波领

## 参考文献

[1] Schroter M, Krause J, Rinaldi N 2011 *IEEE Trans. Electr. Dev.* **58** 3697

- [2] Zhang J, Li Z Q, Chen L Q, Chen P F, Zhang H Y 2008 *Chin. J. Semicond.* **29** 655
- [3] Pottrain A, Lacave T, Ducatteau D, Gloria D, Chevalier P, Gaqui re C 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 182
- [4] Al-Sadi M, Fregonese S, Maneux C 2010 *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Austin, TX, United States, October 4–6, 2010 p216
- [5] Heinemann B, Barth R, Bolze D 2010 *IEEE International Electron Devices Meeting* San Francisco, CA, United States, December 6–8, 2010 p30.5.1.
- [6] Zhang J X, Guo H X, Guo Q, Wen L, Cui J W, Xi S B, Wang X, Deng W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 048501 (in Chinese)[张晋新, 郭红霞, 郭旗, 文林, 崔江维, 席善斌, 王信, 邓伟 2013 物理学报 **62** 048501]
- [7] Schroter M, Wedel G, Heinemann B 2011 *IEEE Trans. Electr. Dev.* **58** 3687
- [8] Chevalier P, Barbalat B, Rubaldo L 2005 *Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Santa Barbara, CA, United States, October 9–11, 2005 p120
- [9] Dacquay E, Tomkins A, Yau K H K, Laskin E, Chevalier P, Chantre A, Sautreuil B, Voinigescu S P 2012 *IEEE Trans. Microw. Theory* **60** 813
- [10] Chevalier P, Raya C, Vandelle B 2006 *Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Maastricht, Netherlands, September 10–13, 2006 p1
- [11] Mertens H, Magnee P H C, Donkers J J T M 2011 *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Atlanta, GA, United States, October 9–11, 2011 p158
- [12] Yuan J H, Cressler J D 2011 *IEEE Trans. Electr. Dev.* **58** 1655
- [13] Al Hadi R, Grzyb J, Heinemann B, Pfeiffer U R 2013 *IEEE J. Solid. St. Circ.* **99** 1
- [14] Xu X B, Zhang H M, Hu H Y, Xu L J, Ma J L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078502 (in Chinese) [徐小波, 张鹤鸣, 胡辉勇, 许立军, 马建立 2011 物理学报 **60** 078502]
- [15] Grujic D, Savi c M, Bing l C, Saranovac L 2012 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **22** 194
- [16] Peng C, Dahlstrom M, Liu Q Z 2011 *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Atlanta, GA, United States, October 9–11, 2011 p154
- [17] Luther-King N, Sweet M, Narayanan E M S 2012 *IEEE Trans. Power Electr.* **27** 3072
- [18] Nakajima A, Sumida Y, Dhyani M H, Kawai H, Narayanan E M S 2011 *IEEE Electron Dev. Lett.* **32** 542
- [19] Yang Y T, Geng Z H, Duan B X, Jia H J, Yu C, Ren L L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 566 (in Chinese) [杨银堂, 耿振海, 段宝兴, 贾护军, 余潞, 任丽丽 2010 物理学报 **59** 566]
- [20] Wu W, Zhang B, Fang J, Luo X R, Li Z J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 068501
- [21] Luther-King N, Sweet M, Narayanan E M S 2012 *IEEE Trans. Power Electr.* **27** 3072
- [22] Gao Y, Liu J, Yang Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4635
- [23] Osten H J 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 2716

# Mechanism and characteristic analysis and optimization of SiGeC heterojunction bipolar transistor with super junction\*

Liu Jing<sup>†</sup> Guo Fei Gao Yong

(Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

( Received 24 September 2013; revised manuscript received 31 October 2013 )

## Abstract

A novel SiGeC heterojunction bipolar transistor (HTB) with super junction is presented. The effects of SiGeC base and super junction on device performance are analyzed in detail, and current transport mechanism of novel device is studied. Based on SiGeC/Si heterojunction technology, the high frequency characteristic of the novel device can be excellent. The breakdown voltage of device is improved greatly, because of two-dimensional direction of the electric field distribution in the collector region. The results show that the breakdown voltage of SiGeC HBT with super junction is increased by 48.8%, compared with that without super junction. More importantly, the introduction of super junction changes neither the high current gain nor the high frequency characteristics of SiGeC HBT. Compared with the Si bipolar transistor (BJT) with the same parameters, the novel device has a current gain that increases 10.7 times, and its cutoff frequency and maximum oscillation frequency are also improved greatly. A good trade-off is achieved among high current gain, high frequency and high breakdown voltage, in the novel SiGeC HBT with super junction. The layers and width of column region are designed to be optimal. With the increase in the number of column region layers, the breakdown voltage of the novel device is increased significantly, the current gain is improved somewhat, and the cutoff frequency and maximum oscillation frequency are reduced slightly. Taken together, the pnpn four-layer structure of super junction region is reasonable.

**Keywords:** SiGeC, super junction, heterojunction bipolar transistor

**PACS:** 85.30.Pq, 85.30.De, 73.40.Lq

**DOI:** 10.7498/aps.63.048501

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61204094), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20106118120003), and the Specialized Scientific Research of the Education Bureau of Shaanxi, China (Grant No. 11JK0924).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jingliu@xaut.edu.cn](mailto:jingliu@xaut.edu.cn)