

超薄基区 SiGe HBT 电流传输模型

李 垚 孔德义 魏敬和 许居衍

(东南大学无锡应用科学与工程研究院 无锡 214071)

摘要 从玻尔兹曼方程出发,分析了 SiGe HBT 超薄基区中载流子温度,扩散系数等参量的变化,建立了不同于常规基区宽度的新的超薄基区 SiGe HBT 电流传输模型.

关键词: HBT, 电流传输, SiGe

PACC: 6600, 7200, 0560; **EEACC:** 2560J

文章编号: 0253-4177(2000)01-0097-05

Base Transport Model for Ultra-Thin-Base SiGe HBT

LI Yao, KONG De-yi, WEI Jing-he, XU Ju-yan

(Wuxi Research Institute of Applied Science and Engineering of Southeast University, Wuxi 214071, China)

Received 27 July 1998, revised manuscript received 25 March 1999

Abstract According to the exact solution of Boltzmann equation, the characteristics of parameters such as carrier temperature and diffusion coefficient in ultra-thin base of SiGe HBT are analyzed. And a new model of base transport in SiGe HBT different from traditional one is founded.

Key Words: HBT, Transport, SiGe

PACC: 6600, 7200, 0560; **EEACC:** 2560J

Article ID: 0253-4177(2000)01-0097-05

1 引言

微电子器件进入深亚微米级,伴随着横向尺寸的减小,纵向尺寸亦应按比例减小,其中基区宽度为双极器件中影响器件性能的一至关重要的因素.当基区宽度薄至可与载流子平均自由程相比拟时,载流子在基区中运输时碰撞将大为减少,传统的 DDM 模型需被更为精确的 HDM 或 BTM 模型所取代,弹道效应等非平衡效应将会出现^[1-3].

MBE 及 UVH/CVD 技术的出现使基区宽度的进一步降低成为可能,而超薄基区宽度要求更高的基区

李 垚 男,1968 年出生,博士,副研究员,从事 SiGe 器件和电路研究.

孔德义 男,1966 年出生,博士生,从事 SiGe 器件和电路研究.

1998-07-27 收到,1999-03-25 定稿

掺杂,这使得普通硅器件由于电流增益等的限制难以满足要求.而 SiGe HBT 基于传统的硅工艺,利用能带工程使得基区掺杂浓度的提高和器件其他性能的提高同时成为可能,因而是超薄基区硅基器件的最佳选择.

本文从玻尔兹曼方程出发,分析了 SiGe HBT 超薄基区中载流子温度,扩散系数等参量的变化,建立了不同于常规基区宽度的新的超薄基区 SiGe HBT 电流传输模型,该模型适用于任意掺杂浓度分布,对超薄基区 SiGe HBT 器件模拟及优化设计具有指导意义.

2 载流子温度

当基区宽度很薄时,载流子在基区中传输为非平衡传输,其平均能量将高于平衡值,也就是说,有效载流子温度 T_e 将高于晶格温度 T ,满足如下能量平衡方程^[1]:

$$\frac{dT_e(x)}{dx} + \frac{T_e(x) - T}{\lambda_e} + \frac{2}{5} \frac{q}{k} E(x) = 0 \quad (1)$$

式中能量弛豫长度 λ_e 假定为常数 65nm.

在稳态情况下($dT_e/dx = 0$),方程解简化为

$$\overline{T_e} = T + \frac{2q\lambda_e}{5k} \cdot E \quad (2)$$

根据该模型可得 $\overline{T_e}/T$ 随 Ge 梯度,温度 T 以及基区宽度 W_B 的变化如图 1 和图 2 所示.图中假定基区中硼均匀掺杂,锗线性分布,则电场 E 为均匀电场,可表示为

$$E = \frac{\Delta E_{g, \text{grade}}}{qW_B} = \frac{ay_{\text{grade}}}{qW_B} \quad (3)$$

式中 $\Delta E_{g, \text{grade}} = \Delta E_g(W_B) - \Delta E_g(0)$ 为基区两边禁带变窄量之差, $y_{\text{grade}} = y(W_B) - y(0)$ 为锗百分含量梯度, $a = 8.7\text{meV}$.

可以看出,基区宽度越薄,载流子温度越脱离其平衡值,且低温下更加明显.

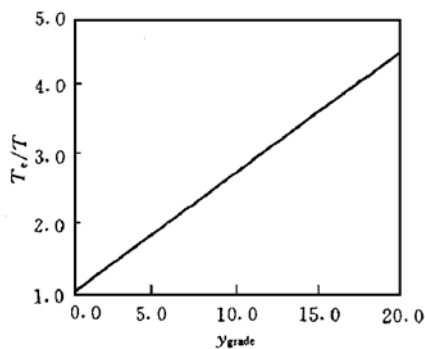


图 1 300K 下 $\overline{T_e}/T$ 随 Ge 梯度的变化 ($W_B = 50\text{nm}$)

FIG. 1 $\overline{T_e}/T$ versus Ge Gradient at 300K ($W_B = 50\text{nm}$)

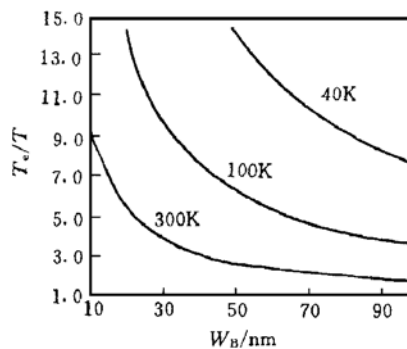


图 2 300K 下 $\overline{T_e}/T$ 随基区宽度 W_B 及温度 T 的变化 ($y_{\text{grade}} = 10$)

FIG. 2 $\overline{T_e}/T$ versus Base Width W_B and Temperature T at 300K ($y_{\text{grade}} = 10$)

3 有效扩散系数

从玻尔兹曼方程精确解出发,载流子在超薄基区中满足与漂移扩散方程不同的扩散流形式,其扩散系数 D_0 变为^[2]

$$D(w) = \frac{D_0 \xi(w)}{\delta(w)} \quad (4)$$

其中 $D(w)$ 为有效扩散系数, $w = W_B/l_p$, l_p 为载流子平均自由程, 系数 $\xi(w)$ 和 $\delta(w)$ 表示见文献[2].

载流子平均自由程 l_p 可表示为^[3]

$$l_p = 3D_0/2v_T \quad (5)$$

其中热速度 $v_T = \sqrt{2kT/\pi m^*}$, $D_0 = \frac{kT}{q} \mu$.

对于基区中电子迁移率 μ_n , 其与有效质量 m^* 的关系, 当合金散射为主时, $\mu_n \propto (m^*)^{-1}$; 而当电离杂质散射为主时, $\mu_n \propto (m^*)^{-1/2}$, 这种近似在高掺杂浓度下是成立的^[4]. 所以当 $N_B > 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时, $\mu_{n, \text{SiGe}}/\mu_{n, \text{Si}} \approx (m_{\text{Si}}^*/m_{\text{SiGe}}^*)^{1/2}$. 因此由(5)式可得 l_p 仅与 T 有关. 在同样的温度下, $l_{p, \text{SiGe}} \approx l_{p, \text{Si}}$. 图 3 为 $N_B = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时, $l_{p, \text{SiGe}}$ (或 $l_{p, \text{Si}}$) 随温度的变化. 在低温下, 平均自由程变大, 载流子碰撞几率减小, 非平衡效应愈加明显.

图 4 为 $D(w)/D_0$ 在不同温度下随 W_B 的变化.

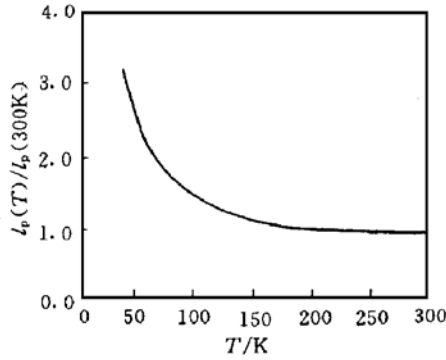


图 3 l_p 随温度的变化

$$N_B = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}.$$

FIG. 3 Variation of l_p with Temperature
($N_B = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)

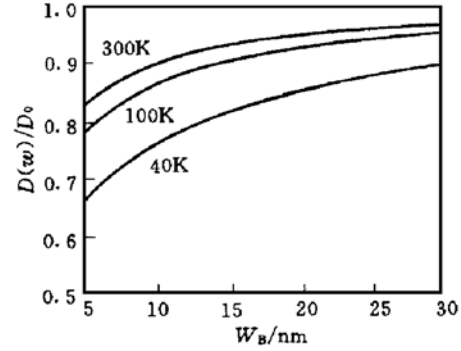


图 4 $D(w)/D_0$ 在不同温度下
随 W_B 的变化

FIG. 4 Variation of $D(w)/D_0$ with W_B
at Different Temperatures

4 电流传输模型

HDM 模型的电流传输方程为:

$$J_n = nq\mu_n E + q\mu_n \left[n \frac{kT_c}{q} \right] \Delta \quad (6)$$

对于稳态情况, $T_c = 0$, 则

$$J_n = nq\mu_n E + kT_c \mu_n \Delta n = -n\mu_n \frac{d}{dx} E_n \quad (7)$$

同理,

$$J_p = -p\mu_p \frac{d}{dx} E_p \quad (8)$$

式中 E_n, E_p 为准费米能级, J_p 小至可忽略, 因此

$$J_n = -n\mu_n \frac{d}{dx} (E_n - E_p) \quad (9)$$

此外,

$$np = n_i^2 \exp[(E_n - E_p)/kT_c] \quad (10)$$

可以推得

$$\frac{d}{dx}(np/n_i^2) = - (J_n/q)(p/(D(w)n_i^2)) \quad (11)$$

对上式在 $[0, W_B]$ 间积分(基区):

$$- J_n/q \int_0^{W_B} \frac{p}{D(w)n_i^2} dx = - \exp(qV_{BE}/(kT_c)) \quad (12)$$

$$J_n = \frac{q \exp(qV_{BE}/(kT_c))}{\int_0^{W_B} \frac{p}{D(w)n_i^2} dx} \quad (13)$$

上式与从 DDM 模型出发推导出的结果^[5]形式一致,可适用于任意掺杂浓度分布,不同的是考虑了 HDM 和 BTM 模型,公式中的参数被赋予了新的意义。
式中

$$n_i^2 = n_{i0}^2 \exp(\Delta E_g/(kT_c)) \quad (14)$$

ΔE_g 为基区重掺杂和 Ge 含量共同引起的禁带变窄^[5]。本征载流子浓度

$$n_{i0}^2 = N_c N_v \exp(-E_g/(kT_c)) \quad (15)$$

假定基区硼均匀掺杂,则式(13)简化为

$$J_n = \frac{qn_{i0}^2 D(w) \exp(qV_{BE}/(kT_c))}{N_B \int_0^{W_B} \exp(-\Delta E_g/(kT_c)) dx} \approx J_C \quad (16)$$

根据 DDM 模型推导出的 J_n 可表示为

$$J_n = \frac{qn_{i0}^2 D_0 \exp(qV_{BE}/(kT))}{N_B \int_0^{W_B} \exp(-\Delta E_g/(kT)) dx} \quad (17)$$

图 5 为由式(13)、(16)计算出的 J_C-V_{BE} 曲线及与原模型(式(17))的比较。($N_B = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $W_B = 20 \text{nm}$, $y_{\text{grade}} = 10$, $(N_c N_v D_0)_{\text{SiGe}} / (N_c N_v D_0)_{\text{Si}} = C \approx 0.4^{[6]}$)

由此可以看出:考虑超薄基区非平衡效应, J_C-V_{BE} 关系偏离原指数曲线,斜率减小,这是载流子温度和有效扩散系数变化共同作用的结果。

图 6 为电子电流密度 J_n 与基区宽度 W_B 的关系($T = 300 \text{K}$, $V_{BE} = 0.8 \text{V}$, $N_B = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, Ge 均匀掺杂,含量为 15%)。曲线 1 为原模型, J_n 正比于 $1/W_B$; 曲线 2 为新建模型,可以看出, J_n 与 $1/W_B$ 偏离了线性关系。实际上,在热离子发射极限下, $J_n = nqV_R$, 与 W_B 无关。

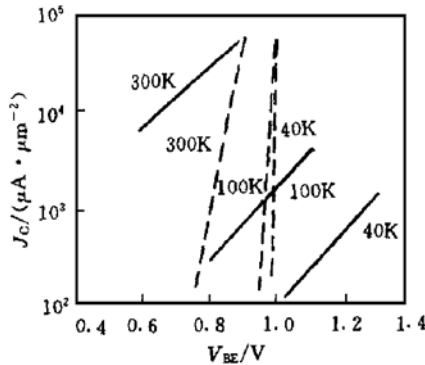


图 5 不同温度下 J_C-V_{BE} 曲线
及与原模型(虚线)的比较
FIG. 5 J_C versus V_{BE} at Different
Temperatures and Comparison with
Conventional Model
(Dashed Lines)

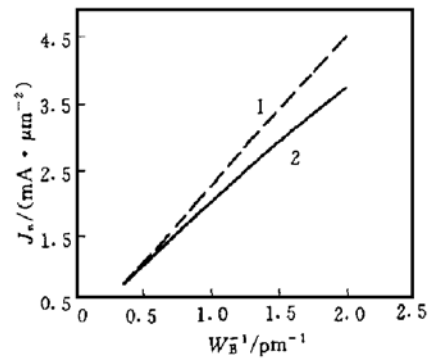


图 6 电子电流密度 J_n 与基区宽度
 W_B 的关系
FIG. 6 Electrical Current Density J_n
Base Width W_B

5 结论

1. 根据 HDM 或 BTM 模型, 分析了 SiGe HBT 超薄基区中载流子温度、扩散系数随基区宽度、温度等的变化. 可以看出, 基区宽度越薄, 载流子温度及有效扩散系统越脱离其平衡值, 且低温下更加明显.

2. 建立了考虑非平衡效应的新的超薄基区 SiGe HBT 电流传输模型, 并与传统模型进行了比较. 发现新模型偏离了原 J_C 与 V_{BE} 的指数关系.

参 考 文 献

- [1] G. B. Hong and J. G. Fossum, IEEE Trans. Electron Devices, 1995, **42**(6): 1166~ 1173.
- [2] A. A. Grinberg and S. Luryi, Solid-State Electronics, 1992, **35**(9): 1299~ 1309.
- [3] D. M. Richey, A. J. Joseph *et al.*, Solid-State Electronics, 1996, **39**(6): 785~ 789.
- [4] J. M. McGregor, S. C. Jain and D. J. Roulston, Solid-State Electronics, 1991, **34**(9): 1019~ 1021.
- [5] T. C. Lu, H. P. Chen and J. B. Kuo, Solid-State Electronics, 1993, **36**(9): 1313~ 1320.
- [6] J. W. Slotboom, G. Streutker *et al.*, IEEE Electron Device Lett., 1991, **12**(9): 486~ 488.