

基区复合对 $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/n\text{Si}$ 晶体管 共射极电流增益的影响*

安俊明 李建军 魏希文

(大连理工大学物理系半导体教研室 大连 116023)

沈光地 陈建新 邹德恕

(北京工业大学电子工程系 北京 100022)

摘要 采用二维数值模拟方法详细分析了基区复合电流对 $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/n\text{Si}$ 应变基区异质结双极晶体管(HBT)共射极电流放大系数 β 的影响,给出了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 的 Gummel 图、平衡能带图. 得出在靠近发射结附近基区的复合电流是引起 β 下降的主要因素,并给出了减小基区复合电流的 Ge 分布形式

EEACC: 0290, 2560J

1 引言

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变基区异质结双极晶体管(HBT)是一种共射极电流增益高、频率特性好、与现代 Si 工艺相兼容的新型器件. 自从八十年代末期用分子束外延方法首次制造 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 以来^[1], 科研工作者们为改善其性能从理论、实验上进行了广泛的研究^[2,3]. 然而实验发现,与 Si 双极晶体管(BJT)相比, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 在提高增益的同时,基极电流也比 SiBJT 的高,其共射极增益并没有 Hara me 等人理论预言的随基区 Ge 百分比含量增加呈指数增大^[4],这就限制了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 增益的进一步提高. 对这一现象虽有一些解释^[5,6],但都是定性分析. 本文首次采用二维数值模拟方法定量分析了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 基极电流增大的原因,并提出了降低基极电流的 Ge 分布形式,进而为制备高性能的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT 提供理论指导.

2 器件模型

模型方程由电子、空穴连续性方程及泊松方程组成. 在二维稳态情形下,可略去与时间

* 国家自然科学基金资助项目

安俊明 男, 1969 年出生, 硕士研究生, 主要从事半导体器件的计算机模拟

李建军 男, 1966 年出生, 讲师, 主要从事新材料和新器件的计算机模拟

魏希文 女, 1936 年出生, 教授, 主要从事新材料在半导体器件中的应用和物理方面的研究

1997-11-21 收到, 1998-03-02 定稿

有关的项, 于是 Si_{1-x}Ge_x HBT 的模型方程为:

$$-\frac{1}{q} \nabla J_n - R + G = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{q} \nabla J_p - R + G = 0 \quad (2)$$

$$\nabla(\mathcal{E}) = p - n + (N_d^+ - N_a^-) \quad (3)$$

其中 n, p, E 分别为电子、空穴载流子浓度和电场强度; G, R 为电子、空穴的产生项和复合项; $N_d^+ - N_a^-$ 为离化的净掺杂浓度; ϵ 为介电常数, 随 Ge 百分比含量 x 线性变化^[2]. J_n, J_p 分别为电子、空穴电流密度矢量:

$$J_n = -qn\mu_n \nabla(V + V_n) + qD_n \nabla n \quad (4)$$

$$J_p = -qp\mu_p \nabla(V - V_p) + qD_p \nabla p \quad (5)$$

其中 J_n, J_p 中电势考虑了由于异质结禁带宽度变化、导带和价带有效状态密度变化所引起的附加电子电势 V_n 和空穴电势 V_p ^[7], 且忽略了导带的不连续^[2], 认为禁带的不连续主要发生在价带边

有关物理量的意义及选取方法分别为:

(1) μ_n, μ_p 分别为电子、空穴的迁移率. Si_{1-x}Ge_x 合金应变层的 μ_n 采用了 Manku 等人的计算方法^[8], μ_p 采用文献[9]中的经验公式

(2) Si_{1-x}Ge_x 合金应变层禁带宽度 $E_g(x)$ 相对于 Si 禁带宽度 E_{gr} 的变化量为^[2]:

$$E_g(x) - E_{gr} = -0.74x \quad (6)$$

(3) Si_{1-x}Ge_x 合金导带及价带有效状态密度随 Ge 百分比含量变化采用文献[10]中的方法

方程(1)、(2)、(3)的求解是以电子、空穴电流密度和电势为求解变量, 采用耦合法同时求解. 首先对各方程进行差分离散, 其中电子、空穴电流密度方程的差分离散采用 Scharfetter-Gummel 方法, 但方程中电子、空穴电势需分别附加一项 $V_n - V_p$. 得到的非线性方程组通过牛顿-SLOR 迭代法进行求解. 边界条件及格点初值选取采用文献[7]中的方法

3 器件结构及掺杂分布

由于器件具有对称性, 故只模拟器件的一半即可. 选取文献[2]中的器件结构与掺杂分布形式, 器件结构如图 1 所示. 纵向尺寸为 $0.8 \mu\text{m}$, 其中发射区、基区宽度均为 $0.1 \mu\text{m}$, 集电区长度为 $0.3 \mu\text{m}$ 的 n^- 集电区和 $0.3 \mu\text{m}$ 的 n^+ 亚集电区, 器件的横向尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$, 其中发射极欧姆接触宽度为 $0.5 \mu\text{m}$, 基极欧姆接触宽度为 $1 \mu\text{m}$, 发射极-基极间浮置宽度为 $0.7 \mu\text{m}$. 集电区为 Si 材料, 基区为生长在 (001) Si 衬底上的 Si_{1-x}Ge_x 合金应变层. 基区中 Ge 百分比含量的上限选择为 0.2, 这是由 Si_{1-x}Ge_x 合金应变层的临界厚度决定的^[5], 在基区厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 时, Ge 百分比含量为 0.2 不会引起应变释放. 在基区中 Ge 的具体分布形式将在模拟结果中给出. 相应于该器件的杂质分布如图 2 所示.

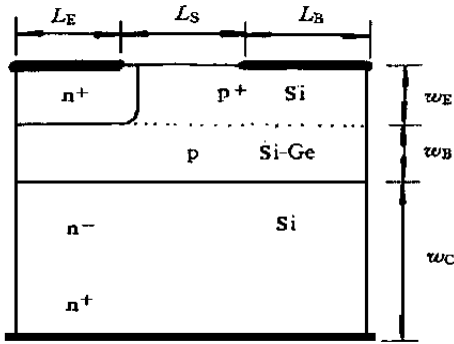


图 1 Si_{1-x}Ge_x HBT 及 SiBJT 的器件结构
其中 $L_E = 0.5 \mu\text{m}$, $L_S = 0.7 \mu\text{m}$, $L_B = 1 \mu\text{m}$,
 $W_E = 0.1 \mu\text{m}$, $W_B = 0.1 \mu\text{m}$, $W_C = 0.6 \mu\text{m}$.

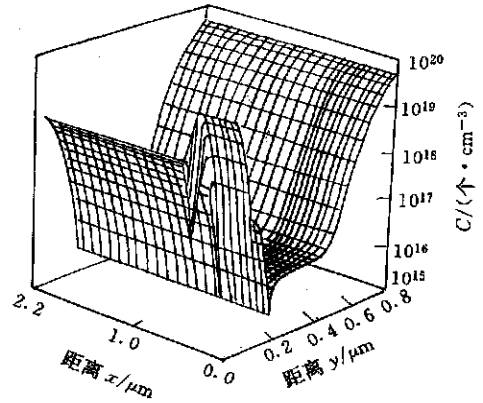


图 2 Si_{1-x}Ge_x HBT 及 SiBJT 二维杂质分布

4 模拟结果及讨论

4.1 模拟结果的验证

在实际的器件制造中, King 和 Shafi 等人发现, 在相同的掺杂分布下, Si_{1-x}Ge_x HBT 的集电极电流比 SiBJT ($x = 0$) 的集电极电流增大的同时, 其基极电流也比 SiBJT 的基极电流大^[6, 11], 引起 Si_{1-x}Ge_x HBT 增益的提高并没有象 Haram e 等人从理论上给出的那么高^[4], 但是 King 和 Shafi 等人对该实验结果没能从理论上定量分析. 图 3 是本软件模拟得到的 Si_{1-x}Ge_x HBT (Ge 在基区中均匀分布) 与 SiBJT 的 Gummel 图, 可以看出在 Si_{1-x}Ge_x HBT 基区中 Ge 百分比含量增加时, 其集电极电流密度 J_C 增大的同时基极电流密度 J_B 确实也在增大, 这一模拟结果同 King 和 Shafi 等人的实验结果相一致.

图 4 是由图 3 得到的 Si_{1-x}Ge_x HBT 的共射极电流增益与 SiBJT ($x = 0$) 的共射极电流增益随基极-发射极电压 V_{BE} 变化的比较. 由图可见, 虽然不同 Ge 百分比含量的 Si_{1-x}Ge_x

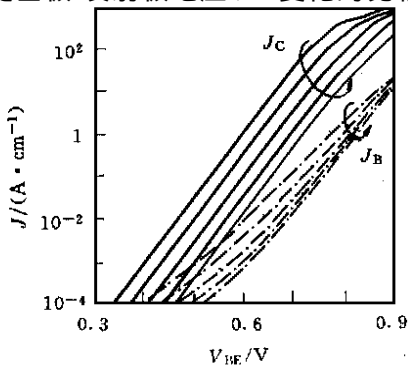


图 3 均匀基区 Ge 分布 Si_{1-x}Ge_x HBT 的 Gummel 图
实线代表 J_C , 虚线代表 J_B ,
从下到上 Ge 百分比含量分别为
0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, $V_{CE} = 1V$.

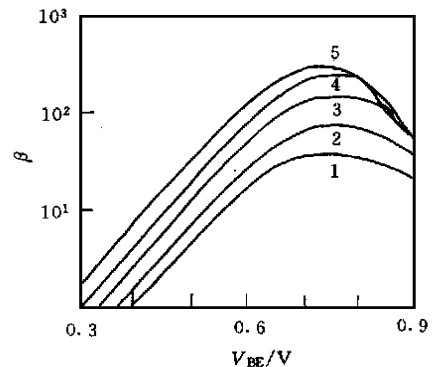


图 4 均匀基区 Ge 分布 Si_{1-x}Ge_x HBT 的共射极电流增益 β 随基极-发射极电压 V_{BE} 的变化
其中曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应的 Ge 百分比含量为 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, $V_{CE} = 1V$.

HBT 的增益都较 SiBJT 的增益大,但由于 Si_{1-x}Ge_x HBT 基极电流的增大,随着基区中 Ge 百分比含量的增加,共射极电流增益的增加并没有象文献[4]中指出的那样随着 Ge 百分比含量的增加呈指数形式增大,而是变得越来越缓慢

为改善 Si_{1-x}Ge_x HBT 的性能,有必要对 Si_{1-x}Ge_x HBT 基极电流增大的原因做进一步的分析

4.2 Si_{1-x}Ge_x HBT 基极电流增大的原因

对 Si_{1-x}Ge_x HBT 由于 Ge 的掺入而使基极电流增大这一实验现象,研究者一致认为是基区的复合电流增大所致 图 5 是将 Si_{1-x}Ge_x HBT 模型方程中基区的少子寿命 τ_b 从原来的 0.5 μ s 提高到 3 μ s 与 τ_b 仍保持 0.5 μ s 的 Gummel 图 (这里 Ge 百分比含量取 0.2),从图中两种不同基区寿命的 J_C 、 J_B 清楚地看到基区寿命增大后,集电极电流密度没有变化,而基极电流密度却有明显的下降,这说明 τ_b 的增大抑制了 Si_{1-x}Ge_x HBT 基区复合电流增大的趋势,从而证明了 Si_{1-x}Ge_x HBT 基极电流增大确实是由于基区复合电流增大所致 同时从图 5 可以得到在 V_{BE} 等于 0.7V 时,基区寿命增大后相应的共射极电流增益由原来的 280 提高到了 1210,是原来的 4.3 倍,这也证明了 Si_{1-x}Ge_x HBT 共射极电流增益的增大确实受基区复合电流的影响很大

对 Si_{1-x}Ge_x HBT 基区复合电流增大这一现象 Shafi 等人认为在靠近集电区附近的基区有一个低寿命区从而引起基区复合电流增大^[6] 然而图 4 的结果是在 Si_{1-x}Ge_x HBT 与 SiBJT 的基区少子寿命 τ_b 相同的前提下得到的,这说明基区复合电流增大还有其它原因

图 6 给出了 Si_{1-x}Ge_x HBT 与 SiBJT 在发射区中央的平衡能带图,随着基区中 Ge 含量的增加, Si_{1-x}Ge_x HBT 的导带明显下移,这会使发射结注入效率增大,注入基区的非平衡少子浓度 n_b 增多,而基区的复合电流与基区少子浓度 n_b 成正比,因此,在相同的偏置下,基区 Ge 百分比含量 x 越大,注入到基区的非平衡少子越多,基区复合电流越大,所以,在 Si_{1-x}Ge_x HBT 与 SiBJT 的 τ_b 相同的前提下, Si_{1-x}Ge_x HBT 基区中少子的增多应是基区复合电流增大的直接原因

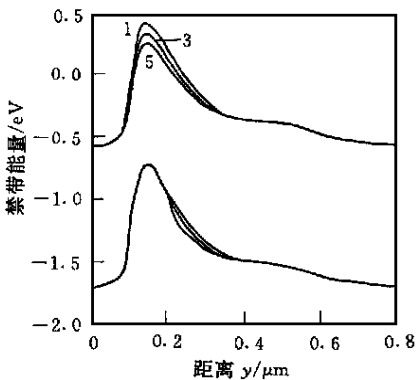


图 6 基区中 Ge 为均匀分布下的 Si_{1-x}Ge_x HBT 与 SiBJT 发射区中央的平衡能带图 曲线标号与图 4 一致

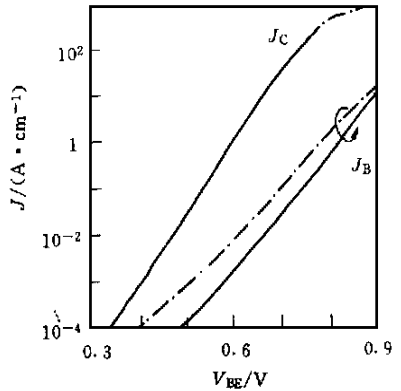


图 5 不同基区寿命的 Si_{1-x}Ge_x HBT 的 Gummel 图 $x = 0.2$,虚线对应 τ_b 为 0.5 μ s, 实线对应 τ_b 为 3 μ s, $V_{CE} = 1V$.

为了进一步研究基区的复合电流主要发生在基区的哪一区域,将 Si_{1-x}Ge_x HBT 基区的寿命分为两个部分,靠近发射结一侧的高寿命区($\tau_b = 3\mu$ s)和靠近集电结一侧的低寿命区(τ_b 仍保持原来的 0.5 μ s),并将高寿命区的宽度 w 从 0 μ m 一直增加到整个基区的宽度 0.1 μ m,得到 V_{BE} 为 0.7V 时共射极电流增

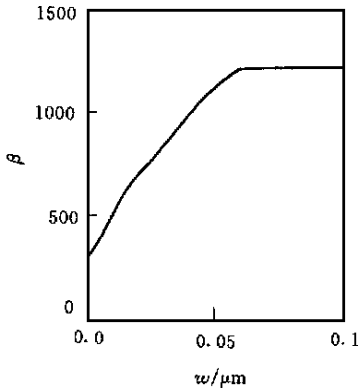


图 7 Si_{1-x}Ge_x HBT 共射极电流增益与高寿命基区宽度的关系
其中 $x = 0.2, V_{BE} = 0.7V, V_{CE} = 1V$.

益随高寿命区宽度变化的曲线如图 7 所示(其中 Ge 百分比含量为 0.2). 从图中可以看出在靠近发射结一侧 $0.06\mu\text{m}$ 范围内, 增大高寿命区的宽度, 共射极电流增益逐渐增大, 但继续增大高寿命区宽度共射极增益无明显变化, 这是由于基区的非平衡少数 n_b 从发射结一侧到集电结一侧逐渐减小造成的. 这一结果说明基区的复合主要发生在靠近发射结一侧 $0.06\mu\text{m}$ 范围内, 而在靠近集电结一侧的复合电流可忽略不计.

4.3 降低 Si_{1-x}Ge_x HBT 基极电流的措施

图 8(a) 是渐变 Ge 分布的 Si_{1-x}Ge_x HBT 与均匀 Ge 分布的 Si_{1-x}Ge_x HBT 的 Gummel 图, 其中渐变 Ge 分布如图 8(b) 所示, 从发射结处向基区延伸 50nm , Ge 百分比含量从 0 渐变到 0.2. 可以看出渐变 Ge 分布的 Si_{1-x}Ge_x HBT 的基极电流密度下降, 这是由于在靠近发射结处的渐变 Ge 分布导带下移没有均匀 Ge 分布导带下移显著, 相应基区非平衡少数 n_b 增大不如均匀 Ge 明显, 因而基区的复合电流降低较小, 这也是文献[2]中的 Ge 分布的模拟结果没有出现基极电流增大的原因. 但从图 8(a) 也可以看出在基极电流密度下降的同时, 集电极电流密度也有所降低, 因此渐变 Ge 分布的 Si_{1-x}Ge_x HBT 在降低基极电流的同时使增益也有所下降, 这是由于渐变 Ge Si_{1-x}Ge_x HBT 的发射结注入效率下降造成的.

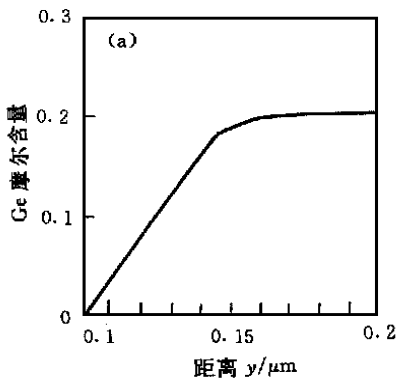


图 8(a) 渐变 Ge 分布(虚线)与均匀 Ge 分布(实线)形式的 Gummel 图
 $V_{CE} = 1V$.

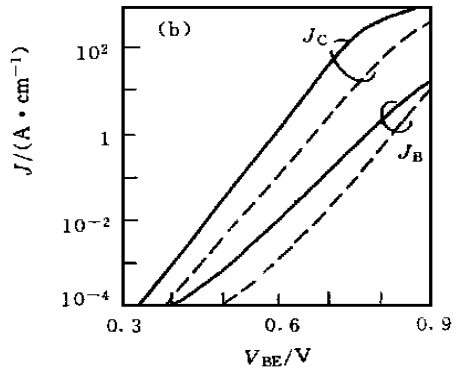


图 8(b) Si_{1-x}Ge_x HBT 发射极中央渐变 Ge 分布形式

5 结论

通过对 Si_{1-x}Ge_x HBT 二维数值分析, 得出 Si_{1-x}Ge_x HBT 由于基区中 Ge 的掺入其基极电流有比相同掺杂下的 SiBJT 的基极电流增大的趋势, 而且靠近发射结一侧基区的复合电流是引起基极电流增大的主要原因; 在发射结处的渐变 Ge 分布可以降低基区的复合电流,

但由于降低了发射结注入效率, 共射极电流增益也有所下降

参 考 文 献

- [1] G. L. Patton, S. S. Iyer *et al* , IEEE Electron Device Lett , 1988, **9**(4): 165~ 167.
- [2] B. Pejcinovic *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **36**(10): 2129~ 2137.
- [3] S. S. Iyer, G. L. Patton *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **36**(10): 2043~ 2063.
- [4] D. L. Harame *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1995, **42**(3): 455~ 468.
- [5] S. Mohammadi, C. R. Selvakumar, IEEE Trans Electron Devices, 1994, **41**(10): 1708~ 1715.
- [6] Z. A. Shafi, C. J. Gibbings *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1991, **38**(8): 1973~ 1976.
- [7] M. Lundstrom and R. J. Schuelke, IEEE Trans Electron Devices, 1983, **30**(9): 1151~ 1159.
- [8] T. Manku and A. Nathan, IEEE Trans Electron Devices, 1992, **39**(9): 2082~ 2089.
- [9] T. K. Carn *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1994, **41**(7): 1273~ 1280.
- [10] J. Chen *et al* , Solid-State Electron , 1992, **35**(8): 1037~ 1044.
- [11] C. A. King *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **36**(10): 2093~ 2104.

Influence of Neutral Base Recombination on Common Emitter Gain in $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/n\text{Si}$ Transistor

An Junming, Li Jianjun, Wei Xiwen

(Semiconductor Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Shen Guangdi, Chen Jianxin, Zou Deshu

(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Received 21 November 1997, revised manuscript received 2 March 1998

Abstract The influence of base recombination on common emitter gain in $n\text{Si}/p\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/n\text{Si}$ heterojunction bipolar transistors (HBT's) has been analyzed in detail by two dimension numerical simulation method. Gummel plot and equilibrium energy band diagram of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ HBT are shown. We conclude that the base recombination near the emitter junction is the main reason to cause the common emitter gain decrease. In addition, an ideal Ge distribution in base is given which can decrease the base recombination current.

EEACC: 0290, 2560J