

SiGe HBT 的脉冲中子及 γ 辐射效应

刘书焕^{1,2,†} 林东生² 郭晓强² 刘红兵³ 江新标² 朱广宁² 李 达²
王祖军² 陈 伟² 张 伟⁴ 周 辉² 邵贝贝¹ 李君利¹

(1 清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2 西北核技术研究所, 西安 710613)

(3 中国电子科技集团第 13 研究所, 石家庄 050051)

(4 清华大学微电子研究所, 北京 100084)

摘要: 测量了反应堆脉冲中子及 γ 辐照 SiGe HBT 典型电参数变化. 在反应堆 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的脉冲中子注量和 256.85 Gy(Si) γ 总剂量辐照后, SiGe HBT 静态共射极直流增益减小了 20%. 辐照后基极电流、结漏电流增大, 集电极电流、击穿电压减小. 特征截止频率 f_T 基本不变, f_{max} 略有减小. 初步分析了 SiGe HBT 反应堆脉冲中子及 γ 辐射的损伤机理.

关键词: SiGe HBT; 辐射效应; 反应堆

EEACC: 2560J

中图分类号: TN325.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)01-0078-06

1 引言

采用能带工程研制的应变 Si/SiGe/Si 异质结双极晶体管(HBT)与普通的 Si BJT 相比, SiGe HBT 器件具有频率高、噪声低、传输快、电流增益大、良好的低温性能、易与成熟的 Si 工艺兼容、易集成等特点,因而被广泛用于数字、模拟、RF 及微波电路. 在微波领域,由于 Si 材料器件的局限性和 GaAs 材料器件的高成本、集成度不高等缺陷,使 SiGe 材料器件的应用研究显示出良好的市场发展前景.

众所周知,辐射可导致器件材料的辐射损伤,从而影响器件的正常工作性能,因此对 SiGe HBT 器件开展辐射效应研究,考核其在辐射环境中的生存能力,对优化 SiGe HBT 的加固设计,拓展 SiGe HBT 在诸如空间站、卫星通信系统、高速军用系统等辐射环境中的广泛应用具有重要意义. 国内外对 SiGe HBT 器件的抗辐射性能已开展了相关实验研究工作^[1~6],但有关 SiGe HBT 器件的瞬态中子、 γ 辐射效应研究尚未见报道,本工作初步检验了 SiGe HBT 器件的抗脉冲中子、 γ 辐射能力,并对 SiGe HBT 电参数在辐射前后的变化进行了初步机理分析.

2 实验

2.1 SiGe HBT 器件结构

本实验使用的 SiGe HBT 器件管芯是由北京清华大学微电子研究所采用超高真空气相淀积技术(UHV/CVD)在 $0.8 \mu\text{m}$ 的工艺线上研制而成,由中国电子科技集团第 13 研究所完成管芯陶瓷外壳(ST23)封装工艺,器件管芯的结构如图 1 所示. SiGe HBT 器件的硅衬底片为电阻率 $\sim 3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 的 n^+ 型 $\langle 100 \rangle$ 硅片,厚度约为 $200 \mu\text{m}$,掺杂浓度为 $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 集电区为 n^- 型硅外延层,掺杂浓度

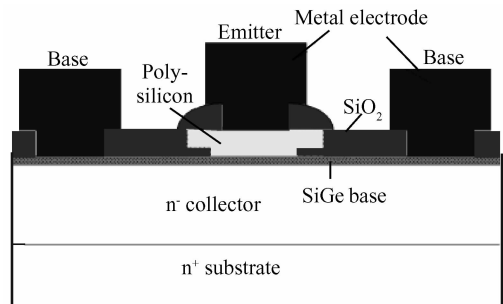


图 1 SiGe HBT 结构示意图

Fig. 1 Schematic cross section of the SiGe HBT used in this study

† 通信作者. Email: liu-sh03@mails. tsinghua. edu. cn

2006-06-06 收到, 2006-09-05 定稿

为 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 $2.5 \mu\text{m}$. 基区为 i-SiGe/p-SiGe/i-SiGe 型外延层, 厚度为 52 nm (包括两侧 i-SiGe 隔离层厚度各 6 nm), 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 锗组分为 0.15 . 发射区为 i-Si/n-Si 型外延层, 其中 i-Si 外延层厚度为 25 nm , n 型多晶硅外延层厚度为 200 nm , 掺杂浓度为 $3.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 金属电极为 Ti/TiN/Al 多层金属化结构, 对应的厚度为 $30 \text{ nm}/60 \text{ nm}/1 \mu\text{m}$. SiO_2 氧化层厚度约为 $0.6 \mu\text{m}$. 芯片厚度约 0.2 mm . 发射极接触孔面积为 $1 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$. 20 叉指的 SiGe HBT 器件在 $V_{\text{CE}} = 10 \text{ V}$, $I_{\text{C}} = 20 \text{ mA}$ 条件下的特征频率为 7 GHz , 直流增益为 250 , 噪声系数 NF_{min} 为 1.1 dB , 最大耗散功率为 200 mW , 最大集电极直流电流 100 mA .

2.2 脉冲堆中子、 γ 辐射场参数测量与计算

上述 SiGe HBT 器件样品脉冲辐照实验是在西北核技术研究所游泳池式脉冲反应堆辐照腔屏蔽快中子滤束装置内进行的, 伴随样品辐照同时利用多箔探测器 (SAND-II 解谱) 和宽量程 $^7\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$ 热释光剂量片测量了器件辐照位置中子注量谱分布 (图 2) 和 γ 总剂量. 能谱测量的不确定度为 $10\% \sim 30\%$, 中子注量的不确定度为 3% , γ 总剂量测量的不确定度为 30% . 堆芯电离室监测的 2.0 元脉冲发射过程中反应堆归一化功率如图 3 所示, 脉冲功率半高宽为 18.51 ms , 积分能量为 13.31 MJ . 测量辐照中子积分注量为 $1.04 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 根据 ASTM E722 提供的硅材料位移损伤 KERMA 因子, 计算得到测量中子注量谱的 1 MeV 等效中子注量为 $5.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, γ 总剂量为 $256.85 \text{ Gy}(\text{Si})$. 由于目前在中子- γ 混合场中没有很好的方法测量 γ 谱分布, 本文根据脉冲堆堆芯及实验孔道材料组成几何, 利用 MCNP/4B 中子、光子耦合输运程序计算了脉冲堆脉冲工况的瞬发 γ 能谱分布 (图 4), 瞬发 γ 谱平均能量计算值为 1.53 MeV , 计算偏差小于 10% .

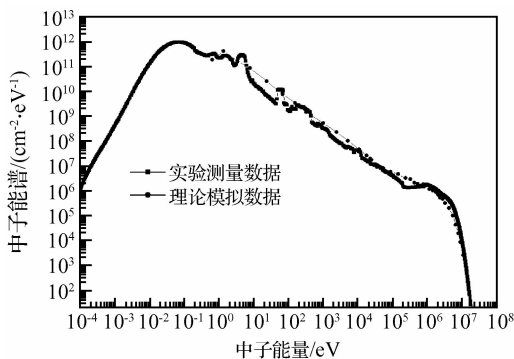


图 2 中子注量谱分布

Fig. 2 Distribution of the neutron fluence spectra in this study

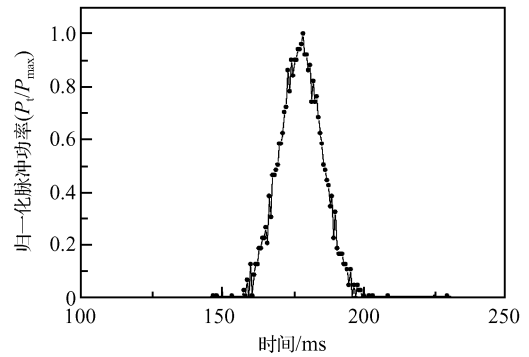


图 3 西安脉冲堆归一化脉冲功率波形 (2.0 元)

Fig. 3 Normalized pulse power shape of the pulse reactor (2.0 yuan)

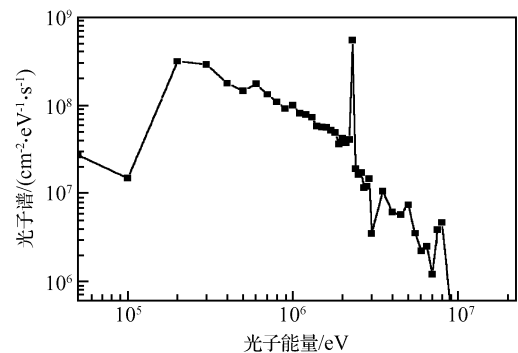


图 4 SiGe HBT 器件辐照位置理论计算 γ 能谱

Fig. 4 Theory calculated photon spectra for the reactor at the irradiation site of the SiGe HBT

2.3 SiGe HBT 器件典型交、直流参数测量结果

实验器件管芯来自于同一晶片划片分成的一批管芯, 经过辐照前参数测量筛选, 选出参数较为一致的作为一组同时进行辐照实验, 在反应堆脉冲辐照前后测量器件的典型参数变化如下.

利用 HP4156 半导体参数分析仪测量了 SiGe HBT 辐照前后输入输出 (图 5)、Gummel 特性曲线、漏电流和击穿电压 (图 6) 等参数. 测量结果表明, 辐照后 SiGe HBT 的输入输出特性略有漂移, 漏电流增大, 开启电压、击穿电压减小. 从 Gummel 特性曲线可以看出, 辐照后基极电流 I_{B} 增大, 但 I_{C} 在 $V_{\text{BE}} < 0.3 \text{ V}$ 时减小, $V_{\text{BE}} > 0.3 \text{ V}$ 后基本不变. 辐照后 SiGe HBT 静态直流增益减小了约 20% . 从实验测量结果来看, 引起器件直流增益退化的主要原因是辐照后基极电流的增加、集电极电流的减小. 此外, 还测量器件的 B-E 结正向电压 V_{BEF} , V_{BEF} 比辐照前的值略有增加, 表明正向电阻在辐照后增大.

为检测器件典型 RF 参数在反应堆脉冲辐照前后的变化, 采用惠普公司生产的 S 参数网络分析仪, 在偏置条件为 $V_{\text{CE}} = 10 \text{ V}$, $I_{\text{C}} = 20 \text{ mA}$ 的条件下,

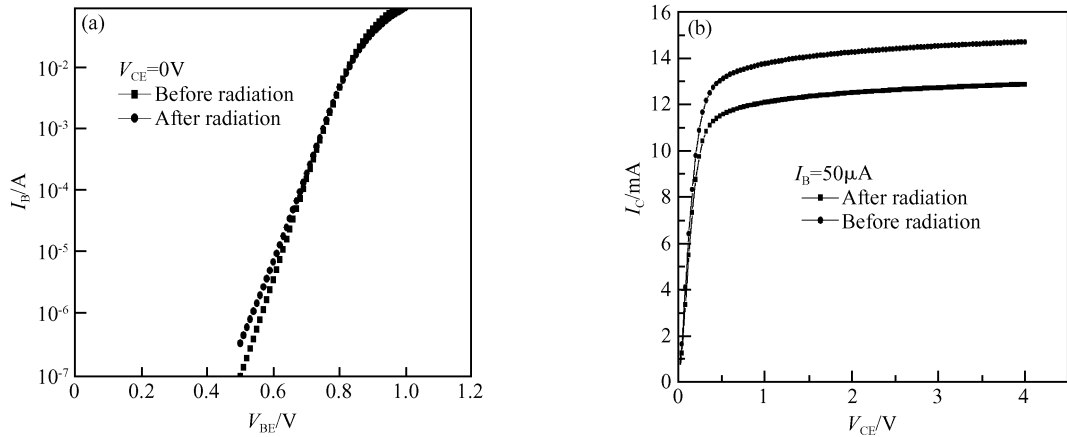


图 5 反应堆瞬态辐照前后 SiGe HBT 输入输出特性曲线变化 (a) 输入特性; (b) 输出特性

Fig. 5 Input and output characteristics performance change of SiGe HBT before and after reactor transient irradiation (a) Input; (b) Output

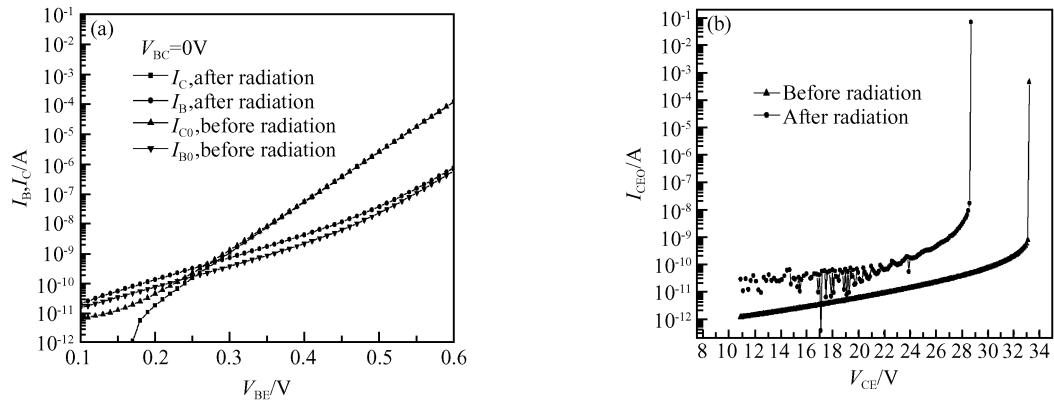


图 6 反应堆脉冲辐照前后 SiGe HBT Gummel 特性曲线(a)和结漏电流(b)的变化

Fig. 6 Gummel characteristics (a) and emitter-to-collector junction leakage current (b) change for SiGe HBT before and after reactor pulse irradiation

完成了器件交流增益 $|H_{21}|$ 、最大单向化功率增益 (maximum unilateral gain) G_{umax} 和最大可用功率增益 (maximum available gain) G_{amax} 参数的测量. 同时利用惠普公司生产的电容分析仪, 测量了器件 B-C 结电容, 测量结果如图 7 和 8 所示.

图 7 和 8 测量结果显示, 辐照后器件最大单向化功率增益 G_{umax} 基本不变, 结电容减小, 交流增益 $|H_{21}|$ 在线性倍频区的变化甚微, 最大可用功率增益 G_{amax} 在准线性倍频区略有减小. 分别由器件交流增益 $|H_{21}|$ 与特征截止频率 f_T , G_{amax} 和最大振荡频率 f_{max} 参数的线性外推对应关系可知, 辐照后器件特征截止频率 f_T 基本不变, f_{max} 略有减小. 器件 f_T 与 f_{max} 参数的关系满足

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi C_{CBO} R_B}}$$

式中 R_B 为器件基区电阻. 根据上式和各参数测

量结果, 可推知器件 f_{max} 参数的减小主要是由器件基极电阻在辐照后增大所致.

3 辐射损伤机理分析与讨论

根据射线与物质相互作用机理^[7], 入射粒子在穿过靶物质时, 通过电离过程和非电离过程逐渐损失能量, 在晶体靶材料中, 电离过程产生电子-空穴对, 形成电离效应. 非电离过程产生位移原子和空位, 形成位移损伤效应. 根据硅锗材料的平均激发能及位移阈能 ($E_d(\text{Si}) = 21\text{eV}$, $E_d(\text{Ge}) = 27.5\text{eV}$)^[8], 易知反应堆脉冲发射瞬间辐射的具有一定能量和强度的中子、 γ 射线可在 SiGe HBT 器件材料内引入极强的瞬态电离效应和位移损伤效应. 其中强的瞬态电离效应可在器件内引入高浓度的非平衡载流子 (电子-空穴对), 在半导体器件耗尽层灵敏区可形成

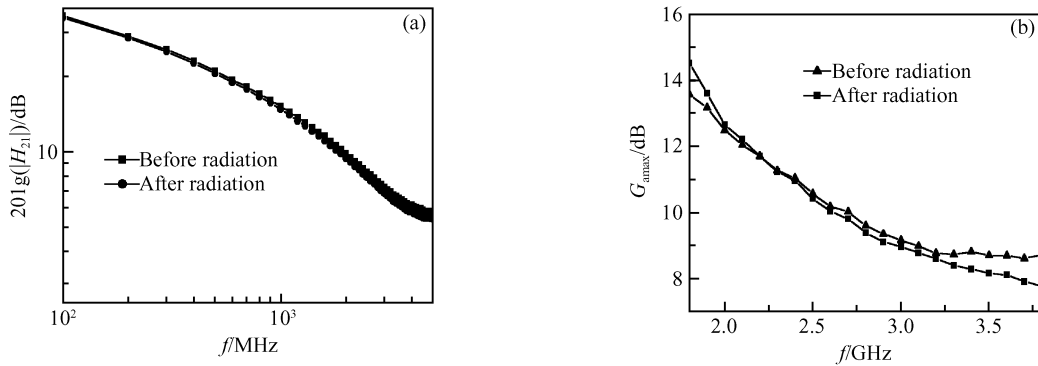


图 7 SiGe HBT 器件交流增益 $|H_{21}|$ (a) 和最大可用功率增益 G_{amax} (b) 在反应堆脉冲中子、 γ 辐照前后的变化
Fig. 7 Values of the SiGe HBT sample's AC gain $|H_{21}|$ (a) and maximum available gain G_{Amax} (b) change before and after reactor pulse neutron and γ irradiation

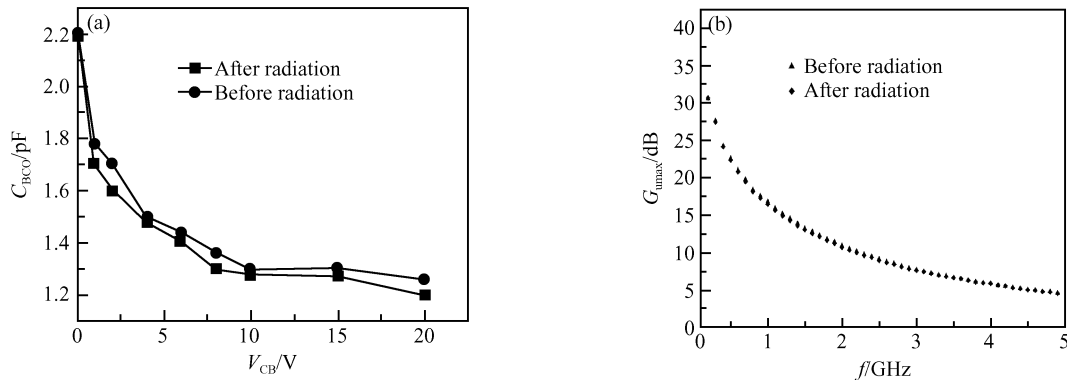


图 8 辐照前后 SiGe HBT 器件 B-C 结电容(a)和最大单项化功率增益(b)的变化

Fig. 8 Changes of the B-C junction capacitance (a) and the maximum unilateral gain (b) for the SiGe HBT device before and after irradiation

瞬态光电流,在 SiO_2 -Si 界面生成界面态和在 SiO_2 绝缘层内引入陷阱电荷.位移损伤效应产生大量的位移原子,形成点缺陷和各种复杂的缺陷.由于本实验脉冲 γ 平均能量较低, γ 位移损伤主要形成点缺陷.1MeV 中子产生的反冲原子平均能量为 $50\text{keV}^{[9]}$,因此本实验中子辐射位移损伤可产生大量的缺陷团(硅材料中缺陷团产生阈能为: $E_c = 5\text{keV}^{[9]}$).位移损伤缺陷可在半导体材料禁带内形成附加的一种或多种缺陷能级.根据缺陷能级在禁带内所处的位置不同,形成载流子的 G-R 中心、陷阱中心、隧穿效应和去除效应(补偿施主或受主).位移损伤效应产生的附加缺陷能级可导致半导体材料少数寿命减少^[10],漏电流增加,多数载流子浓度降低和迁移率下降等^[11].

一般地,对于反应堆瞬态辐射,脉冲过后,电离效应产生的电子浓度衰减很快,同时位移效应形成的缺陷通常是不稳定的,这些缺陷有的很快恢复到原位(如点缺陷),宏观上表现为器件的瞬态退火现象;有些缺陷经过短期动力学运动后也不恢复(如

V-V, V-O(A 中心)和一些缺陷团等)^[12],形成中子辐照永久位移损伤效应.文献[3]用深能级瞬态谱仪探测到了 SiGe HBT 反应堆中子辐照在 n-Si 集电区生成的磷-空位(P-V, 又称 E 中心)和双空位(V-V)缺陷,这些相对稳定的辐射位移损伤缺陷是形成器件电参数永久退化的主要原因之一.

根据半导体物理学理论,半导体电阻率的大小取决于体内多数载流子浓度,由于辐照引入的大量缺陷对多数载流子起着陷阱和俘获中心的作用,束缚多数载流子不参与导电,即起着多数载流子浓度降低的作用,而导致半导体材料电阻率的增加.辐照引起的多数载流子去除效应使器件电导率下降,电阻率增加,因而器件电阻增加.同时,辐照引起的载流子去除效应可使得半导体器件耗尽层变宽,从而使器件结电容在辐照后减小.研究表明,原始掺杂浓度越低的材料,载流子去除效应越严重^[13].

与 Si BJT 工作原理类似, SiGe HBT 的直流增益取决于发射区发射的多数载流子注入到基区部分形成的基极电流 I_B 和被集电区收集部分形成的集

电极电流 I_C 的分配比例. 对共射极连接, 电流增益定义为 I_C/I_B ^[13]. 已知辐射缺陷能级使半导体材料内载流子 G-R 中心和陷阱中心浓度增加, 此效应可引起 SiGe 基区载流子复合增强, 少子寿命减少. 同时, 电离效应引入的界面态密度的增加及在 E-B 结隔离层中产生的氧化物陷阱电荷导致界面势垒的改变, 致使载流子表面复合增强^[1], 此效应会产生附加的基区表面电流. 二者综合结果是导致基极电流增加和电流增益减小的主要变化机制. 反过来, 电流增益的减小使得在 I_B 一定的条件下, I_C 减小. 此外, 辐射缺陷导致的载流子 G-R 中心和陷阱中心浓度的增加也是引起器件漏电流增加、击穿电压和开启电压降低的主要原因^[14].

4 小结

综上所述, 反应堆脉冲中子、 γ 辐照 SiGe HBT 损伤效应特点总结如下: (1) 反应堆脉冲中子产生的永久位移损伤效应是引起器件增益减小, 漏电流和击穿电压增加等电参数变化的主要原因; (2) $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的脉冲中子注量和 256Gy (Si) γ 总剂量同时辐照对 SiGe HBT 直流增益降低只有 20% 左右, 特征截止频率 f_T 基本不变, f_{\max} 参数略有减小. 表明 SiGe HBT 具有一定的抗瞬态辐射能力. 此外, 对于器件材料工艺结构、中子注量大小、中子能量、不同中子- γ 剂量率比、工作环境温度、器件偏置条件和脉冲辐照前后加电工作时间等因素对 SiGe HBT 损伤程度的影响有待进一步研究.

致谢: 本工作实验得到了西北核技术研究所脉冲反应堆研究室、三室的领导、同事和课题组同事的有力支持; 三室一组为器件筛选与测量提供了方便的测量设备. 课题组唐本奇博士对本工作的完成提供了关键的技术指导. 在此对他们的支持衷心地表示感谢.

参考文献

- [1] Cressler J D, Niu Guofu. Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors. Boston, London: Artech House, 2003
- [2] Ohyama H, Vanhellefont J, Takami Y. Degradation of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ epitaxial heterojunction bipolar transistors by 1-MeV fast neutrons. IEEE Trans Nucl Sci, 1995, 42(6): 1550
- [3] Meng Xiangti, Wang Ruijian, Kang Aiguo. Comparison of neutron irradiation effects on the electrical performance of SiGe HBT and Si BJT. Rear Metals, 2003, 22(1): 69
- [4] Zhang Shingming, Niu Guofu, Mathew S J. A comparison of the effects of gamma irradiation on SiGe HBT and GaAs HBT technologies. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(6): 2521
- [5] Grens C M, Haugerud B M, Sutton A K. The effects of proton irradiation on the operating voltage constraints of SiGe HBTs. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52(6): 2403
- [6] Huang Wentao, Wang Jilin, Liu Zhinong, et al. Electrical performance analysis of electron irradiated SiGe HBT and Si BJT. Nuclear Techniques, 2005, 28(3): 213 (in Chinese) [黄文韬, 王吉林, 刘志农, 等. 电子辐照 SiGe HBT 和 Si BJT 的直流特性分析. 核技术, 2005, 28(3): 213]
- [7] Knoll G F. Radiation detection and measurement. Beijing: Atomic Energy Press, 1988 (in Chinese) [Knoll G F. 辐射探测与测量. 北京: 原子能出版社, 1988]
- [8] Displacement damage effects. WP1 study report. No. 15157/01/NL/PA. 2002
- [9] Moll M. Radiation damage and annealing in view of QA aspects. <http://www.cern.ch/ssd>
- [10] Shi Yi, Wu Fengmei, Shen Dexun, et al. Influence of disordered regions on minority carrier lifetime in neutron irradiation Si. Chinese Journal of Semiconductors, 1989, 10(9): 672 (in Chinese) [施毅, 吴凤美, 沈德勋, 等. 中子辐照损伤区对硅少数载流子寿命的影响. 半导体学报, 1989, 10(9): 672]
- [11] Claeys C, Simoen E. Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- [12] Jiang Yingjie, Jia Wenhai, Zhao Ruqing, et al. Study of pulse neutron irradiation effect for transistor-transient annealing experiment. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1966, 16(1): 56 (in Chinese) [蒋英杰, 贾温海, 赵汝清, 等. 双极晶体管脉冲中子辐照效应-瞬时退火实验研究. 核电子学与探测技术, 1966, 16(1): 56]
- [13] Chaffin R J. Microwave semiconductor device: principle and radiation effects. Beijing: Atomic Energy Press, 1980 (in Chinese) [Chaffin R J. 微波半导体器件: 原理和辐射效应. 北京: 原子能出版社, 1980]
- [14] Schwarze G E. Neutron and Gamma irradiation effects on power semiconductor switches. NASA Technical Memorandum 103200, 1990

[1] Cressler J D, Niu Guofu. Silicon-germanium heterojunction

Experimental Study on Pulse Neutron and Gamma Ray Irradiation Effects on SiGe HBT

Liu Shuhuan^{1,2,†}, Lin Dongsheng², Guo Xiaoqiang², Liu Hongbing³, Jiang Xinbiao²,
Zhu Guangning², Li Da², Wang Zujun², Chen Wei², Zhang Wei⁴, Zhou Hui²,
Shao Beibei¹, and Li Junli¹

(1 *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(2 *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China*)

(3 *The 13 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China*)

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

Abstract: Changes in the typical electronic parameters of SiGe HBTs irradiated by pulse neutron and gamma rays from a reactor are measured. The DC common emitter static current gain of the SiGe HBTs only decreases by about 20% after being irradiated with $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ neutron fluence and 256.85 Gy(Si) gamma total dose. The base current and the junction leakage current increase, while the collector current and the breakdown voltage decrease for SiGe HBTs after radiation. After irradiation, the cutoff frequency f_T is nearly unchanged, but the maximum oscillation frequency f_{\max} decreases a little. The mechanisms of the reactor pulse neutron and gamma rays irradiation damage for SiGe HBTs are preliminarily analyzed.

Key words: SiGe HBT; radiation effects; reactor

EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2007)01-0078-06

† Corresponding author. Email: liu-sh03@mails.tsinghua.edu.cn

Received 6 June 2006, revised manuscript received 5 September 2006