

不同剂量率下锗硅异质结双极晶体管电离 损伤效应研究*

孙亚宾^{1)2)†} 付军¹⁾²⁾ 许军¹⁾²⁾ 王玉东¹⁾²⁾ 周卫¹⁾²⁾
张伟¹⁾ 崔杰¹⁾ 李高庆¹⁾ 刘志弘¹⁾²⁾

1) (清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

2) (清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

(2013年5月24日收到; 2013年7月3日收到修改稿)

对于相同制作工艺的NPN锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT), 在不同辐照剂量率下进行⁶⁰Co γ 射线的辐照效应与退火特性的研究. 测量结果表明, 两种辐照剂量率下, 随着辐照总剂量增加, 晶体管基极电流增大, 共发射极电流放大倍数降低, 且器件的辐照损伤、性能退化与辐照剂量率相关, 低剂量率下辐照损伤较高剂量率严重. 在经过与低剂量率辐照等时的退火后, 高剂量率下的辐照损伤仍较低剂量率下的损伤低, 即待测SiGeHBT具有明显的低剂量率损伤增强效应(ELDRS). 本文对相关的物理机理进行了探讨分析.

关键词: 锗硅异质结双极晶体管, 低剂量率辐照损伤增强, 辐照效应

PACS: 61.80.-x, 85.30.Pq, 42.88.+h, 79.60.Jv

DOI: 10.7498/aps.62.196104

1 引言

锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT), 由于优异的低温性能以及与硅互补金属氧化物半导体(Si CMOS)较好的工艺兼容性, 近年来广泛应用于混合信号与射频微波电路等方面, 成为III-V化合物技术的一个有力竞争者^[1]. 空间辐射环境会对航天电子器件产生电离损伤、位移损伤及单粒子效应, 造成电子器件性能的严重退化^[2-9]. 锗硅异质结双极晶体管由于重掺杂外基区、窄发射区-基区隔离氧化物、薄本征基区等特殊器件结构, 通常具有兆拉德(Mrad)级的总剂量容忍度, 在航空航天与其他辐射环境中有广泛应用^[3-5]. 通常锗硅异质结双极晶体管Mrad量级的总剂量容忍度是根据美军标MIL-STD 883在50—300 rad(Si)/s条件下估测验证的^[10]. 然而, 在实际空间辐射环境中, 辐射剂量率通常极低(典型的剂量率范围为 10^{-4} —

10^{-2} rad(Si)/s). 近年来研究发现, 某些硅双极器件(如Si BJT)在该低剂量率范围内损伤比高剂量率下大几十倍, 即存在较强的低剂量率损伤增强效应(ELDRS)^[11,12]. 因此, 由于ELDRS效应的存在, 地面加速辐照实验可能错误估计空间低剂量率下的电子元器件的抗辐照能力, 从而给卫星等电子系统带来可靠性隐患. 因此, 对于ELDRS效应的机理需进一步研究.

目前, 国内外虽已有某些双极器件(如Si BJT)在低剂量率下辐照损伤增强的报道^[11,12], 但关于SiGe HBT低剂量率损伤增强的研究报道尚还较少, 且对于SiGe HBT是否具有ELDRS效应及其低剂量率损伤机理目前缺乏统一的认识. 此外, 由于SiGe HBT电离辐照效应与器件类型、制造工艺、封装过程等密切相关, 为了给抗辐照SiGe HBT制作工艺提供理论支持, 有必要对SiGe HBT进行一系列辐照实验研究. 为了更好地研究实际空间低剂量率对电离辐照效应影响, 本文选取自主设计的

* 国家自然科学基金(批准号: 60976013)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sunyb10@mails.tsinghua.edu.cn

NPN SiGe HBT 进行不同剂量率的辐照实验. 结果表明, 辐照剂量率越低, 辐照损伤和器件性能退化越严重, 即待测 SiGe HBT 具有明显的低剂量率损伤增强效应. 文中还对相关机理进行了讨论.

2 试验样品与方法

实验样品为清华大学微电子学研究所自主设计的垂直 NPN SiGe HBT, 其结构示意图如图 1 所

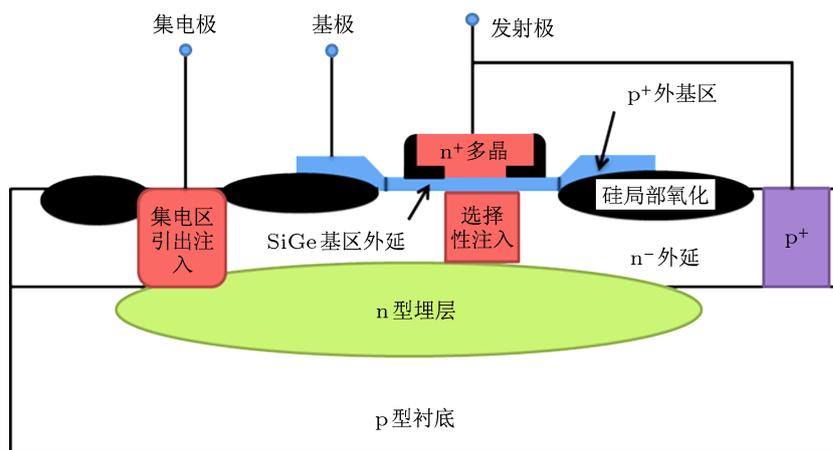


图 1 垂直 NPN 锗硅异质结双极晶体管的横截面示意图

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的大、小钴源上进行. 辐照高、低剂量率分别为 50 rad(Si)/s, 0.1 rad(Si)/s, 辐照剂量点选取为 50 krad(Si), 100 krad(Si), 150 krad(Si), 170 krad(Si), 300 krad(Si) 和 500 krad(Si). 样品置于根据美军标准制作的铅铝屏蔽盒内, 以消除低能散射的影响, 防止剂量增强效应的发生. 在整个辐照过程中, 样品均保持正向有源模式 ($I_C = 5 \text{ mA}$, $V_{CE} = 2 \text{ V}$). 对于高剂量率辐照样品当总剂量达到 500 krad(Si) 后, 在保持与辐照相同的偏置条件下进行室温退火, 退火时间与低剂量率辐照时间相同 (约 1420 h).

实验采取移位测试的方法, 在以上各辐照剂量点下, 利用 Keithley 4200 半导体参数分析仪在室温下对辐照晶体管参数进行测量, 每次电学参数测试都在辐照或者退火后 2 h 内完成.

3 实验结果

图 2 所示为高、低剂量率辐照条件下, SiGe HBT 在不同辐照剂量点下正向 Gummel 特性. 对于两种不同的高、低剂量率辐照, 基极电流 (I_B) 均随辐照剂量单调增加, 特别是在低发射结-基极偏压

示. 其制作工艺如下: 首先通过离子注入在 p 型衬底上形成 n 型埋层 (NBL), 然后依次进行轻掺杂外延层的生长、硅的局部氧化 (LOCOS)、集电区引出注入 (n^+ sinker)、p 型原位掺杂 SiGe 基区外延、集电区选择性注入 (SIC) 和重掺杂发射极多晶. 晶体管发射极与衬底通过金属连接在一起. 器件采用交叉指状版图设计, 包含 4 个 $0.4 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的发射极条.

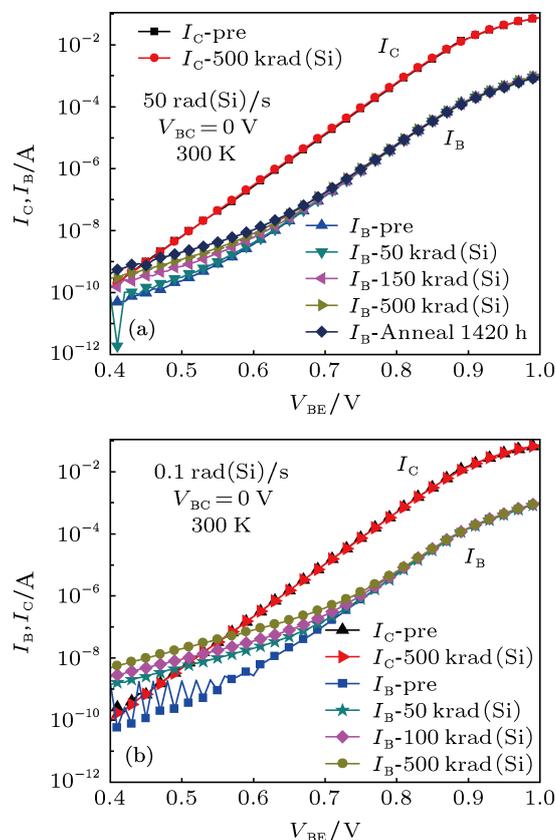


图 2 高剂量率 (a) 与低剂量率 (b) 辐照下 SiGe HBT 正向 Gummel 特性

(V_{BE}) 区域. 与 I_B 较大的退化相比, 集电极电流 (I_C) 在整个辐照过程中几乎保持不变, 因此, 辐照后晶体管的共发射极电流放大倍数 β ($\beta = I_C/I_B$) 将会显著下降. 高剂量率辐照样在在经过与低剂量率辐照等时的退火过程中, 基极电流继续增加, 存在明显的后损伤效应, 如图 2(a) 所示.

为了定量比较高、低剂量率辐照对器件性能退化的影响, 选取的电学参数均是在 $V_{BE} = 0.6, 0.7\text{ V}$ 的值. 在此引入两个电学参数: 过剩基极电流 ΔI_B ($\Delta I_B = I_{B,post} - I_{B,pre}$) 和归一化电流放大倍数 β_{nor} ($\beta_{nor} = \beta_{post}/\beta_{pre}$), 其中 $I_{B,pre}, \beta_{pre}$ 和 $I_{B,post}, \beta_{post}$ 分别为辐照前后相应的基极电流和电流放大倍数.

图 3 为 $V_{BE} = 0.6, 0.7\text{ V}$ 条件下高、低剂量率辐照的晶体管 ΔI_B 随辐照总剂量和退火时间的变化. 两种偏压下, ΔI_B 均随辐照剂量增加而增加, 但对于相同的辐照总剂量, 低剂量率下基极电流退化明显较高剂量率严重. 如在 500 krad(Si) , $V_{BE} = 0.6\text{ V}$ 条件下, 低剂量率辐照对应 ΔI_B 为 77 nA , 比高剂量率下 (4.5 nA) 约高一个数量级. 两种偏压下, 高剂量率辐照样在在经过与低剂量率辐照等时的室温退火过程中, 过剩基极电流均在初始的 25 h 内先下降, 然后随退火时间的增加而逐渐增加, 但其稳定值仍较低剂量率下对应的过剩基极电流低.

图 4 为 $V_{BE} = 0.6, 0.7\text{ V}$ 两种偏置条件下高、低剂量率辐照的晶体管归一化电流放大倍数 β_{nor} 随辐照剂量和退火时间的变化. 结果显示, 辐照剂量率越低, 电流放大倍数退化越严重. 与退火过程中 ΔI_B 变化相对应, 归一化电流放大倍数在初始退火的 25 h 内先增加, 而后随着退火时间的增加而下降. 为了定量表征辐照剂量率对于晶体管电流放大倍数退化的影响, 在此引入物理量“增强因子 $EF = \beta_H/\beta_L$ ”, 其中 β_L 为低剂量率辐照下晶体管电流放大倍数, β_H 为在相同辐照总剂量时, 高剂量率辐照下晶体管电流放大倍数. 由于相同辐照总剂量下, 高、低剂量率辐照时辐照时间的差异, EF 包含“时间累积效应”与“真正剂量率效应”, 为了获得“真正剂量率效应”, 需要对高剂量率辐照样进行与低剂量率辐照等时的退火处理, 然后再进行高、低剂量率放大倍数的比较. 根据美军标 MIL-STD-883G^[10], 若 $EF > 1.5$, 则存在 ELDRS 效应, 且 EF 越大表示 ELDRS 效应越明显, 若 $EF \leq 1.5$, 则不存在 ELDRS 效应.

图 5 为两种 V_{BE} 偏压下 NPN 锗硅异质结双极晶体管增强因子 EF 随辐照总剂量和退火时间的变

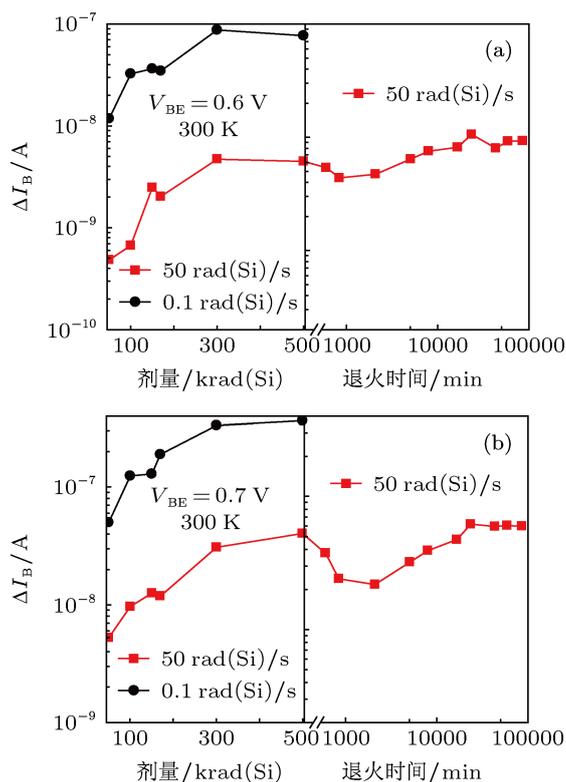


图 3 两种 V_{BE} 偏压下高、低剂量率辐照的晶体管过剩基极电流 ΔI_B (a) $V_{BE} = 0.6\text{ V}$; (b) $V_{BE} = 0.7\text{ V}$

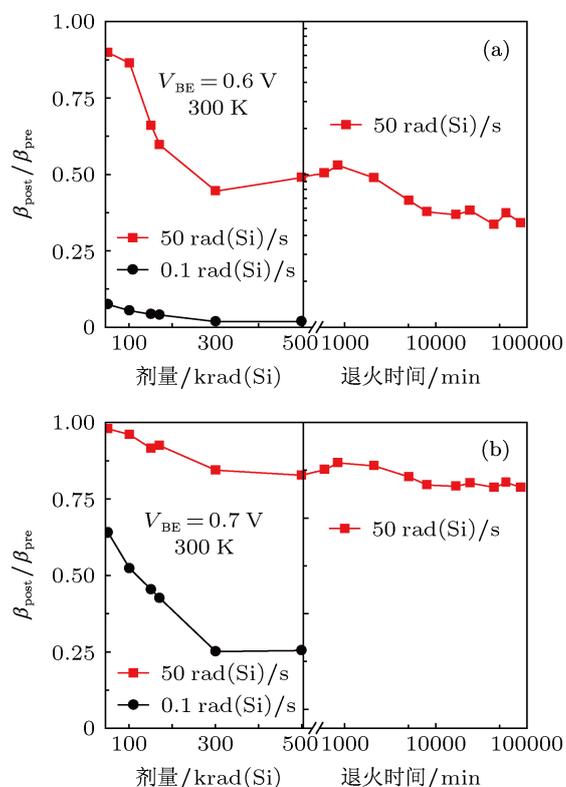


图 4 两种偏压下高、低剂量率辐照对应的归一化电流放大倍数 (a) $V_{BE} = 0.6\text{ V}$; (b) $V_{BE} = 0.7\text{ V}$

化. 两种偏置条件下, 晶体管 EF 因子均大于 1.5 , 如在 $V_{BE} = 0.6\text{ V}$, 500 krad(Si) 总剂量下, 退火前 EF

约为 25.4, 在经过与低剂量率辐照等时的室温退火后, EF 仅恢复至 17.6, 即待测锗硅异质结双极晶体管表现出真正的 ELDRS 效应, 而非辐照损伤的时间累积效应.

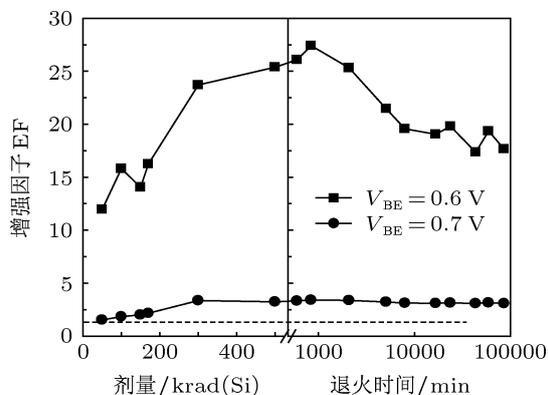


图 5 两种偏置条件下, 增强因子 EF 随总剂量的变化

4 讨论

⁶⁰Co γ 射线辐照会对 SiGe HBT 隔离发射区与外基区的 SiO₂ 层及 SiO₂/Si 界面造成损伤, 从而影响 SiGe HBT 电学性能. 辐照在 SiO₂ 层内产生大量电子空穴对, 电子与空穴在 SiO₂ 层内电场作用下向相反方向运动, 电子由于较高的迁移率而迅速漂移出 SiO₂ 层, 空穴则缓慢向 SiO₂/Si 界面运动而被 SiO₂ 层内陷阱俘获形成正氧化物陷阱电荷. 此外, 部分运动至 SiO₂/Si 界面的空穴会被界面陷阱俘获形成界面态 [13,14]. 研究发现, SiGe HBT 基极电流的退化主要是由于氧化层内氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷造成的 [4,14]. 辐照在 BE 结 SiO₂/Si 界面处产生的界面态可作为复合中心, 增加双极晶体管的表面复合电流. 正氧化物陷阱电荷在基区表面产生正电场, 使得 BE 结耗尽层向低掺杂的 p 型基区扩散, 耗尽层面积增加; 此外, 基区表面正电场减小了 p 型基区表面空穴浓度, 降低了基区表面载流子浓度的差异, 根据 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合理论 [1], 较小的载流子浓度差将导致较大的基区复合电流, 即进一步增加了基区表面复合电流.

对于单一 pn 结其电流方程通常为

$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

其中 I_S 为 pn 结反向饱和电流, $V_T = \frac{q}{kT}$ 为热电势, 约 256 mV, n 为电流理想电流因子. 当 pn 结正向工作时, 一般地有 $V \gg n \cdot V_T$, 此时 (1) 式可简化为

$$I = I_S e^{\frac{V}{nV_T}}. \quad (2)$$

通过 (2) 式可得电流理想因子 n 为

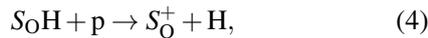
$$n = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{1}{\frac{d(\ln I)}{dV}}. \quad (3)$$

通常有 $1 < n < 2$, $n = 1$ 时对应于扩散电流成分, 在温度一定时, 理想因子 n 越大, 电流曲线的斜率越小, 电流中非理想部分 (即复合电流) 所占的比例越大. 从图 2 正向 Gummel 曲线可知在中等偏压 ($V_{BE} = 0.6-0.7$ V) 范围内, 经 500 krad(Si) 总剂量辐照后, 对于高剂量率辐照的样品, 基极电流理想因子 n 从 1.04 增加至 1.12; 对于低剂量率辐照其由 1.05 增加至 1.93. 这表明经高、低剂量率辐照后, 基极电流中存在较大的非理想成分, 此非理想成分主要是由辐照产生的氧化物陷阱电荷和界面态导致的复合电流, 即基极电流的退化确实是由于正氧化物陷阱电荷和界面态产生的复合电流导致的. 对于一定的辐照损伤, 低偏压基极电流退化较高偏压严重, 即在低偏压下这种辐照损伤会很显著的表现出来. 低偏压小注入条件下, 注入到基区的载流子在低场条件沿基区缓慢运动, 在基区表面运动时间较长, 有更多的机会被复合, 基区界面陷阱电荷导致的复合电流比重较大, 高偏压下, 漂移扩散电流比重大, 复合电流成分在总电流中的比例下降. 因此基极电流增加和电流增益退化在低偏压时较高偏压严重.

图 3 所示, 高剂量率辐照的样品在室温退火的过程中, 过剩基极电流先减小后增加, 这可能是由氧化物陷阱电荷和界面态电荷不同的退火特性所导致的. 由于较低的激活能, 氧化物陷阱电荷在室温下即可释放俘获的空穴发生退火效应, 但界面态的结合能较高, 一般情况下只有在 100 °C 以上才发生退火效应 [15]. 此外, 界面态的产生与辐照总剂量和时间有关, 相对于氧化物陷阱电荷, 其只有在一定高的总剂量和相对较长的时间内才会逐渐形成. 辐照在 SiO₂ 内部产生的空穴和 H⁺ 在后续退火过程中可能继续输运至界面, 并与界面处 Si-H 钝化键发生反应产生更多的界面态. 界面态的这种后生效应与氧化物陷阱电荷的退火效应两者共同决定图 3 所示的基极电流退火特性. 初始退火期间过剩基极电流的下降可能是氧化物陷阱电荷退火造成的, 而后续的更多界面态的形成 (界面态的后生效应) 导致了过剩基极电流随着退火时间的增加而增加, 直至达到稳定值.

双极晶体管制作工艺中不可避免的会在 SiO₂ 层内引入一些含有 H 原子的缺陷, 如非桥键氧缺陷

$S_{\text{O}}\text{H}$. 这些 H 原子缺陷对于 SiGe HBT 低剂量率电离损伤有很大的影响^[16]. 假设在⁶⁰Co 辐照过程中辐照剂量率为 g , 则电离辐照在单位体积 SiO_2 内产生的电子空穴对的速率为 γg , 其中 γ 为常数 (对于 SiO_2 , $\gamma = 8.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{rad}^{-1}$)^[17]. 如以上所讨论, 辐照产生的电子将很快漂移出氧化物, 空穴对于界面态和氧化物陷阱电荷的产生具有很大作用, 可使氧化层内部的非桥键氧缺陷释放出中性 H 原子^[16], 如下式所示:



其中 p 为辐照产生的空穴, $S_{\text{O}}\text{H}$ 为氧化层内的非桥键氧缺陷. 假设 SiO_2 内部 $S_{\text{O}}\text{H}$ 浓度足够大, 则中性 H 原子的释放速率为 $x\gamma g$, 其中 x 为参与 (4) 式反应的空穴占辐照产生总空穴的比例. 由于较低的激活能, H 原子可俘获另一 H 形成 H_2 分子



如果 (5) 式正向反应速率常数为 k_{HH} , 则在稳定条件下, H 原子浓度 C_{H} 满足方程^[16]

$$x\gamma g - k_{\text{HH}}C_{\text{H}}^2 - r_{\text{H}}C_{\text{H}} = 0, \quad (6)$$

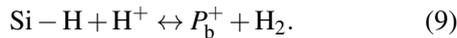
式中第一项为 H 原子的辐照产生率, 第二项是反应 (5) 的消耗项, 第三项为 H 的损失项, r_{H} 为 H 被其他非释放质子的陷阱所捕获的概率. 由 (6) 式可得

$$C_{\text{H}} = r_{\text{H}} \left(\sqrt{1 + \frac{4x\gamma g k_{\text{HH}}}{r_{\text{H}}^2}} - 1 \right) / 2k_{\text{HH}}. \quad (7)$$

辐照产生的部分 H 原子可捕获空穴并释放出质子,



假设参与 (8) 式反应的 H 原子的比例为 α , 则辐照产生质子的浓度 C_{H^+} 满足 $C_{\text{H}^+} = \alpha C_{\text{H}}$, 质子运动到 SiO_2/Si 界面, 与界面附近 Si-H 悬挂键结合形成界面态^[13], 如下式所示:



Si-H 悬挂键通常是在器件制作工艺过程中由于钝化作用而形成的, P_{b}^+ 是界面陷阱电荷即界面态. 假设 (9) 式正向反应速率常数为 k_{f} , 则存在如下界面态浓度随时间的变化关系^[16]

$$\frac{dC_{P_{\text{b}}^+}}{dt} = k_{\text{f}}C_{\text{Si}-\text{H}}C_{\text{H}^+}, \quad (10)$$

其中 $C_{P_{\text{b}}^+}$, $C_{\text{Si}-\text{H}}$ 和 C_{H^+} 分别为界面态 P_{b}^+ , 界面悬挂键 Si-H 和质子 H^+ 的浓度. 假设 SiO_2/Si 界面处

Si-H 悬挂键浓度足够大并近似认为是常数, 结合 (7) 式并积分式 (10) 可得

$$C_{P_{\text{b}}^+}(t) = \frac{\alpha r_{\text{H}} C_{\text{Si}-\text{H}} k_{\text{f}}}{2k_{\text{HH}}} \left(\sqrt{1 + \frac{4x\gamma g k_{\text{HH}}}{r_{\text{H}}^2}} - 1 \right) t, \quad (11)$$

其中 $C_{P_{\text{b}}^+}(t)$ 为任意时刻 t 相应的界面态浓度. 由 (10) 式可知, 辐照在 SiO_2/Si 界面处产生的界面态 $C_{P_{\text{b}}^+}(t)$ 浓度与辐照剂量率 g 相关. 对于高剂量率辐照, 一般满足 $\frac{4x\gamma g k_{\text{HH}}}{r_{\text{H}}^2} \gg 1$ 则 (11) 式可简化为

$$C_{P_{\text{b}}^+}(D) = \alpha k_{\text{f}} C_{\text{Si}-\text{H}} D \sqrt{\frac{x\gamma}{g k_{\text{HH}}}}, \quad (12)$$

其中 $D = gt$ 为辐照累积的总剂量, $C_{P_{\text{b}}^+}(D)$ 为任意辐照剂量 D 时对应的界面态浓度. 由 (12) 式可见, 界面态浓度随辐照剂量率的降低而增加, 剂量速率越低, 在相同的辐照总剂量下界面态浓度越高. 当剂量率降至极低以至于满足 $\frac{4x\gamma g k_{\text{HH}}}{r_{\text{H}}^2} \ll 1$ 条件时, 则 (11) 式可简化为

$$C_{P_{\text{b}}^+}(D) = \alpha k_{\text{f}} C_{\text{Si}-\text{H}} x \gamma D / r_{\text{H}}. \quad (13)$$

此时界面态的浓度为一定值与辐照剂量率无关. 结合 (12) 式, (13) 式, 当剂量率由高逐渐降低时, 辐照诱导界面态浓度逐渐增加, 相应地器件辐照损伤和性能退化越严重, 当剂量率降至某一程度时, 界面态浓度达到恒定值. 以上的分析很好的解释了 SiGe HBT 的 ELDRS 效应.

反映在物理机理上, 高剂量率辐照时, SiO_2 层内以较高的速率产生大量的 H 原子, 这些 H 原子短时间内相互结合形成 H_2 分子, 只有少数 H 原子能够运动到 SiO_2/Si 界面释放质子并形成界面态, 即 (5) 式以较大趋势向正向移动, 抑制界面态的形成. 此外, 形成的 H_2 分子由于在 SiO_2 中具有较低的扩散势垒, 可很快扩散至 SiO_2/Si 界面重新钝化硅表面悬挂键, 降低界面态浓度. 然而对于低剂量率辐照, 由于较低辐照产生率, H 原子向界面运动时很难与其他 H 原子结合形成 H_2 分子, 而是捕获空穴释放出 H^+ , 进而在 SiO_2/Si 界面形成界面态. 因此, 对于低剂量率辐照, 由于低的 H 原子损耗 (结合产生 H_2 分子) 而具有较高界面态密度, 从而导致较大的辐照损伤和性能退化, 即造成严重的低剂量率损伤增强效应.

5 结论

通过高、低剂量率的 ^{60}Co γ 辐照, 本文研究了不同剂量率对于锗硅异质结双极晶体管电离损伤的影响. 结果表明, 两种辐照剂量率下, 由于受 BE 结隔离氧化层内辐照产生的氧化物陷阱电荷和界面态的影响, 基极电流比集电极电流对辐照损伤更敏感, 导致电流放大倍数的退化. 此外, 相同的辐照剂量下, 剂量率越低, 电离损伤越严重, 即被测锗硅异质结双极晶体管具有低剂量率辐照损伤增强效

应, 主要是由于低剂量率的辐照条件下, 较低的 H 原子辐照产生率使得更多的 H 原子可运动到界面, 释放质子并形成界面态, 从而增加了过剩基极电流, 降低了晶体管的电流放大倍数, 最终导致低剂量率辐照损伤增强效应. 因此, 在设计低剂量率环境下使用的 SiGe HBT 时, 必须要足够的重视 ELDRS 效应的影响.

衷心感谢中国科学院新疆理化技术研究所辐照试验中提供的帮助.

- [1] Cressler J D, NIU, G F 2003 *Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors* (Norwood: Artech House)
- [2] Babcock J A, Cressler J D, Vempati L S, Clark S D, Jaeger R C, Haremet D L 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1558
- [3] Li X J, Lan M J, Liu M C, Yang J Q, Sun Z L, Xiao L Y, He S Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 098503 (in Chinese) [李兴冀, 兰慕杰, 刘超铭, 杨剑群, 孙中亮, 肖立伊, 何世禹 2013 物理学报 **62** 098053]
- [4] Jiang N Y, Ma Z Q, Ma P X, Racanelli M 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 2361
- [5] D'iez S, Lozano M, Pellegrini G, Campabadal F, Mandic'I, Knoll D, Heinemann B, Ullán M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1931
- [6] Hu T L, Lu W, Xi S B, Guo Q, He C F, Wu X, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076105 (in Chinese) [胡天乐, 陆妩, 席善斌, 郭旗, 何承发, 吴雪, 王信 2013 物理学报 **62** 076105]
- [7] Diestelhorst R M, Finn S, Jun B, Sutton A K, Cheng P, Marshall P W, Cressler J D, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Gustat H, Heinemann B, Fischer G G, Knoll D, Tillack B 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2190
- [8] Gao B, Liu G, Wang L X, Han Z S, Zheng Y F, Wang C L, Wen J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 176107 (in Chinese) [高博, 刘刚, 王立新, 韩郑生, 郑彦飞, 王春林, 温景超 2012 物理学报 **61** 176107]
- [9] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050702 (in Chinese) [胡志远, 刘张李, 邵华, 张正选, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2012 物理学报 **61** 050702]
- [10] MIL-STD-883G 2006 Ionizing radiation (Total Dose) test procedure, Method 1019.7 [S]
- [11] Banerjeet G, Niu G, Cressler J D, Clark S D, Palmer M J, Ahlgren D C 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1620
- [12] Hjalmarsen H P, Pease R L, Hembree C E, Van Ginhoven R M, Schultz P A 2006 *Nucl. Instr. Meth. B* **250** 269
- [13] Stesmans A 2006 *Journal of Applied Physics* **88** 489
- [14] Zhang S, Cressler J D, Niu G, Marshall C J, Marshall P W, Kim H S, Reed R A, Palmer M J, Joseph A J, Haremet D L 2003 *Solid-State Electron.* **47** 1729
- [15] Witczak S C, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Galloway K F, Lacoel R C, Mayer D C, Puh1 J M, Pease R L, Suehle J S 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1989
- [16] Tsetseris L, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Pease R L, Pantelides S T 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2265
- [17] Benedetto J M, Boesch H E 1986 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33** 1318

Study on ionization damage of silicon-germanium heterojunction bipolar transistors at various dose rates*

Sun Ya-Bin^{1)2)†} Fu Jun¹⁾²⁾ Xu Jun¹⁾²⁾ Wang Yu-Dong¹⁾²⁾ Zhou Wei¹⁾
Zhang Wei¹⁾ Cui Jie¹⁾ Li Gao-Qing¹⁾ Liu Zhi-Hong¹⁾²⁾

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

2) (*Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China*)

(Received 24 May 2013; revised manuscript received 3 July 2013)

Abstract

Ionizing radiation effects in silicon-germanium (SiGe) heterojunction bipolar transistors (HBTs) at different dose rates were investigated. Experimental results show that the base current increases with increasing accumulated dose for the high and low dose rates of irradiation, causing a significant drop in current gain. Besides, the lower the dose rate, the higher the radiation damage, which demonstrates a significantly enhanced low-dose-rate sensitivity (ELDRS) effect in the SiGe HBTs. The different degradation behaviors for high and low dose rates of irradiation are compared with each other and discussed; furthermore, the underlying physical mechanisms are analyzed and investigated in detail.

Keywords: silicon-germanium heterojunction bipolar transistor, enhanced low dose rate sensitivity, irradiation effect

PACS: 61.80.-x, 85.30.Pq, 42.88.+h, 79.60.Jv

DOI: 10.7498/aps.62.196104

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60976013).

† Corresponding author. E-mail: sunyb10@mails.tsinghua.edu.cn