

# p 型重掺杂应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区内建电场的物理机制

赵传阵<sup>†</sup> 唐吉玉 文于华 吴靛臻 孔蕴婷

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 采用解析的方法计算了在基区掺杂为高斯分布, Ge 组分分布为三角形分布和矩形三角形分布时基区内建电场的变化情况. 重新拟合了价带有效态密度公式, 并在计算内建电场时考虑了导带有效态密度的影响. 发现加入 Ge 组分后引起的导带有效态密度变化、价带有效态密度变化以及禁带宽度变窄量变化对基区内建电场的影响要大于掺杂对内建电场的影响. Ge 组分为三角形分布时, 在总的 Ge 组分一定的条件下, 内建电场从发射结到集电结逐渐变大. 在任一给定位置  $x$  处, 内建电场随着 Ge 组分的增加而增大. 当 Ge 组分分布为矩形三角形分布时, 对于给定的 Ge 组分转折点  $x_1$ , 基区内建电场从发射结到集电结缓慢地增大. 在 Ge 组分恒定的区域, 内建电场变化甚微, 在 Ge 组分为线性缓变区域的同一位置  $x$  处, 内建电场随 Ge 组分转折点  $x_1$  的增大而缓慢地增大. 此外, 在  $x_1$  附近内建电场变化有一个很大的陡坡.

**关键词:** 硅锗合金; 内建电场; 三角形 Ge 分布; 矩形三角形 Ge 分布; 高斯分布

EEACC: 2520; 2560F

中图分类号: TN 322.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0873-05

## 1 引言

近年来, 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料由于其电子迁移率高, 禁带宽度通过 Ge 组分变化任意可调等优点, 受到了专家和学者的广泛重视. 基区内建电场是影响基区少子渡越时间的重要因素. 适当的 Ge 组分分布, 能在基区内引入一个少子加速电场, 大大减小基区渡越时间, 从而显著提高器件的截止频率和速度. 关于 p 型重掺杂应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层内建电场的物理机制, 孔德义等人<sup>[1]</sup>做了有意义的探讨. 但由于选择的参数局限于当时的研究成果, 取得不够精确, 且随着半导体器件的飞速发展, 其基区尺寸也发生了很大变化, 所以孔德义等人<sup>[1]</sup>的计算结果与当前 p 型重掺杂应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  基区内建电场误差较大. 本文在前人工作的基础上, 对模型参数进行了修订, 从而得到了更为合理的基区内建电场变化情况, 并在此基础上作了讨论.

## 2 物理模型

### 2.1 基区掺杂分布

$\text{SiGe}$  HBT 基区掺杂分布一般有均匀、指数和高斯三种分布, 大多数人采用的基区掺杂为均匀分布和指数分布. 与指数分布相比, 实际晶体管的掺杂

更偏近于高斯分布<sup>[2]</sup>, 高斯分布可表示为:

$$N_b(x) = N_0 \exp[-(x/W_b)^2 \ln(N_0/N_{bc})] \quad (1)$$

### 2.2 基区 Ge 组分分布

基区中的 Ge 组分分布的形式有矩形、三角形、梯形、变换三角形、矩形三角形和中部倾斜分布. 目前普遍讨论 Ge 组分分布是三角形分布和矩形三角形分布, 并且 Ge 组分分布为矩形三角形时可以得到最小的基区渡越时间<sup>[3]</sup>, 基于上述原因, 本文只讨论 Ge 组分分布为三角形分布和矩形三角形分布时基区内建电场的变化情况, 其 Ge 组分分布  $y$  的表达式可表示为:

$$y = \begin{cases} y_0, & 0 \leq x < x_1 \\ y_0 + \frac{(y_c - y_0)(x - x_1)}{W_b - x_1}, & x_1 \leq x < W_b \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 $N_c$ 和 $N_v$ 的计算

导带有效态密度选用文献[4]中的(1~3)式.

在应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金中, 应变使三度简并的价带分裂为重空穴带、轻空穴带和自旋-轨道分裂能带. 随着 Ge 组分的增大, 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金中的有效质量、轻空穴带与重空穴带能量差以及自旋轨道分裂能带与价带边的能量差发生变化, 使得价带有效态密度变小. 考虑到以上因素的影响, 结合文献[4~6], 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  价带有效态密度可表示为:

<sup>†</sup> 通信作者. Email: as3262001@yahoo.com.cn

2006-11-17 收到, 2006-12-22 定稿

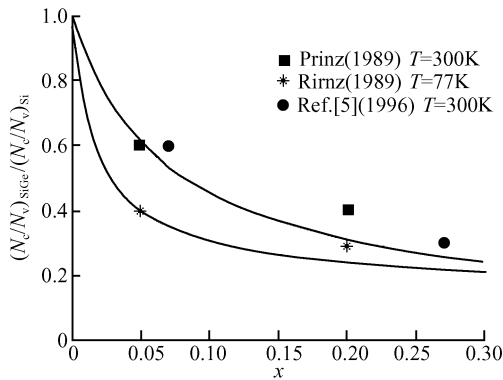


图 1  $T = 300\text{K}$  和  $T = 77\text{K}$  时, 归一化的  $(N_c N_v)_{\text{SiGe}} / (N_c N_v)_{\text{Si}}$  与 Ge 组分  $x$  的关系

Fig. 1 Normalized  $(N_c N_v)_{\text{SiGe}} / (N_c N_v)_{\text{Si}}$  as a function of Ge fraction

$$(N_v)_{\text{SiGe}} = 2 \times \left[ \frac{2\pi(m_{\text{HH}}^* + m_{\text{LH}}^* + m_{\text{so}}^*)k_{\text{B}}T}{h^2} \right]^{3/2} \times \left[ \frac{1 + 2\exp\left(\frac{E_{\text{LH}} - E_{\text{HH}}}{k_{\text{B}}T}\right) + \exp\left(\frac{-\Delta E_{\text{so}}}{k_{\text{B}}T}\right)}{2 + \exp\left(\frac{-\Delta E_{\text{so}}}{k_{\text{B}}T}\right)} \right] \quad (3)$$

根据文献[4,7]进行拟合,轻空穴、重空穴、自旋-轨道分裂有效质量与 Ge 组分的关系可表示为:

$$\frac{m_0}{m_{\text{HH}}^*} = \frac{1-y}{0.537} + \frac{y}{0.284}, \quad y \leq 0.3 \quad (4)$$

$$\frac{m_0}{m_{\text{LH}}^*} = \frac{1-y}{0.153} + \frac{y}{0.044}, \quad y \leq 0.3 \quad (5)$$

$$\frac{m_0}{m_{\text{so}}^*} = \frac{1-y}{0.234} + \frac{y}{0.095}, \quad y \leq 0.3 \quad (6)$$

轻空穴带与重空穴带能量差可表示为<sup>[4]</sup>

$$E_{\text{LH}} - E_{\text{HH}} = -0.155y(\text{eV}) \quad (7)$$

自旋轨道分裂能带与价带边的能量差可表示为:

$$\Delta E_{\text{so}} = \Delta_{\text{h}} - \Delta_{\text{s}} \quad (8)$$

$\Delta_{\text{h}}$  与  $\Delta_{\text{s}}$  的取值参见文献[8].

比较图 1 和文献[9]中的图 14,可以看出图 1 的结果与文献[5,10]中的实验值更为接近.由图 1 可以看出,当  $x = 0.05$  时,本文采用的公式与文献[10]给出的实验结果符合得很好.当  $x = 0.2$  时,其计算结果与文献[10]给出的实验结果相比偏低,当  $x = 0.07$ ,  $x = 0.27$  时,其计算结果与文献[5]给出的结果相比也偏低.这是由于文献[5,10]在对实验数据进行处理时忽略了 Si 和  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  有效质量的差异.在应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料中,有效质量随 Ge 组分的增大而变小,在 Ge 组分  $x$  很小时, Si 和  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  有效质量的差异不明显,所以在  $x = 0.05$  时两者得到的结果符合得很好,而在  $x = 0.2$ ,  $x = 0.27$  等位置时, Si 和  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  两者有效质量的差别变大,所以图 1 给出的  $(N_c N_v)_{\text{SiGe}} / (N_c N_v)_{\text{Si}}$  值小于忽略有

效质量差异时的值是合理的.

## 2.4 禁带宽度变窄量选取

禁带宽度窄变量包括两部分,一部分是由于 Ge 组分引起的禁带变窄量,另一部分是由于重掺杂引起的禁带变窄量.根据文献[11],对其中公式(3)进行处理,得到由 Ge 组分引起的禁带变窄量表达式:

$$\Delta E_{\text{g,Ge}} = 750y - 238y^2, \quad y < 0.3 \quad (9)$$

关于重掺杂禁带变窄效应,文献[12]给出了如下公式.

$$\Delta E_{\text{g,dop}} = A(1 + By + Cy^2 + Dy^3) \times$$

$$\left\{ \ln\left(\frac{N_{\text{b}}(x)}{N_{\text{A0}}}\right) + \sqrt{\ln\left(\frac{N_{\text{b}}(x)}{N_{\text{A0}}}\right)^2 + E} \right\}, \quad y < 0.3 \quad (10)$$

其中  $A = 9.0\text{meV}$ ;  $B = -4.43$ ;  $C = 23.47$ ;  $D = -39.11$ ;  $E = 0.5$ ;  $N_{\text{A0}} = 1.0 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ;  $N_{\text{b}}(x)$  为掺杂浓度.

## 3 计算结果与讨论

本征载流子浓度可表示为:

$$n_{\text{ic}}^2 = N_c N_v \exp\left(\frac{-E_{\text{g,Si}}(T)}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{g,Ge}}(x, T)}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{g,dop}}(x, N)}{kT}\right) \quad (11)$$

内建电场的计算可采用如下公式<sup>[13,14]</sup>

$$E(x) = \frac{kT}{q} \left\{ \left[ \frac{1}{N_{\text{b}}(x)} \times \frac{dN_{\text{b}}(x)}{dx} \right] - \left[ \frac{1}{n_{\text{ic}}^2} \times \frac{dn_{\text{ic}}^2}{dx} \right] \right\} \quad (12)$$

当忽略 SiGe 和 Si 之间导带和价带有效态密度的差别时,即:

$$n_{\text{ic}}^2 = n_{\text{i0}}^2 \exp\left(\frac{E_{\text{g,SiGe}}(x, T) + \Delta E_{\text{g,SiGe}}(x, N)}{kT}\right) \quad (13)$$

可将(15)式化简成如下形式:

$$E(x) = \frac{kT}{q} \times \frac{1}{N_{\text{b}}(x)} \times \frac{dN_{\text{b}}(x)}{dx} - \frac{1}{q} \times \frac{d(\Delta E_{\text{g,Ge}} + \Delta E_{\text{g,dop}})}{dx} \quad (14)$$

第一项是掺杂引起的自建电场,第二项是禁带宽度变窄引起的自建电场,这与文献[13,14]给出的各项解释相吻合.

其实在应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层中,导带有效态密度和价带有效态密度并非常数,文献[1]中便讨论了价带有效态密度为非常数时对自建电场的影响,由此可以认为既然价带有效态密度在不是常数时对自建电场的变化产生影响,那么导带有效态密度为非常数

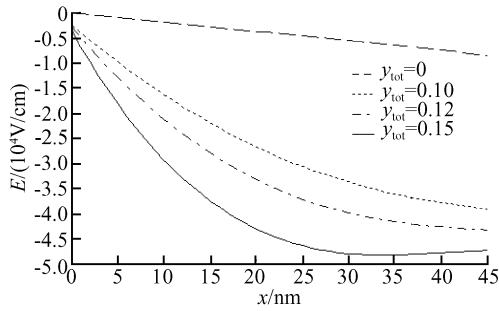


图2 基区内建电场的变化情况

Fig. 2 Variation of the built-in electric fields from emission junction to collector with the given total Ge fraction

时同样能对内建电场产生影响. 将(11)式代入(12)式中得:

$$E(x) = \frac{kT}{q} \left[ \frac{1}{N_b(x)} \times \frac{dN_b(x)}{dx} - \frac{1}{N_c} \times \frac{dN_c}{dx} - \frac{1}{N_v} \times \frac{dN_v}{dx} - \frac{1}{kT} \times \frac{d(\Delta E_{g,Ge} + \Delta E_{g,dop})}{dx} \right] \quad (15)$$

鉴于价带有效态密度(5)式过于复杂,我们在计算时取了(5)式一个很好的近似,采用了文献[12]中的(4)式,即:

$$(N_v)_{SiGe} = 1.79 \times 2 \left[ \frac{2\pi(m_{HH}^* + m_{LH}^*)k_B T}{h^2} \right]^{3/2} \times \left[ \frac{1 + 2\exp(E_{LH} - E_{HH})}{3} \right] \quad (16)$$

1.79 为修正因子,其中<sup>[8]</sup>

$$E_{LH} - E_{HH} = -0.155x \text{ (eV)} \quad (17)$$

$$\frac{m_0}{m_{HH}^*} = \frac{1-x}{0.336} + \frac{x}{0.210}, \quad x \leq 0.3 \quad (18)$$

$$\frac{m_0}{m_{LH}^*} = \frac{1-x}{0.234} + \frac{x}{0.141}, \quad x \leq 0.3 \quad (19)$$

Ge 组分分布为三角形分布的内建电场计算所采用的参数:  $W_b = 45\text{nm}$ ,  $N_0 = 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_{bc} = 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ,  $y_0 = 0$ ,  $T = 300\text{K}$ .

图2为基区内建电场的变化情况. 从图2可以看出加入了三角形分布的Ge组分后,基区内建电场有了大幅度提高,说明加入Ge组分后引起的导带有效态密度变化、价带有效态密度变化以及禁带宽度变窄量变化对基区内建电场的影响要大于掺杂对内建电场的影响. 在任一给定的  $x$  位置处,随着总Ge组分  $y_{tot}$  的增加,内建电场逐渐变大. 这表明在Ge组分为三角形分布时,适当提高总Ge组分  $y_{tot}$ ,可以加速少数通过基区,减小基区渡越时间,从而提高器件的工作速度. 这与文献[15]的结论是一致的. 在  $y_{tot}$  一定的条件下,内建电场从发射结到集电结逐渐增大,但是增加的速度逐渐减慢. 图3为根据文献[13,14]中的内建电场模型(即本文中的(14)

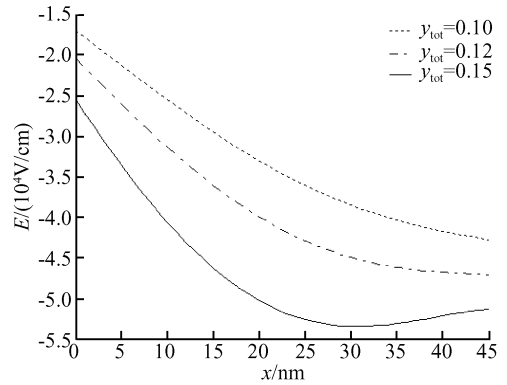


图3 忽略 SiGe 和 Si 之间导带和价带有效态密度的差别时,基区内建电场的变化情况

Fig. 3 Variation of the built-in electric fields from emission junction to collector with the given total Ge fraction which is not considered the difference of valence band effective states and conduction band effective states between SiGe and Si

式)计算得到的结果. 比较图2和图3,两者得到的定性结论基本上是一致的. 但是在  $y_{tot} = 0.15$  时,图2的结果在靠近集电结附近比图3的结果更符合基区内建电场的变化趋势. 这也在某种程度上验证了计算内建电场需要考虑导带有效态密度和价带有效态密度的影响. 由图2得出的结论与由文献[1]中图6得出的定性结论有所不同. 原因如下: (1) 文献[1]考虑了空穴浓度再分布对内建电场的影响,但是关于空穴浓度再分布对内建电场影响的讨论并没有建立在对基区掺杂分布优化设计(从发射结到集电结逐渐降低)的基础上. (2) 由文献[1]中图6得出的定性结论中只考虑了由Ge组分引起的禁带宽度变窄量对内建电场的影响,没有考虑由重掺杂引起禁带变窄量对内建电场的影响. (3) 由文献[1]中图6得出的定性结论只考虑了价带有效态为非常数时的影响,没有考虑导带有效态密度对内建电场的影响. 此外,从数量上分析,由文献[13,14]中的内建电场模型得到的计算结果与由本模型得到的计算结果相比偏大. 在场强高达  $10^4\text{V/cm}$  时,需要考虑电场对迁移率的影响<sup>[13]</sup>. 尽管根据文献[16]中的电子迁移率公式,由本模型计算得到的电子迁移率要比根据文献[13]得到的电子迁移率大. 但是由本模型计算得到的基区电子漂移速度仍然小于根据文献[13]得到的电子漂移速度. 若把本模型带入到文献[13]中的基区渡越时间模型,则由本模型计算得到的基区渡越时间数据应该比根据文献[17]得到的基区渡越时间数据大,比根据文献[13]得到的基区渡越时间数据稍大. 即与文献[13]相比,计算得到的器件截止频率略有降低,工作速度有所减慢.

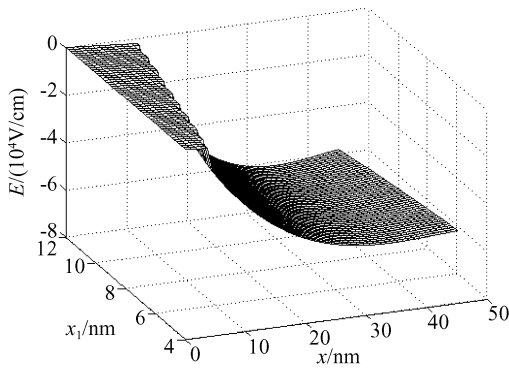


图 4 在不同的 Ge 组分转折点  $x_1$  下,  $y_c = 0.30$  时基区内建电场的变化情况

Fig. 4 Variation of the built-in electric fields from emission junction to collector with the given Ge fraction ( $y_c = 0.30$ )

Ge 组分分布为矩形三角形分布的内建电场的计算所采用的参数为:  $W_b = 45\text{nm}$ ,  $N_0 = 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_{bc} = 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ,  $y_0 = 0.01$ ,  $y_c = 0.30$ ,  $T = 300\text{K}$ .

从图 4 可以看出,当 Ge 组分分布为矩形三角形分布时,在给定 Ge 分布转折点  $x_1$  的情况下,基区内建电场从发射结到集电结逐渐变大.在 Ge 组分恒定的区域,内建电场变化甚微,在 Ge 组分为线性变化的区域,同一给定的  $x$  位置处,内建电场随 Ge 组分转折点  $x_1$  的增大而缓慢地增大.此外,在 Ge 组分转折点  $x_1$  处,内建电场变化有一个很大的陡坡,这是由 Ge 组分分布梯度突变造成的.有关 Ge 组分分布矩形三角形分布时内建电场与基区少子渡越时间相互关系的定性讨论可参考文献[3].

## 4 结论

在文献[1,13,14]的基础上,详细讨论了在基区掺杂为高斯分布的条件下,Ge 组分分布为三角形和矩形三角形时基区内建电场的变化情况.在考虑了价带有效态密度和导带有效态密度的影响后,基区内建电场有所降低,器件的截止频率略有下降.这较文献[1,13,14]有一定的改进和深入,得出的结论对器件设计有一定的指导意义.

## 参考文献

[1] Kong Deyi, Wei Tongli, Li Yao, et al. Physical mechanism and simulations of base built-in electric field for SiGe base HBT with a linearly graded Ge profile. *Research & Progress of SSE*, 1999, 19(3): 254 (in Chinese) [孔德义, 魏同立, 李焱, 等. HBT 中基区内建电场的物理机制及其理论分析. *固体电子学研究与发展*, 1999, 19(3): 254]

[2] Zareba A, Lukasiak L, Jakubowski A. Modeling of SiGe-base heterojunction bipolar transistor with Gaussian doping distri-

bution. *Solid-State Electron*, 2001, 45: 2029

[3] Su Wenyong, Li Rui, Shao Bin. Base transit time of Si/SiGe heterojunction bipolar transistor. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(6): 522 (in Chinese) [苏文勇, 李蕊, 邵彬. SiGe 异质结双极晶体管基区渡越时间分析. *北京理工大学学报*, 2005, 25(6): 522]

[4] Zhang Wanrong, Zeng Zheng, Luo Jinsheng. Analytical calculations of intrinsic carrier concentration and effective densities in strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers. *Research & Progress of SSE*, 1996, 16(4): 314 (in Chinese) [张万荣, 曾峥, 罗晋升. 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  本征载流子浓度和有效态密度解析计算. *固体电子学研究与发展*, 1996, 16(4): 314]

[5] Matutinovic K Z, Venkataraman V, Prinz E J, et al. Base resistance and effective bandgap reduction in NPN Si/SiGe/Si HBTs with heavily base doping. *IEEE Trans Electron Devices*, 1996, 43: 457

[6] Bulfer F M, Meinerzhagen B, Fischer G, et al. Hole transport investigation in unstrained and strained SiGe. *J Vac Sci Technol*, 1998, B16: 1667

[7] Kasper E. Properties of strained and relaxed silicon germanium. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 151 (in Chinese) [Kasper E. 锗硅的性质. 北京: 国防工业出版社, 2002: 151]

[8] Zhang Wanrong, Li Zhiguo, Luo Jinsheng, et al. Carrier freeze-out in strained p- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(11): 51 (in Chinese) [张万荣, 李志国, 罗晋升, 等. 应变 p 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层中载流子冻析. *电子学报*, 1998, 26(11): 51]

[9] Jain S C, Decoutere S, Willander M, et al. SiGe HBTs for application in BiCOMS technology: I stability, reliability and material parameters. *Semicond Sci Technol*, 2001, 16: R51

[10] Prinz E J, Garone P M, Schwartz P V, et al. The effect of base emitter spacers and strain dependent densities of states in Si/Si $_{1-x}$ Ge $_x$ /Si heterojunction bipolar transistors. *Proc IEDM*, 1989: 639

[11] Eberhardt J, Kasper E. Bandgap narrowing in strained SiGe on the basis of the electrical measurements on Si/SiGe/Si hetero bipolar transistors. *Mater Sci Eng*, 2002, B89: 93

[12] Zhao Chuanzhen, Tang Jiyu, Wen Yuhua, et al. The intrinsic carrier concentration of strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers as a function of Ge fraction temperature and impurity concentration. *Research & Progress of SSE*, to be accepted (in Chinese) [赵传阵, 唐吉玉, 文于华, 等. 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层中本征载流子浓度的计算. *固体电子学研究与发展*, 已接收]

[13] Lin Dasong, Zhang Heming, Dai Xianying, et al. A model of base transit time of SiGe HBT. *Journal of Xidian University*, 2001, 28(4): 456 (in Chinese) [林大松, 张鹤鸣, 戴显英, 等. SiGe HBT 基区渡越时间模型. *西安电子科技大学学报*, 2001, 28(4): 456]

[14] Zhang Heming, Dai Xianying, Lin Dasong, et al. Optimization of the base Ge composition profile for base transit time minimization in the SiGe heterojunction bipolar transistor. *Journal of Xidian University*, 2006, 27(3): 305 (in Chinese) [张鹤鸣, 戴显英, 林大松, 等. SiGe HBT 基区渡越时间与基区 Ge 组分剖面优化. *西安电子科技大学学报*, 2006, 27(3): 305]

[15] Zhang Wanrong, Li Zhiguo, Guo Weiling, et al. Optimization of design for Si/SiGe/Si HBTs. *Semiconductor Technology*, 1998, 23(4): 13 (in Chinese) [张万荣, 李志国, 郭威玲, 等. Si/SiGe/Si HBT 的优化设计. *半导体技术*, 1998, 23(4): 13]

[16] Kwok K H. Analytical expressions of base transit time for SiGe HBTs with retrograde base profiles. *Solid-State Elec-*

tron, 1999, 43(2):275  
[17] Patri V S, Kumar M J. Profile design considerations for mini-

mizing base transit time in SiGe HBTs. IEEE Trans Electron  
Devices, 1998, 45(8):1725

## Physical Mechanism of the Built-In Electric Field for SiGe HBT with Heavy p-Doping

Zhao Chuazhen<sup>†</sup>, Tang Jiyu, Wen Yuhua, Wu Liangzhen, and Kong Yunting

(College of Physics and Telecommunication, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A model for the built-in electric field in the base is developed and calculated analytically. The model is suitable for a base with a Gaussian doping distribution and different Ge profiles (e.g., triangle, box-triangle). A new formula for the valence band effective states is obtained, and the effect of the conduction band effective states on the built-in electric field is considered for the first time. It is found that the effect of the Ge fraction on the built-in electric field is larger than that of impurities. When the Ge fraction profile is triangular, the built-in electric field increases gradually from emission to collector with the total Ge fraction. At a given location  $x$ , the built-in electric field becomes larger and larger with the increasing of the total Ge fraction. When the Ge fraction profile is box-triangular, the built-in electric field increases from emission junction to collector for a given  $x_1$  and a given Ge fraction  $y_c$ . For an invariable Ge fraction profile, the built-in electric field is nearly invariable. For a linearly graded Ge fraction profile, the built-in electric field becomes larger and larger with the increasing of  $x_1$ . In addition, there is a sharp drop near  $x_1$ .

**Key words:** SiGe alloy; built-in electric field; triangular Ge profile; box-triangular Ge profile; Gaussian doping distribution  
**EEACC:** 2520; 2560F

**Article ID:** 0253-4177(2007)06-0873-05

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: as3262001@yahoo.com.cn

Received 17 November 2006, revised manuscript received 22 December 2006