

SiGe HBT ⁶⁰Co 射线辐照效应及退火特性

牛振红^{1,2,†} 郭旗¹ 任迪远¹ 刘刚^{1,2} 高嵩^{1,2}

(1 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了国产 SiGe 异质结双极晶体管(HBT) ⁶⁰Co 射线 100Gy(Si) ~ 10kGy(Si) 总剂量辐照后的辐照效应及辐照后的退火特性. 测试了辐照及退火后的直流电参数. 实验结果显示, 辐照后基极电流 (I_b) 明显增大, 而集电极电流 (I_c) 基本不变, 表明 I_b 的增加是电流增益退化的主要原因. 退火结果表现为电流增益 ($\beta = I_c / I_b$) 继续衰减, 表明 SiGe HBT 具有“后损伤”效应. 对其机理进行了探讨, 结果表明其主要原因是室温退火中界面态继续增长引起的.

关键词: SiGe 异质结双极晶体管; 电离辐射; 退火; 后损伤效应

PACC: 6180E **EEACC:** 2560J

中图分类号: TN323+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)09-1608-04

1 引言

早在 20 世纪 50 年代, Kroemer 就提出了采用宽禁带材料作发射区的 HBT 技术可大幅度提高晶体管的频率性能^[1]. 但由于受材料制备及器件工艺的限制, 一直未做出性能良好的 HBT. 直到 1987 年, IBM 的 Iyer 制造了第一只有器件性能的 SiGe HBT^[2], 此后 SiGe 技术异军突起, 发展迅速. 由于 SiGe HBT 具有高频、高电流增益、低温特性好等诸多优点且具有 Si 基器件的“低成本”, 应用极为广泛^[3]. 因此, SiGe 材料和器件的研究已经成为半导体研究的热点之一.

SiGe HBT 的优点使其具有良好的空间应用前景, 而空间辐射环境又要求电子元器件具有较好的抗辐射性能, 所以研究 SiGe HBT 的辐射效应、辐射损伤机理、抗辐射能力评估方法和抗辐射加固技术是十分必要的. 国外已经开展了一些这方面的研究, 而国内相关报道极少. 为促进国产 SiGe HBT 技术的发展及其在航天领域的应用, 此文研究了国产 SiGe HBT ⁶⁰Co 射线辐照效应及退火特性, 探讨了其损伤机理.

2 实验

实验样品为国产 npn 型 SiGe HBT, 其结构示意图如图 1 所示. 辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所 ⁶⁰Co 辐射源完成. 辐照剂量率为

1. 65 Gy (Si) / s, 分别在 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 Gy (Si) 总剂量辐照后测量了其电参数, 包括集电极电流 I_c , 基极电流 I_b , 电流增益. 测试仪器为 HP-4142B (电压电流源/表)、HP-16088B (测试盒) 和 ICS 分析系统. 每次测试均在 20min 内完成.

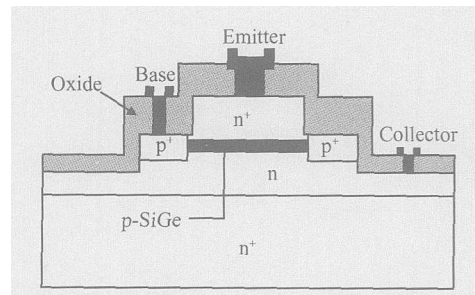


图 1 SiGe HBT 结构示意图

Fig. 1 Structure of SiGe HBT

退火试验是在室温搁置浮空状态下进行的, 退火总时间为 188h.

3 结果

研究了 SiGe HBT 辐照和退火后直流参数的变化情况. 和常规 SiBJT 一样, 电流增益是 SiGe HBT 最重要且对电离辐射最敏感的参数. 图 2 给出了 SiGe HBT 电流增益 在不同总剂量辐照后和辐照结束后退火 188h 随 I_c 的变化关系. 图 3 和图 4 为 I_b , I_c 和电流增益随总剂量和退火时间的变化关系.

† 通信作者. Email: niuzhenhong@126.com

从图 2 可以看出,随辐照总剂量增加,电流增益明显下降,更为引人注意的是经过 188h 室温浮空退火后电流增益在继续衰减,表明 SiGe HBT 具有后损伤效应。

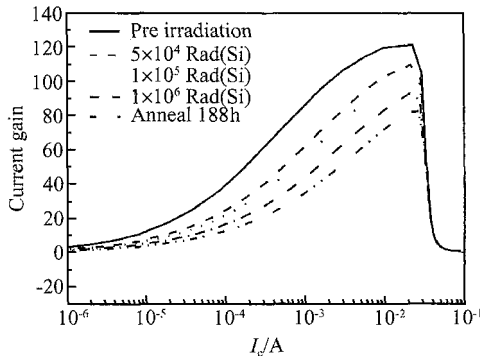


图 2 SiGe HBT 辐照和退火后电流增益随 I_c 的变化

Fig.2 Current gain as a function of I_c for SiGe HBT after irradiation and annealing

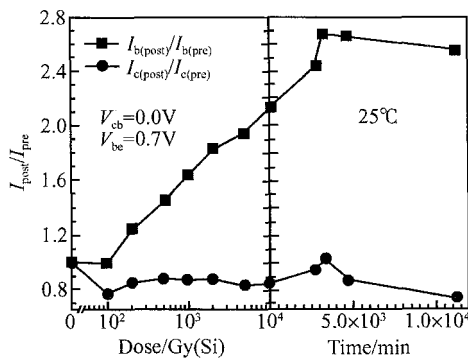


图 3 SiGe HBT I_b 和 I_c 随辐照总剂量和退火时间的变化关系

Fig.3 I_b and I_c for SiGe HBT versus total dose and annealing time

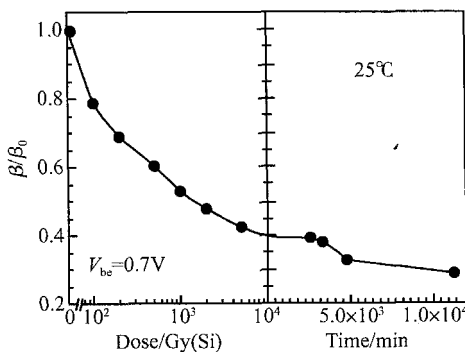


图 4 SiGe HBT 电流增益随辐照总剂量和退火时间的变化关系

Fig.4 Current gain for SiGe HBT versus total dose and annealing time

从图 3 可看到,随着辐照总剂量的增加, I_c 没有发生明显的变化,其变化幅度最大仅为 20%;而 I_b 增大非常明显,在总剂量达到 10k Gy (Si) 时,其值增大为辐照前的 2.14 倍.从图 3 还可以看到,随着退火时间增加, I_b 在继续增大,在 3.3×10^3 min 退火后, I_b 增大到最大,约为辐照前的 2.65 倍, 3.3×10^3 min 后, I_b 趋于饱和,直到 188h 退火试验结束,基本上不再变化; I_c 变化依然很小。

辐照和退火后 I_b 和 I_c 的变化,导致了电流增益的变化,如图 4 所示.从图中可以明显看出,随着总剂量的增加,电流增益逐渐衰减,在总剂量达到 10k Gy (Si) 时,电流增益衰减为辐照前的 40%.在辐照后的退火过程中,电流增益随时间增加继续退化,在 5×10^3 min 退火后,降为辐照前的 32%,而后趋于饱和.这进一步说明 SiGe HBT 具有后损伤效应.结合图 3,可以得出结论,辐照和退火后 SiGe HBT 电流增益退化主要是由 I_b 的增大引起的。

4 讨论

从以上实验结果可以看出, SiGe HBT 的电流增益随辐照总剂量增加逐渐衰减,可得出结论, SiGe HBT 电流增益退化的主要原因是基区电流 I_b 的增大引起的.为方便讨论 SiGe HBT 的辐照效应,把 I_b 分成两部分,即体成分 (I_{bulk}) 和表面成分 ($I_{surface}$),则电流增益表达式如下:

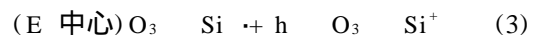
$$= I_c / I_b = I_c / (I_{bulk} + I_{surface}) \quad (1)$$

其中 I_{bulk} 主要跟中子等重粒子由于位移损伤效应在基区产生的复合中心有关;而 $I_{surface}$ 与电离辐射损伤有关.对于 SiGe HBT 的 I_b ,基-射 (eb) 结附近的表面复合电流 I_{seb} ,对电离辐射最为敏感,可由下式表示:

$$I_{seb} = qS_b A_b n_c \quad (2)$$

式中 q 为电子电荷电量; S_b 为基区表面复合速度,其与快表面态有关; A_b 为基区表面复合有效表面积; n_c 为表面处非平衡电子浓度,它与注入电流密度及氧化层中的正电荷密度有关。

SiGe HBT 基于常规 Si 双极晶体管平面结构工艺,通常在 eb 结上覆盖一层 SiO_2 钝化层,如图 5 所示,电离辐射会感生氧化物陷阱电荷和界面态^[3,4].氧化物陷阱电荷是由电离辐射产生的空穴输运到 Si/ SiO_2 界面附近,被集中在离 Si/ SiO_2 界面约 10nm 陷阱区的陷阱俘获所形成,从而形成氧化物陷阱电荷的积累.对氧化物电荷贡献较大的是 E 中心、间隙氧施主中心 O_i 和三价硅施主中心 Si_3 $Si \cdot$,这些俘获中心俘获空穴形成氧化物陷阱电荷,其反应式分别如下:



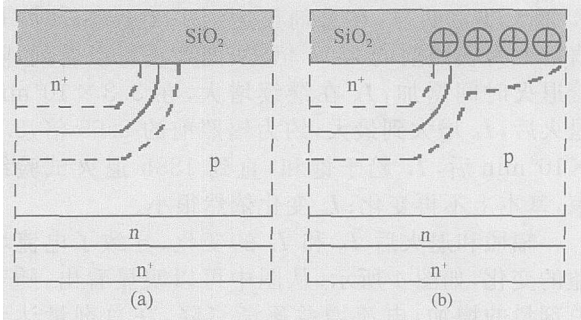
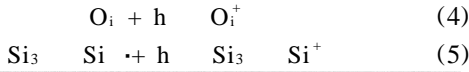


图 5 npn 型晶体管 Si/SiO₂ 界面处辐射诱生正电荷对 eb 结空间电荷区的影响 (a) 辐照前;(b)辐照后
Fig. 5 Effect of positive radiation-induced charge on the emitter-base depletion region of a npn BJT (a) Before irradiation ;(b) After irradiation

同时辐照也使界面态增长,氧化物陷阱电荷和界面态都会使表面处非平衡电子浓度 n_e 和基区表面复合速度 S_b 增大.从图 5 中还可以看出,辐射诱生正电荷的积累将耗尽基区,即耗尽层向基区扩展,结果导致总的耗尽表面积增加,使 A_b 增加.由(2)式可知, n_e, S_b 和 A_b 的增大会导致 I_{seb} 增大, I_{seb} 是 $I_{surface}$ 的主要组成部分,由(1)式可知, $I_{surface}$ 的增大导致 I_b 的增大,从而导致电流增益 随着 I_b 增大而减小.印证了辐照后电流增益 退化主要是 I_b 的增大引起的这一结论.

从图 3 和图 4 可知, SiGe HBT 辐照后进行室温退火实验,其结果表现为基区电流 I_b 继续增大,电流增益 继续衰减.这个结果类似于 MOSFET 辐照后退火中界面态的产生引起的损伤效应^[5,6].

界面态是指存在于 Si/SiO₂ 界面附近(离界面距离约 0.5nm)的电子能级.其电荷状态可以为正、负或中性,根据电荷态可分为施主型和受主型. Si/SiO₂ 界面应力区的非饱和键合的 Si 悬挂键和弱键(如 Si-H, Si-OH 键)及应力键(如 Si-O 键)是辐照引入界面态的产生源^[7,8].

根据辐射感生界面态增长的时间特性,可以分为快界面态和慢界面态,快界面态几乎随辐照同步产生,这可能是辐射和界面直接作用的结果.辐照后 SiGe HBT 的退化就是氧化物陷阱电荷和快界面态共同作用的结果.而慢界面态的形成时间比较长,一般在辐照后秒到千秒或更长时间产生.

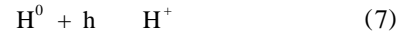
SiGe HBT 辐照后的退火结果表现为基极电流继续增大,这可以认为是辐照后慢界面态的逐渐产生和积累所造成的.通常慢界面态产生的机理可以用氢模型来解释.

氢模型^[6,9]认为,工艺过程引入的三价 Si 在未接受辐照时,与 H 结键而被掩盖,当受到辐照时,某

些 Si-H 键被裂断,产生原子 H,其反应如下:



这种裂断可以是辐射直接作用,也可以是空穴运输或空穴在界面被俘获而产生的.原子 H 与俘获辐射感生的空穴形成离子 H,反应如下:



H⁺ 从氧化物中释放出来,运输或扩散到界面,再通过来自衬底的电子与界面的 Si-H 键相互作用而最终形成界面态 Si₃ Si⁺,反应如下:



界面态的增长依赖于释放 H, H 在 SiO₂ 中的迁移需要很长时间,一般来说,双极晶体管的 SiO₂ 钝化层都比较厚, H 迁移到 Si/SiO₂ 界面需要更长的时间.所以 H 模型可以解释辐照后退火中慢界面态的产生和积累过程.

晶体管的表面复合速率 S_b 与界面态密度 D_{it} 有如下关系^[10]:

$$S_b = (kT/2) v_t (e_p) ^{1/2} D_{it} \quad (9)$$

式中 k 为波尔兹曼常数; v_t 为载流子热运动速度; e_p 分别为电子和空穴的俘获截面.可以看出,表面复合速率与界面态密度成正比.辐照后的室温退火过程中氧化物陷阱电荷是相当稳定的,基本不发生退火.界面态的不断形成和积累,使表面复合速率随着界面态密度的增大而增大,从(2)式可以看出, S_b 的增大使得 eb 结附近的表面复合电流 I_{seb} 增大,最终导致基极电流 I_b 增大和电流增益的下降.因此,可以认为 SiGe HBT 辐照后退火中具有的后损伤效应是由于慢界面态的不断形成和积累造成的.

通过上述讨论,辐射感生氧化物陷阱电荷和界面态对 SiGe HBT 电参数的退化都起着很重要的作用.但由于 SiGe HBT 的工艺结构和内部电场分布比 MOS 器件更为复杂,使辐照感生界面态的物理特性分析也更为复杂.对于这种国产 SiGe HBT 后损伤效应更深一层的解释,还需要进一步的微观实验研究.

5 结 论

从以上辐照和退火实验结果及分析可得出结论:

(1) SiGe HBT 的电流增益对电离辐射很敏感,而且研究结果表明,电流增益的退化主要是由基极电流退化导致.

(2) 在浮空室温退火实验中,电流增益继续退化,结果表明,依然是因为 I_b 的增大引起的.分析其主要原因,是由于慢界面态的不断产生和积累,使表面复合增加,从而导致 I_b 继续增大,电流增益继续退化.

(3) 对国产 SiGe HBT 的后损伤效应必须引起重视,在对此类国产 SiGe HBT 的辐射效应评估时,退火实验对建立此类器件更为准确的抗辐射能力评估方法有着十分重要的意义.

(4) 优化 SiGe HBT 表面钝化技术,可以抑制氧化物陷阱电荷和界面态的增长,将会提高 SiGe HBT 的抗 射线辐射能力.

参考文献

- [1] Kroemer H. Theory of wide-gap emitter for transistors. Proc IRE 45,1957:1535
- [2] Iyer S S,Patton G L,Delage S S,et al. Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy. IEDM Tech Dig,1987:874
- [3] Zhang S,Niu G,John 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
- [4] Ren Diyuan,Lu Wu,Guo Qi,et al. Radiating and annealing on CMOS operation amplifier. Chinese Journal of Semiconductors,2004,25(6):731 (in Chinese) [任迪远,陆妩,郭旗,等. CMOS 运算放大器的辐照和退火行为. 半导体学报,2004,25(6):731]
- [5] Schrimpf R D,Graves R J,Schmidt D M,et al. Hardness-assurance issues for lateral PNP bipolar junction transistors. IEEE Trans Nucl Sci,1995,42(6):1641
- [6] Saks N S,Griscom D L,Klein R B. Formation of interface traps in MOSFETs during annealing following low temperature irradiation. IEEE Trans Nucl Sci,1988,35(6):1234
- [7] Poindexter E H,Caplan P J,Deal B E,et al. Interface states and electron spin resonance centers in thermally oxidized (111) and (100) silicon wafers. J Appl Phys,1981,52(2):879
- [8] Lai S K. Interface trap generation in silicon dioxide when electrons are captured by trapped holes. J Appl Phys,1983,54(5):2540
- [9] Griscom D L. Diffusion of radiolytic molecular hydrogen as a mechanism for the post-irradiation buildup of interface states in SiO₂-on-Si structures. J Appl Phys,1985,58(7):2524
- [10] Lu Wu, Ren Diyuan, Guo Qi, et al. Radiation effects and annealing characteristics of bipolar operational amplifiers. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(5):374 (in Chinese) [陆妩,任迪远,郭旗,等. 双极运算放大器的辐射效应和退火特性. 半导体学报,1998,19(5):374]

Total Dose Gamma Irradiation Effects and Annealing Characteristics of a SiGe HBT

Niu Zhenhong^{1,2,†}, Guo Qi¹, Ren Diyuan¹, Liu Gang^{1,2}, and Gao Song^{1,2}

(1 Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The total-dose radiation effects and annealing characteristics of a SiGe HBT are studied. It is found that the degradation of the current gain is dominated by the increase of I_b . The mechanisms behind the post-damage effects of total-dose radiation are discussed. The chief factor that causes post-damage effects is the increase in the interface states.

Key words: SiGe HBT; ionizing radiation; annealing; post-damage effect

PACC: 6180E **EEACC:** 2560J

Article ID: 0253-4177(2006)09-1608-04

†Corresponding author. Email: niuzhenhong@126.com