

辐照对 SiGe HBT 增益的影响*

孟祥提^{1,†} 王吉林² 黄 强¹ 贾宏勇² 陈培毅² 钱佩信²

(1 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

(2 清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 比较了电子和 γ 射线辐照后 SiGe HBT 和 Si BJT 直流增益 β 的变化. 在 $V_{be} \leq 0.5V$ 时, 较高剂量辐照时 SiGe HBT 的放大倍数辐照损伤因子 $d(\beta)$ 为负; 在 $V_{be} \geq 0.5V$ 时, SiGe HBT 的 $d(\beta)$ 远比 Si BJT 的小. SiGe HBT 有更好的抗辐照性能. 针对测得的一些电子陷阱对辐照致性能变化的影响进行了讨论.

关键词: SiGe HBT; 电子辐照; γ 射线辐照; Si BJT; 直流增益

PACC: 6180; 7800

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0430-05

1 引言

SiGe 材料及 SiGe HBT 器件的研究发展很快. 同常规硅双极晶体管 (Si BJT) 相比, SiGe HBT 频率高、噪声低、传输时间短、电流增益大、低温特性好, 可广泛应用于数字、模拟、微波、低温等方面^[1,2]. SiGe 微波器件制备与现有成熟的 Si 工艺兼容, 成本比 GaAs 器件低得多.

但是 SiGe 材料和器件如用于空间运载通信电子系统、人造地球卫星、空间站、人工核爆辐射环境、核电站、高能粒子加速器等环境和许多高速军用系统都需要研究其粒子辐照性能和抗辐照加固技术. 人们期望 SiGe HBT 能够提高抗辐照性能, 用作核加固器件. 国外已经开展了这方面的研究^[3,4], 我们也开始了这方面的研究^[5].

本文研究了 4MeV 不同剂量电子和 γ 射线辐照后 SiGe HBT 直流增益的变化, 并对照深能级瞬态谱测量结果探讨了直流增益的变化与辐照缺陷的关系.

2 实验

利用 SiGe 应变层异质结构, 清华大学微电子学研究所采用 UHV/CVD 方法制作了 $n^+ - Si/p^+ - Si_{1-x}Ge_x/n - Si$ 外延 HBT 器件, 其结构见文献[1]. 发射区 (E) 为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ P 掺杂的 n-Si 层; 基区 (B) 为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ B 重掺杂的 $p - Si_{0.8}Ge_{0.2}$ 层, 集电区 (C) 为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ P 轻掺杂的 n-Si 层. 选择大

功率高频 Si 外延 npn 型 Si BJT 作为对照样品.

辐照实验在室温下进行, 电子辐照能量为 4.5 MeV. 样品的辐照剂量为 $1 \times 10^{12}, 1 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14}$ 和 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. γ 射线辐照剂量为 100, 2000, 7000 和 14000krad.

在清华大学微电子学研究所, 用 Keithley 4200CS 半导体参数分析仪测量了辐照前后的 SiGe HBT 的集电极电流 (I_c)、基极电流 (I_b), 计算了直流电流放大倍数 (β):

$$\beta \approx I_c / I_b \quad (1)$$

3 结果

为了研究器件直流增益 β 的粒子辐照变化, 引入其损伤因子 $d(\beta)$ 参数:

$$d(\beta) = 1 - \beta / \beta_0 \quad (2)$$

其中 β_0 是器件粒子辐照前的直流放大倍数. $d(\beta)$ 越大, 辐照损伤越严重. 如果 $d(\beta)$ 为负, 表示辐照后 β 增加, 即 β 没有退化.

图 1 和 2 分别是 SiGe HBT 电子和 γ 射线辐照前后的 β 和 $d(\beta)$ 随偏置电压 V_{be} 的变化曲线 ($V_{cb} = 0V$). 为了对照, 图 3 和 4 分别给出了电子和 γ 射线辐照 Si BJT 的直流增益变化.

由图可见, 通常 SiGe HBT 电子和 γ 射线辐照前后的 β 和 $d(\beta)$ 随偏置电压 V_{be} 的变化趋势大致类似: 当 $V_{be} \leq 0.5V$ 时, β 随 V_{be} 的增加而减小; 当 $V_{be} \geq 0.5V$ 时, β 随 V_{be} 的变化很小. 不同之处是: 两种辐照 β 随剂量的变化略有不同, 在 $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{14}$

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 10075029, 10375034)

† 通信作者. Email: mengxt@mail.tsinghua.edu.cn

2006-11-26 收到

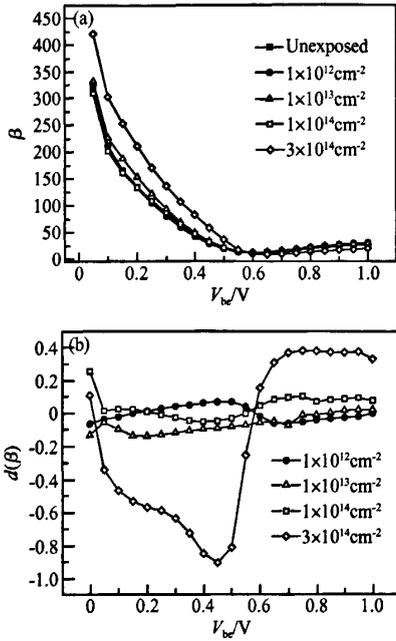


图 1 电子辐照前后 SiGe HBT 的 β 随 V_{be} 的变化 (a) β - V_{be} 曲线; (b) $d(\beta)$ - V_{be} 曲线

Fig.1 β - V_{be} curves (a) and related change of β - V_{be} curves (b) for SiGe HBT before and after electron irradiation

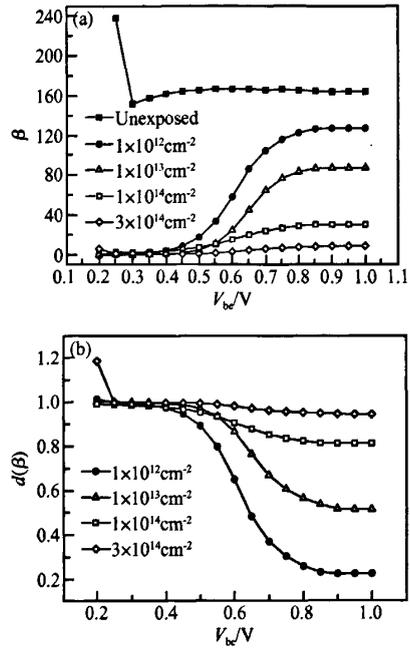


图 3 电子辐照前后 Si BJT 的 β 随 V_{be} 的变化 (a) β - V_{be} 曲线; (b) $d(\beta)$ - V_{be} 曲线

Fig.3 β - V_{be} curves (a) and related change of β - V_{be} curves (b) for Si BJT before and after electron irradiation

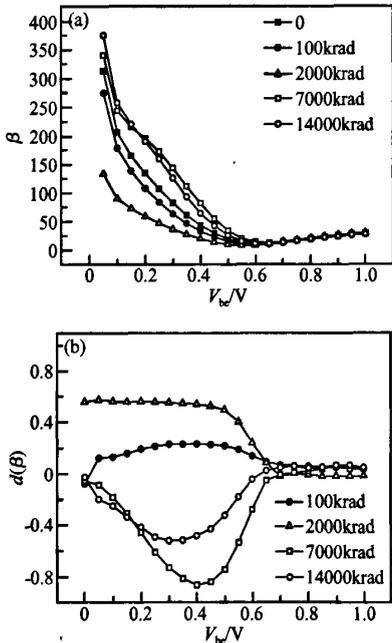


图 2 γ 射线辐照前后 SiGe HBT 的 β 随 V_{be} 的变化 (a) β - V_{be} 曲线; (b) $d(\beta)$ - V_{be} 曲线

Fig.2 β - V_{be} curves (a) and related change of β - V_{be} curves (b) for SiGe HBT before and after γ -ray irradiation

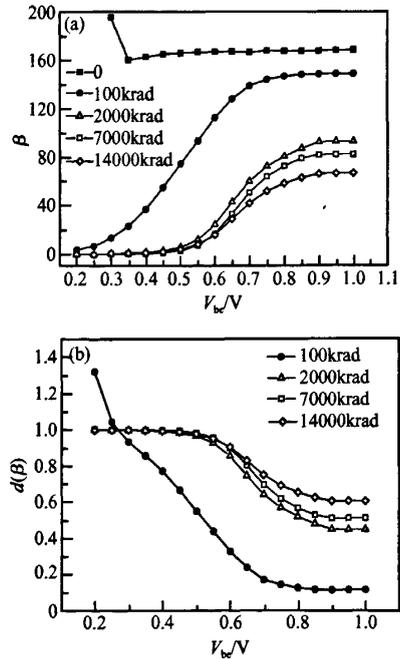


图 4 γ 射线辐照前后 Si BJT 的 β 随 V_{be} 的变化 (a) β - V_{be} 曲线; (b) $d(\beta)$ - V_{be} 曲线

Fig.4 β - V_{be} curves (a) and related change of β - V_{be} curves (b) for Si BJT before and after γ -ray irradiation

cm^{-2} 辐照后, β 与未辐照时的情况大致相同, $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 高剂量辐照后, β 明显增加. 这从图 1(b) 中看得更为明显, $d(\beta)$ 在 $V_{be} \leq 0.5 \text{V}$ 时反而为负, 表示辐照后 β 没有退化. 100 和 2000krad 辐照后, β 减小; 7000 和 14000krad 辐照后, β 增加, 但是 7000krad 比 14000krad 辐照后 β 增加更多. 这从图 2(b) 中看得也更为明显, 7000 和 14000krad 辐照后 $d(\beta)$ 在 $V_{be} \leq 0.5 \text{V}$ 时反而为负. 另外, 对于 $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, 7000 和 14000krad 辐照后, $d(\beta)$ 先随 V_{be} 的增加而减小, 然后随 V_{be} 的增加而增加, 在 $V_{be} \approx 0.4 \text{V}$ 时, $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 、7000krad 辐照的 $d(\beta)$ 减小最大.

由图可见, 通常 Si BJT 电子和 γ 射线辐照前后的 β 和 $d(\beta)$ 随偏置电压 V_{be} 的变化趋势类似, 但是与 SiGe HBT 的很不相同: $d(\beta)$ 总为正, 即总是受到损伤而退化; 未辐照时, β 几乎不随 V_{be} 的变化而变化; 除 100krad γ 射线辐照外, 当 $V_{be} \leq 0.5 \text{V}$ 时, β 大幅度降低, 但随 V_{be} 的变化很小; 当 $V_{be} \geq 0.5 \text{V}$ 时, 两种辐照 β 均随剂量的增加而减小, 且随 V_{be} 的增加而上升; 在 $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 辐照后, β 大幅度减小, 且几乎不随 V_{be} 的变化而变化, 似乎电子辐照损伤比 γ 射线辐照损伤严重, 也可能如果 γ 射线辐照剂量足够大会出现这种现象.

可以看到, SiGe HBT 的 $d(\beta)$ 的退化远比 Si BJT 的小. 除了在 $V_{be} \leq 0.5 \text{V}$ 时, 较高剂量辐照时 SiGe HBT 的 $d(\beta)$ 反而为负外, 在 $V_{be} \geq 0.5 \text{V}$ 时, SiGe HBT 的 $d(\beta)$ 远比 Si BJT 的小.

4 讨论

按照 I_c 和 I_b 随剂量和 V_{be} 的变化, β 相应的变化是容易理解的.

关于 I_c 、 I_b 和 β 的辐照变化能够用下列公式^[6]解释:

$$I_c = I_{c0} \exp \frac{qV_{be}}{mkT} \quad (3)$$

$$I_b = I_{b0} \exp \frac{qV_{be}}{mkT} + I_{br} \exp \frac{qV_{be}}{nkT} \quad (4)$$

这里 I_{b0} 和 I_{br} 分别代表基极区和发射极-基极耗尽层的复合电流. 显然, 器件辐照后 I_c 、 I_b 和 β 随 V_{be} 的增加而增加, 并且在 $> 0.6 \text{V}$ 的高 V_{be} 区变化应该更加明显. 通常器件辐照后随剂量的增加 I_b 增加, I_c 和直流电流放大倍数 β 下降.

辐照会在 Si 材料中产生离位损伤(主要形成体缺陷). 用深能级瞬态谱(DLTS)测量到 $\geq 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 辐照的 Si BJT 中至少存在着 $E_c - 0.17 \text{eV}$ 和 $E_c - 0.48 \text{eV}$ 电子陷阱; $\geq 7000 \text{krad}$ 辐照后, 有明显的电子陷阱, 如 $E_c - 0.17 \text{eV}$ 存在; $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 或

7000krad 辐照后没有看到明显的深能级峰. 通常认为 $E_c - 0.17 \text{eV}$ 的电子陷阱为氧-空位缺陷, 即 A 中心; 在偏压下 Si BJT 中的发射区的大量电子陷阱使向基区进而向集电极区扩散的电子大为减少, 因而 I_c 下降, 以使 β 下降, 并且通常随剂量增加而下降更为明显.

对 CMOS 器件的计算机模拟表明, 4.5MeV 电子辐照时, SiO_2 层和 Si 衬底中的离位原子数比 γ 射线辐照时分别高 3 和 2 个数量级. SiO_2 层中的电子-空穴对和离位原子的浓度分别高大约 2 和 3 个数量级^[7]. 此外, 非离化能损失(NIEL)是由于原子离位的能量损失率的计算, 它与辐照 Si 的损伤系数成线性关系. Si 中 1 MeV 电子辐照时 NIEL 比 γ 射线致二次电子 NIEL 大得多^[8]. 这能够解释 Si BJT 电子辐照损伤比 γ 射线辐照损伤严重得多的实验现象.

与 Si BJT 相比, SiGe HBT 两种辐照下引起的损伤要复杂得多. 辐照会在 SiGe HBT 的 Si 材料中产生离位损伤、在 SiO_2 氧化物中产生陷阱电荷并在 Si/SiO₂ 界面产生界面态.

氧化物中陷阱正电荷的产生和表面复合速度的增加能够引起 I_b 的增加. 发射极-基极结中辐照致产生-复合中心能够降低少子寿命而使 I_b 增加^[5]. 当产生-复合中心处于发射极-基极结空间电荷区时, 大部分辐照致复合发生在这一空间电荷区, 会引起附加的 I_b 分量. 因此, I_b 随剂量增加而增加, 并且特别是在高 V_{be} 和高剂量时明显增加, 从而引起 β 减小.

辐照在发射极-集电极区和 Si 衬底中产生大量电子陷阱. 在 SiGe HBT 中, $\geq 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 辐照后, 有 1 个明显的深能级峰, 能级为 $E_c - 0.38 \text{eV}$; 7000krad 辐照后, 有一点 $\sim E_c - 0.12 \text{eV}$ 的浅电子陷阱, 14000krad 辐照后, 有明显的浅电子陷阱和 $E_c - 0.17 \text{eV}$ 的电子陷阱存在; $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 或 2000krad 辐照后没有明显的深能级峰可见. 通常认为 $E_c - 0.38 \text{eV}$ 的电子陷阱为双空位缺陷, 这可能使 Si 衬底中电阻率增加, 以致于集电极电流减小^[9].

SiGe HBT 的放大倍数辐照损伤因子 $d(\beta)$ 远比 Si BJT 的小, 是因为其 I_c 和 I_b 随剂量的变化远比 Si BJT 的小, 特别是在高 V_{be} 和高剂量时. SiGe 基区外延层中的 Ge 原子对辐照产生的空位和间隙原子能够起湮灭中心的作用, 从而抑制稳态辐照缺陷包括硼间隙相关的复合体的积累^[10], 使得 SiGe HBT 的基区缺陷比 Si BJT 的缺陷少得多, 减缓辐照引起的器件性能的退化. 此外, Si BJT 基区掺杂浓度低, 所以辐照后基区中与硼间隙相关的复合体缺陷较多. 这一缺陷产生的电子俘获能级会使 I_c 减小, 并可能增大基区复合, 从而使 I_b 增大. SiGe

HBT 的基区通常比 Si BJT 的薄得多, 并且掺杂浓度大得多, 这能够有效地限制发射极-基极区的离子化损伤. 因此, SiGe HBT 比 Si BJT 有更好的抗辐照性能.

5 结论

通常 SiGe HBT 电子和 γ 射线辐照前后的放大倍数 β 随剂量的变化略有不同: 在较低剂量电子辐照后 β 变化不大, 但是较低剂量 γ 射线辐照后 β 明显减小; 较高剂量 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、7000 和 14000krad 辐照后, 在 $V_{be} \leq 0.5 \text{ V}$ 区 β 明显增加, $d(\beta)$ 反而为负, 即 β 没有退化.

Si BJT 辐照前后的 β 和 $d(\beta)$ 随 V_{be} 的变化趋势与 SiGe HBT 的很不相同: $d(\beta)$ 总为正, 即总是受到损伤而退化; 在 $V_{be} \leq 0.5 \text{ V}$ 时, β 通常大幅度降低, 但随 V_{be} 的变化很小; 在 $V_{be} \geq 0.5 \text{ V}$ 时, 两种辐照 β 均随剂量的增加而减小, 且随 V_{be} 的增加而上升; 在 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 辐照后, β 大幅度减小, 且几乎不随 V_{be} 的变化而变化.

辐照在 SiGe HBT 发射极-集电极区和 Si 衬底中产生大量电子陷阱. $\geq 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 辐照后, 有一个能级为 $E_c - 0.38 \text{ eV}$ 的深能级峰; 7000krad 辐照后, 有 $\sim E_c - 0.12 \text{ eV}$ 的浅电子陷阱; 14000krad 辐照后, 有明显的浅电子陷阱和 $E_c - 0.17 \text{ eV}$ 的电子陷阱存在. 这些电子陷阱能使 Si 衬底中电阻率增加, 以致集电极电流减小.

SiGe HBT 的 $d(\beta)$ 远比 Si BJT 的小, 是因为其 I_c 和 I_b 随剂量的变化远比 Si BJT 的小, 特别是在高 V_{be} 和高剂量时. SiGe HBT 比 Si BJT 有更好的抗辐照性能.

致谢 作者感谢北京师范大学李凤梅、刘晓光和北

京大学陈开茅教授分别在辐照和深能级瞬态谱测量方面给予的帮助.

参考文献

- [1] Qian Wei, Zhang Jinshu, Jia Hongyong, et al. Low noise microwave SiGe HBTs. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 445 (in Chinese) [钱伟, 张进书, 贾宏勇, 等. 微波低噪声 SiGe HBT 的研制. 半导体学报, 2000, 21: 445]
- [2] Ohyama H, Vanhellemont J, Takami Y, et al. Proton irradiation effects on the performance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ devices. Phys Status Solidi A, 1996, 158(1): 325
- [3] Roldan J M, Ansley W E, Cressler J D, et al. Neutron radiation tolerance of advanced UHV/CVD SiGe HBT BiCMOS technology. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 1965
- [4] Lin H, Lee S. Super-gain AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using an emitter-thinning design. Appl Phys Lett, 1985, 47: 839
- [5] Meng X T, Yang H W, Kang A G, et al. Effects of neutron irradiation on SiGe HBT and Si BJT devices. Mater Sci: Mater in Electron, 2003, 14(4): 199
- [6] Lin H, Lee S. Super-gain AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using an emitter-thinning design. Appl Phys Lett, 1985, 47: 839
- [7] Yu J N, Yang W, Yu G, et al. Theoretical analysis and computer calculation of the equivalent dose of p, γ , β irradiation damage on CMOS electronic device. Chinese J Nucl Sci Eng, 2000, 20(2): 97 (in Chinese) [郁金南, 杨文, 郁刚, 等. CMOS 器件 p, γ , β 辐照损伤等效剂量分析计算. 核科学与工程, 2000, 20(2): 97]
- [8] Summers G P, Burke E A, Shapiro P, et al. Damage correlation in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations. IEEE Trans Nucl Sci, 1993, 40(6): 1372
- [9] Roldan J M, Niu G, Ansley W E, et al. Basic mechanisms of radiation effects—an investigation of the spatial location of proton-induced traps in SiGe HBTs. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2424
- [10] Zhang S M, Niu G F, Cressler J D, et al. A comparison of the effects of Gamma-irradiation on SiGe HBT and GaAs HBT technologies. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(6): 2521

Irradiation Effects on DC Current Gain of SiGe HBT*

Meng Xiangti^{1,†}, Wang Jilin², Huang Qiang¹, Jia Hongyong²,
Chen Peiyi², and Qian Peixin²

(1 *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(2 *Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The change of DC gains (β) of SiGe HBT irradiated at different electrons and γ -ray doses is studied in a comparison with those of Si BJT. Generally, the radiation-damage factor of $\beta [d(\beta)]$ for SiGe HBT is negative in $V_{be} \leq 0.5$ V at higher dose, and it is smaller in $V_{be} \geq 0.5$ V than that for Si BJT. SiGe HBT has much better anti-radiation performance. Some electron traps is measured. The mechanism of radiation-induced change is discussed.

Key words: SiGe HBT; electron irradiation; γ -ray irradiation; Si BJT; DC gain

PACC: 6180; 7800

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0430-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.10075029,10375034)

† Corresponding author. Email: Mengxt@tsinghua.edu.cn

Received 26 November 2006