

文章编号: 2095-4980(2022)09-0869-08

SiGe HBT 单粒子效应关键影响因素数值仿真

张晋新¹, 郭红霞^{*2}, 吕玲¹, 王信³, 潘霄宇²

(1.西安电子科技大学 极端环境下装备效能教育部重点实验室, 陕西 西安 710126; 2.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;
3.中国科学院 新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT), 采用半导体三维器件数值仿真工具, 建立单粒子效应三维损伤模型, 研究 SiGe HBT 单粒子效应的损伤机理, 以及空间极端环境与器件不同工作模式耦合作用下的单粒子效应关键影响因素。分析比较不同条件下离子入射器件后, 各端口瞬态电流的变化情况, 仿真实验结果表明, 不同工作电压下, 器件处于不同极端温度、不同离子辐射环境, 其单粒子瞬态的损伤程度有所不同, 这与器件内部在不同环境下的载流子电离情况有关。

关键词: 锗硅异质结双极晶体管; 单粒子效应; 极端环境; 数值仿真

中图分类号: TN32

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021439

Simulation on key influencing factors of Single Event Effects on SiGe HBT

ZHANG Jinxin¹, GUO Hongxia^{*2}, LYU Ling¹, WANG Xin³, PAN Xiaoyu²

(1.School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710126, China;

2.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China;

3.Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Science, Urumqi Xinjiang 830011, China)

Abstract: The simulation of the semiconductor 3D device is performed to establish the 3D damage model to study the damage mechanism of the Single Event Effects(SEE) in SiGe Heterojunction Bipolar Transistor(HBT), as well as the key factors influencing the Single Event Effect under the coupling action of different working modes and extreme space environment. The transient current changes of each terminal are analyzed and compared after the ions striking on the device under different conditions. The results show that under different operating voltages, the degree of SEE damage is different in different extreme temperatures and different ion radiation environments, which is related to the ionization of carriers in different environments within the device.

Keywords: SiGe HBT; Single Event Effect; extreme space environment; simulation

锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT)卓越的温度特性(-180~+200 °C), 特别是极端低温下表现出的良好电学性能, 使其在提高航天设备有效载荷、提升系统信息获取及传输能力上具备优异的竞争力。然而, 工作于太空环境的微电子器件与电路将不可避免地遭受各种宇宙射线和高能粒子的电离辐射影响, 引起性能退化而给航天器电子系统的可靠性带来重大隐患。SiGe HBT 由于材料和工艺结构的新特征, 其空间电离辐射效应表现出不同于硅器件的复杂特征^[1-4]。一方面, SiGe HBT 良好的抗总剂量效应和位移损伤的能力, 使其在空间极端环境中具有诱人的应用前景, 已成为 NASA 月球探索等项目中重点发展的技术手段^[5-8]。另一方面, 研究表明, SiGe HBT 对单粒子效应非常敏感, 空间粒子入射易造成其相关电路翻转^[9-10]。美国 Cressler 教授的团队对 SiGe HBT 单粒子效应损伤机理和电荷收集机制进行研究, 开展了数值模拟和激光微束辐照实验的相关工作。但对工作模式、空间环境等因素影响 SiGe HBT 单粒子效应的研究却报道较少; 同时, 重离子微束实验面临成本高、机时申请困难等问题, 采用半导体器件仿真工具(Technology Computer Aided Design, TCAD)研究 SiGe HBT 单粒子效应的影响因素, 可为 SiGe HBT 进一步的空间实际应用提供理论基础。

收稿日期: 2021-12-29; 修回日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11805270; 12005159; 61704127)

*通信作者: 郭红霞 email:guohxnint@126.com

本文针对 SiGe HBT 器件进行单粒子效应三维数值仿真模拟, 构建器件结构模型; 改变器件工作模式与环境因素进行重离子入射 SiGe HBT 的单粒子效应数值模拟; 通过分析不同端口的瞬变电流峰值, 以及感生电荷收集情况, 探讨 SiGe HBT 单粒子效应的关键影响因素。

1 单粒子效应数值仿真

1.1 半导体工艺和器件三维仿真(3D TCAD)

半导体工艺和器件仿真工具(TCAD)采用计算机数值模拟手段对半导体工艺条件和器件结构进行仿真, 它无需通过较长周期和成本高昂的工艺实验就可实现器件结构的优化, 不断改进并最终获得理想的电学特性。随着对半导体器件辐射效应研究的逐渐深入, 将 TCAD 仿真与粒子输运计算相结合的模拟方法有效地解决了地面实验成本高、机时少的问题; 并且, 数值模拟能够从载流子运动的微观角度深入揭示半导体器件辐照损伤规律, 为抗辐射加固方案提供物理基础, 成为目前研究辐射效应的一种实用工具。

早期的数值模拟主要采用二维结构模型进行计算, 所有参数在第三维方向上默认采用相同的度量值, 即所有变量被压缩于二维模型中, 这种情况只能获得一个基础观测值, 预测结果精准性较差; 目前三维仿真逐渐成为半导体器件模拟的主流, 其在 x, y, z 三维坐标轴的定位下逐一计算每个结点的数值方程, 预测结果最为精确。单粒子效应的基本原理是高能入射粒子穿过器件损失能量, 沿其径迹电离产生大量电子空穴对, 在器件内部电势差和浓度梯度改变的影响下发生漂移和扩散作用, 这是一个发生在三维空间内的物理过程^[1]。因此本文采用三维 TCAD(3D TCAD)仿真工具进行 SiGe HBT 的单粒子效应研究。

使用 3D TCAD 工具开展 SiGe HBT 单粒子效应数值模拟研究, 首先应根据器件结构布局和工艺信息构建合理的器件模型; 其次, 选择物理模型和数值方法作为器件电学参数建立的计算基础; 然后确定离子入射信息, 选择相关外部条件开展单粒子效应仿真模拟。

1.2 SiGe HBT 器件结构建模

本文构建 TCAD 仿真模型的 KT9041 SiGe HBT 器件与传统体硅 npn 垂直型双极晶体管(Si BJT)结构相似, 区别在于其基区掺入了组分渐变的 Ge 原子, 形成 SiGe 合金, Ge 含量由发射极/基极(E/B)结和基极/集电极(B/C)结处的 0% 向基区中央逐渐增加至 20%, 并在基区中部维持 20% 不变, 形成 E/B 结和 B/C 结 2 个缓变异质结, 器件发射区掺杂浓度高达 $1.48 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 使用多晶硅材料于器件顶部引出发射极接触。基区具有较高的掺杂浓度 ($1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 与较薄的厚度(约 $0.08 \mu\text{m}$), 在大幅减小基区电阻的同时满足器件频率高、增益大的要求。内基区外部采用浅槽隔离(Shallow Trench Isolation, STI)技术形成有源区, 并使用双多晶硅自对准工艺在隔离氧化层上外延 p 型多晶硅层引出基极接触。采用叉指工艺引出器件的发射区和基区电极接触。集电区面积较大, 掺入的 As 浓度从集电区中心处的 $6.34 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 逐渐下降至集电区边缘处的 $5.67 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 形成高斯分布。具有较高掺杂浓度 ($1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 的 n^+ 埋层用来引出集电极接触。所有器件有源区垂直生长在轻掺杂浓度为 $6.68 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型衬底上, 在衬底边缘处, 采用离子注入工艺注入硼离子并推进, 形成环状重掺 p 型隔离墙, 引出衬底接触。根据上述器件工艺和布局信息, 使用 TCAD 工具构建器件结构三维模型, 图 1 是构建的器件三维结构模型与器件三维结构在 z 轴中心处的内部结构仿真剖面图。

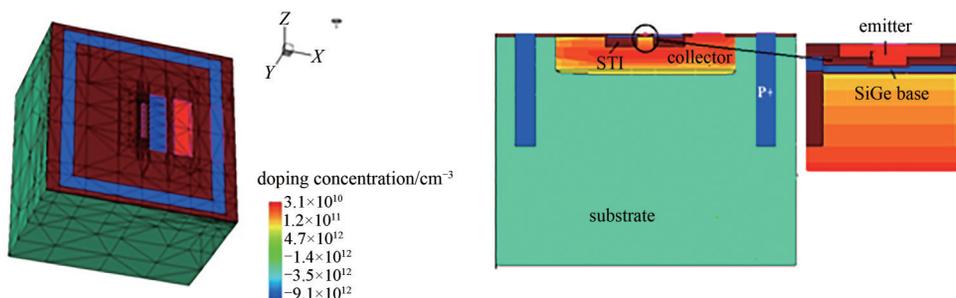


Fig.1 3D view of device structure and 2D cross-sectional view of internal structure

图1 器件结构三维视图与内部结构二维剖面图

1.3 单粒子效应三维数值仿真

1.3.1 物理模型与数值方法

对半导体器件进行单粒子效应仿真的实质是计算入射粒子与半导体材料相互作用后器件电学特性的退化情

况。因此,数值模拟首先应根据晶体管工作原理选择物理模型,随后在物理模型指导下建立数学方程,最后进行电学参数的数值求解。根据半导体器件特征尺寸的变化,其物理模型可以分为3类:a)经典模型:半导体器件特征尺寸较大,载流子输运过程由漂移-扩散理论描述;b)半经典模型:对于亚微米级器件,载流子运动由波兹曼方程描述;c)量子模型:纳米级器件中电子具有波粒二相性,其运动规律遵循薛定谔方程^[11]。

SiGe HBT 基区掺 Ge 引入的能带渐变使其突破了传统器件靠不断缩小特征尺寸实现高频高速的限制,器件特征工艺尺寸在 μm 量级,因此本文的数值模拟工作选用经典模型,即漂移-扩散模型作为 SiGe HBT 电离辐射效应理论计算的物理模型^[11]。

1.3.2 单粒子效应仿真

物理模型的选择对单粒子效应仿真的精确性有决定性的影响,主要需考虑两方面因素:a)器件内部载流子的输运方式;b)入射离子电离对载流子分布的影响。首先,作为双极器件,少子迁移是 SiGe HBT 工作原理的关键,Philips 统一迁移率模型可实现多子和少子迁移率的同步模拟,是仿真中最重要的物理模型;其次,器件重掺杂以及单粒子效应电离作用形成的高浓度载流子与强电场适宜使用 Auger 复合模型和 SRH 复合模型;最后,考虑到发射区、基区与集电区引出处 n^+ 埋层采用重掺杂,仿真还选用了速率饱和模型与禁带变窄模型^[11-12]。

使用 TCAD 仿真工具进行重离子入射半导体器件的数值模拟,首先需要计算沿离子入射径迹载流子的生成率,然后据此生成率求解泊松方程、载流子连续性方程和载流子输运方程,最终获得离子入射引起的电势变化、电流瞬变和电荷收集信息。因此,入射离子在器件仿真结构中沉积能量,电离诱发电子-空穴对是 SiGe HBT 单粒子效应仿真中的一个重要环节。根据入射离子的线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)值,通过仿真中设定的 LET 值和参数文件中的相关默认参数,计算电离感生载流子生成率; $R(w,l)$ 和 $T(t)$ 分别代表载流子生成率随空间和时间变化的函数,其中, w 为离子径迹的半径, l 是离子径迹的长度;载流子随空间的分布既可遵循指数函数也可遵循高斯函数,本文选用高斯分布,载流子随时间的分布 $T(t)$ 也服从高斯分布。

为了模拟离子入射穿过整个器件中心深入器件内部的情况,假设电荷沉积穿过整个器件结构。入射离子的横向径迹选用高斯分布,参考文献[9-11], $1/e$ 特征半径设为 $0.1 \mu\text{m}$,特征时间范围为 2 ps ,高斯峰值的时间设定为 5 ps 。离子从 SiGe HBT 器件表面中心处入射,穿过整个器件,因此,入射离子的射程为器件模型的高度。

2 SiGe HBT 单粒子效应机理研究

离子进入 SiGe HBT 器件,沿离子径迹入射方向电离产生大量电子-空穴对,且这一离子径迹范围内电子与空穴的密度相同(即 $\Delta n = \Delta p$),使得离子径迹内部呈电中性。静电势沿离子径迹产生畸变,等势线顺着离子径迹向衬底延伸形成漏斗势^[11-12]。靶材料内的这一高度离化径迹在数百 ps 内逐渐增强再减弱消失,影响器件电势分布,图 2(a)~图 2(f)给出了衬底反偏时,离子入射 SiGe HBT 后,不同时刻漏斗势的演变情况,4 ps 时产生漏斗势变化,8 ps 时形成最强漏斗势,16 ps 时漏斗场引起的浓度梯度开始影响电荷收集,40 ps 时漏斗势逐渐减弱,20 ns 后静电势恢复到离子入射前的状态。

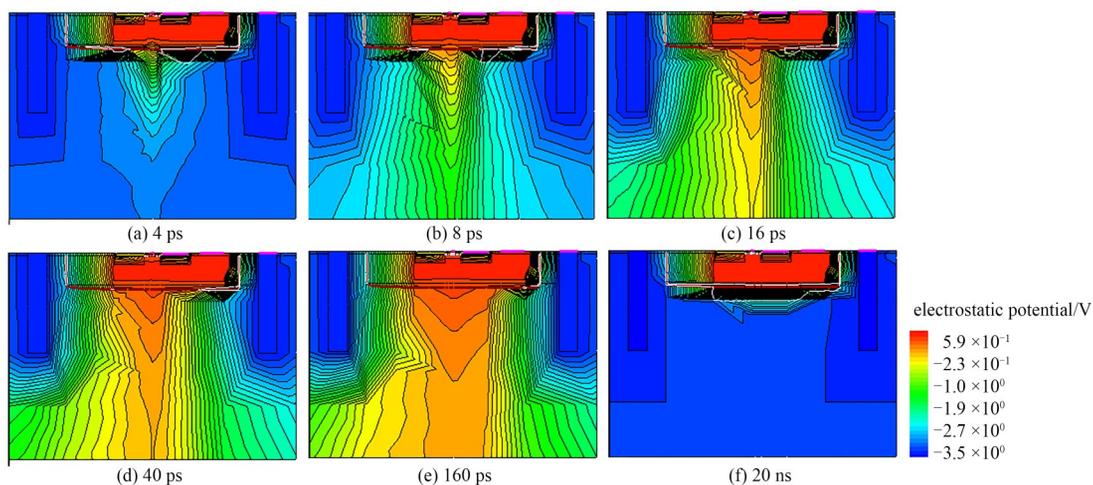


Fig.2 Electric potential at different moments after ions striking on the device
图2 离子入射器件后不同时刻电势的变化

SiGe HBT 的 2 个缓变异质结有助于电子从发射区输运至集电区。集电极/衬底结(C/S 结)反偏的外加电场增强

了漏斗效应,载流子在漏斗电场中迅速分离,电子向集电区输运,空穴则被扫向衬底,二者通过漂移作用快速被端口电极所收集,造成电荷的瞬间收集量远多于耗尽层沉积电荷量,形成电流瞬变;漏斗效应消失后,电荷仍然可在浓度梯度引起的扩散作用下继续被收集,产生一个扩散机制诱发的电流瞬变。当离子径迹在其作用范围内不能有效影响反偏 C/S 结时,漏斗畸变电势则不会形成,由入射离子电离产生的电子-空穴对只在扩散作用下被缓慢收集。因此,各端口的电流瞬变和电荷收集情况是研究 SiGe HBT 单粒子效应的 2 个主要方面^[12]。

图 3 给出衬底负电压形成反偏 C/S 结时,离子入射器件后各电极的电流和电荷收集随时间的变化关系,由图可知,离子由器件中心处入射,可以依次穿过 B/C 结和 C/S 结 2 个 pn 结;集电区和衬底中的载流子通过漂移机制形成的电流瞬变脉冲的峰值约为 2 mA 左右,随后电荷通过扩散作用被进一步收集,造成集电极和衬底电流瞬变在漂移电流脉冲后出现一个相对平缓的扩散脉冲,发射极和基极也由扩散作用发生电流瞬变现象;由于反偏 C/S 结面积较大,集电极和衬底的电荷收集量达到 4.5 pC 之高;离子入射在集电极和发射极诱发负电流瞬变,这 2 个端口以收集电子为主,基极和衬底则发生正电流瞬变,主要收集空穴;其中发射极和基极电荷收集量比集电极和衬底少 1~2 个数量级,可以忽略不计^[13]。

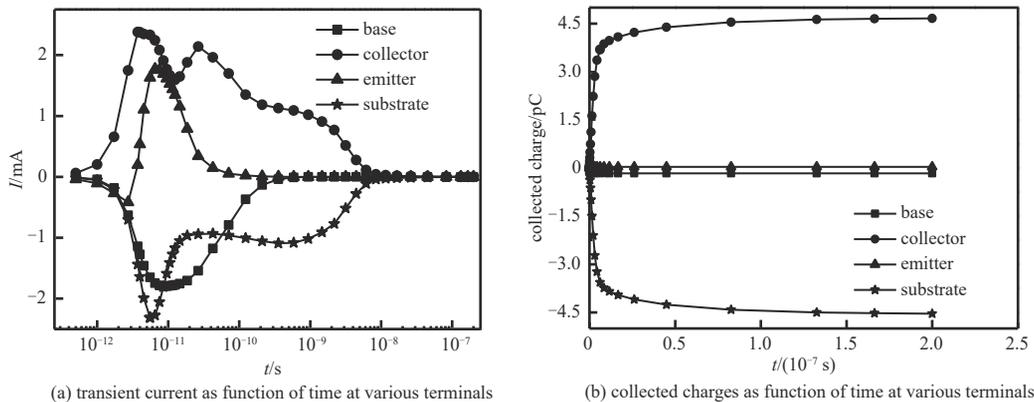


Fig.3 Simulation of SEE induced by ions strike

图3 离子入射 SiGe HBT 仿真结果

3 SiGe HBT 单粒子瞬态(SET)关键影响因素

大量研究数据发现 C/S 结反偏是 SiGe HBT 单粒子效应的最劣偏置,因此早先的文献报道主要是采用衬底接负电压的偏置状态进行模拟研究。然而,晶体管的不同工作模式中,多种偏置都可能形成反偏 C/S 结,因此针对 SiGe HBT 器件开展不同偏置状态下重离子入射诱发单粒子效应的数值仿真,研究偏置条件对 SiGe HBT 单粒子效应的影响。漏斗效应在 C/S 结反偏条件下得以增强,引起 SiGe HBT 的单粒子效应敏感性。同时, SiGe HBT 的空间应用不仅与其自身工作模式相关,还受到空间极端环境的影响,这些极端环境与不同工作模式耦合作用时, SiGe HBT 的单粒子效应可能表现出不同的损伤情况,因此,本文讨论了不同偏置模式和不同 LET 值共同作用、不同偏置模式和不同温度共同作用的单粒子效应响应情况。

3.1 工作模式对 SiGe HBT 单粒子效应的影响分析

为实现不同偏置状态下 SiGe HBT 单粒子效应的比较,并考虑双极器件的实际电路应用,在仿真中采用了正向放大(Positive: $U_B=+0.7$ V, $U_C=+1.2$ V)、集电极正偏($U_C=+2$ V)和衬底反偏($U_S=-3$ V)3 种可以形成反偏 C/S 结的工作状态进行研究。入射离子 LET 值选取 10 MeV·cm²/mg,离子从器件中心处入射。图 4~图 6 分别给出正向放大、集电极正偏、衬底反偏 3 种偏置条件下,离子入射后各端口电流瞬变和电荷收集随时间的变化关系。

由图 4~图 6 可以看出,3 种偏置模式下,集电极都以电子电流和电子电荷收集为主要单粒子效应损伤形式,且都表现出大的瞬态电流与较多的电荷收集量;基极和衬底的损伤响应形式为空穴电流瞬态和空穴电荷收集;正向放大模式和集电极正偏模式下,发射极呈现出空穴电流瞬态,而衬底反偏下,发射极呈现出电子电流瞬态。正向放大模式的集电极电流瞬态峰值最大,电荷收集量最多,基极也呈现出较大的电流瞬态,且集电极与衬底的电荷收集在短时间内未表现出明显的饱和趋势,正向放大模式是 SiGe HBT 在电路中的主要工作模式,需要重点关注瞬态电流的传播;集电极正偏的单粒子损伤次之,但其各端口电荷收集在 100 ps 后逐渐趋于饱和。

处于不同工作偏置的 SiGe HBT,离子入射引起的电流瞬变和电荷收集具有不同极性,同一端口电荷收集量和瞬变电流峰值对偏置的响应也存在差异。单粒子效应中电荷收集受到漂移和扩散机制的共同作用,不同偏置

在器件内部引入的能带变化会对电子与空穴形成不同的势阱或势垒，从而对载流子运输的方向与速度产生不同影响，因此电荷收集情况主要取决于电荷运输的长期过程。而电流瞬变是离子入射几皮秒内的瞬态效应，主要与漂移机制相关，反向外加电场造成漏斗势畸变加剧，诱发更大的瞬变电流，因此，外加电场对 pn 结的影响成为电流瞬变的关键因素。

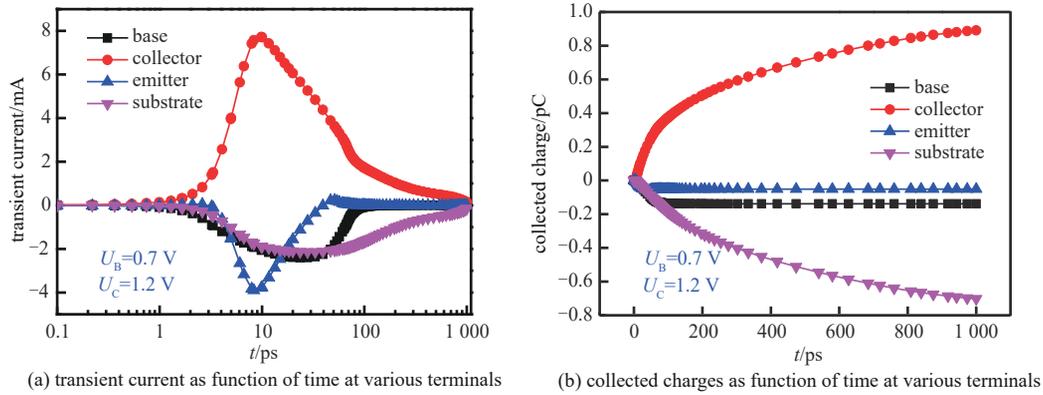


Fig.4 Simulation results of SEE at forward amplification mode

图4 正向放大模式下单粒子效应仿真结果

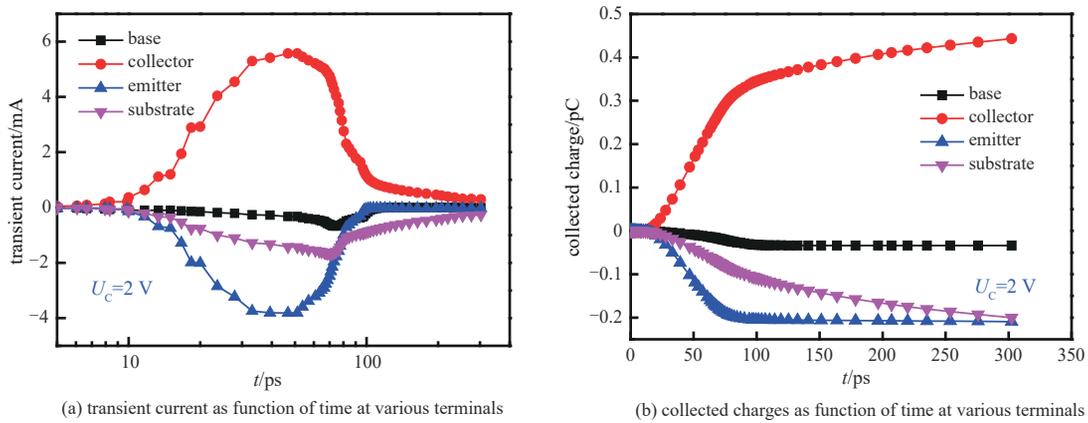


Fig.5 Simulation results of SEE at positive mode of collector

图5 集电极正偏模式下单粒子效应仿真结果

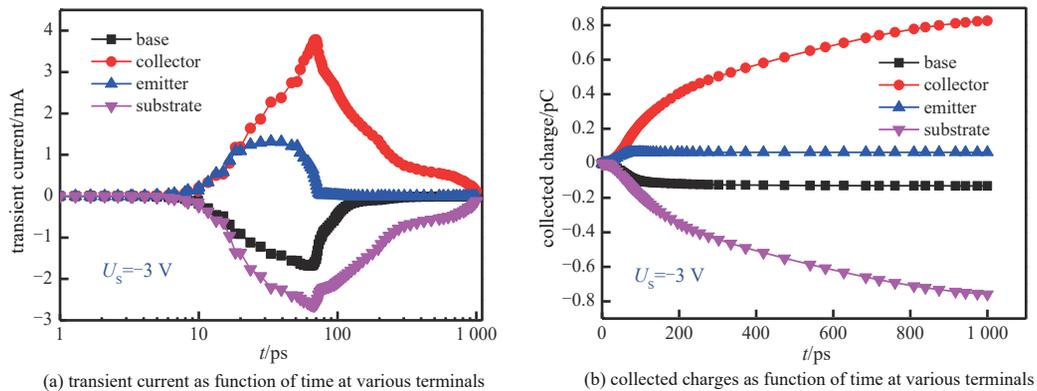


Fig.6 Simulation results of SEE at reverse mode of substrate

图6 衬底反偏模式下单粒子效应仿真结果

3.2 工作偏置与不同粒子能量耦合作用对 SiGe HBT 单粒子效应的影响分析

研究了工作模式与不同 LET 粒子耦合注入对单粒子效应的影响。考虑到 SiGe HBT 空间应用的主要工作模式和 3.1 的结果，选择了正向放大模式和集电极正偏模式进行对比。粒子入射半导体器件引起的单粒子效应不仅与入射离子的特征(包括种类、原子半径、质量、电荷数、能量)有关，也与入射靶材料的特性密切相关。LET 值表

示离子入射后在材料内部沉积的电离能,是表征器件单粒子效应最合适的参数。目前国内外主流加速器可产生的不同种类重离子的 LET 值在 1~100 MeV·cm²/mg 之间,因此选择了 LET 分别为 1~3 MeV·cm²/mg,5 MeV·cm²/mg,8 MeV·cm²/mg,10 MeV·cm²/mg,20 MeV·cm²/mg,30 MeV·cm²/mg,40 MeV·cm²/mg,50 MeV·cm²/mg,60 MeV·cm²/mg,70 MeV·cm²/mg,80 MeV·cm²/mg 进行模拟研究。放大模式和截止模式下不同 LET 值下 SiGe HBT 集电极瞬变电流随时间的变化关系如图 7 所示,各端口单粒子电流瞬态的峰值随 LET 的变化情况如图 8 所示。

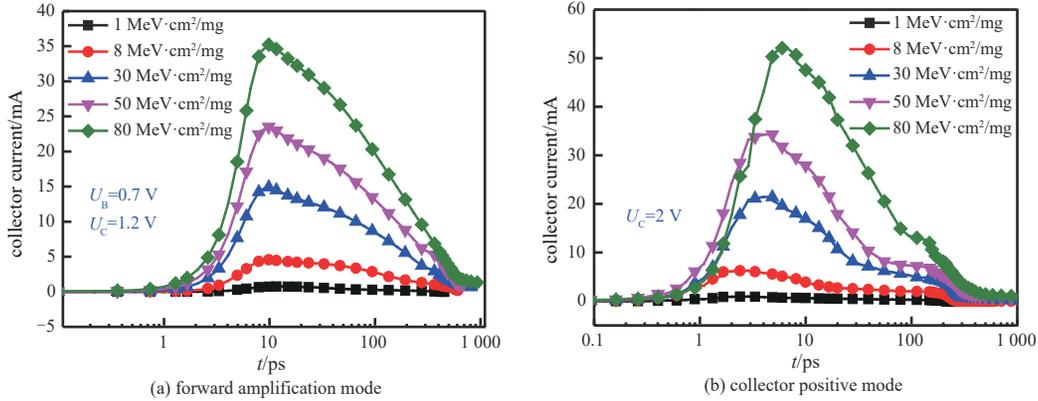


Fig.7 Transient current of collector in SiGe HBT at different LET
图 7 不同 LET 值下 SiGe HBT 集电极瞬态电流随时间变化情况

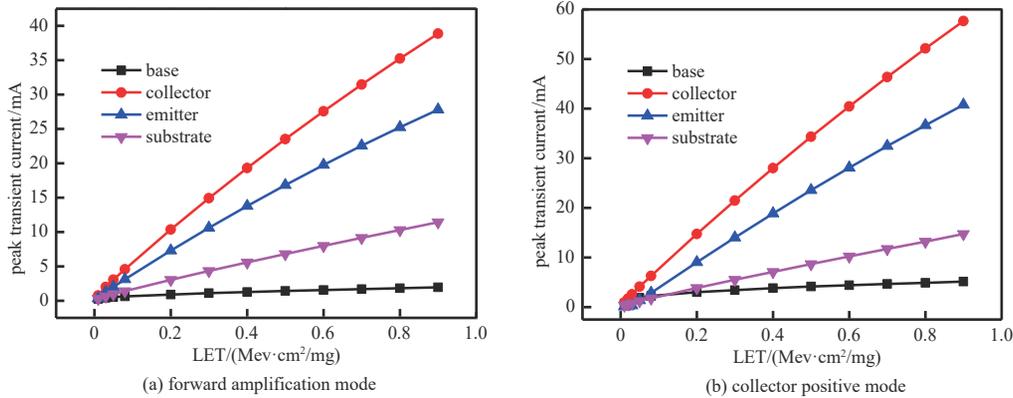


Fig.8 Current transient peak as function of LET in SiGe HBT
图 8 器件各端口电流瞬态峰值随 LET 值的变化情况

由于在空间辐射环境中, SiGe HBT 单粒子效应主要影响集电极,且在电路应用中,集电极电流是路径传播中的重要环节,因此重点关注了集电极电流的瞬态变化情况。由图 7 可以看出,随着入射离子 LET 的增加,2 种工作模式下集电极瞬态电流都不断增加,当 LET 值超过 10 MeV·cm²/mg 时,集电极正偏下集电极单粒子瞬态电流大于正向放大模式的瞬态电流,且出现较为明显的扩散电流组成部分。图 8 结果表明,随着 LET 值的增大,单粒子效应引起的瞬变电流表现出上升趋势。具有较高 LET 值的离子入射 SiGe HBT,集电极正偏模式下出现由扩散机制引起的电流瞬变。当高 LET 离子穿过 C/S 结时,会严重干扰集电区电势,从而引起大范围的漏斗电势畸变;并且集电区掺杂浓度轻,其内的载流子复合率较低;大量电子在大的浓度梯度作用下通过扩散机制被集电极缓慢收集。在微波、射频等电路应用中,这种扩散电流瞬变极易被后续电路所捕获,引起单粒子软错误^[4]。

3.3 工作偏置与不同温度耦合作用对 SiGe HBT 单粒子效应的影响分析

其次研究温度对单粒子效应的影响,这是由于半导体器件内部的施主和受主杂质在低温下没有足够的激发热能,造成载流子冻结效应,导致杂质不能全部电离,另一方面,常温或高温环境下,重掺杂的半导体材料也具有不完全电离现象。因此仿真中,低温环境下可以考虑在物理模型中添加不完全电离模型,同时针对重掺杂,选择 Auger 复合模型和 SRH 复合模型。与 3.2 节相同,也选择了正向放大模式和集电极正偏模式进行对比,研究不同温度的影响。为了深入分析环境温度变化对 SiGe HBT 单粒子效应的影响,选择了从 223 K 到 475 K 的温度范围,放大模式和截止模式在不同温度下 SiGe HBT 集电极瞬变电流随时间的变化关系如图 9 所示,器件各端口瞬变电流的峰值随温度的变化关系如图 10 所示。

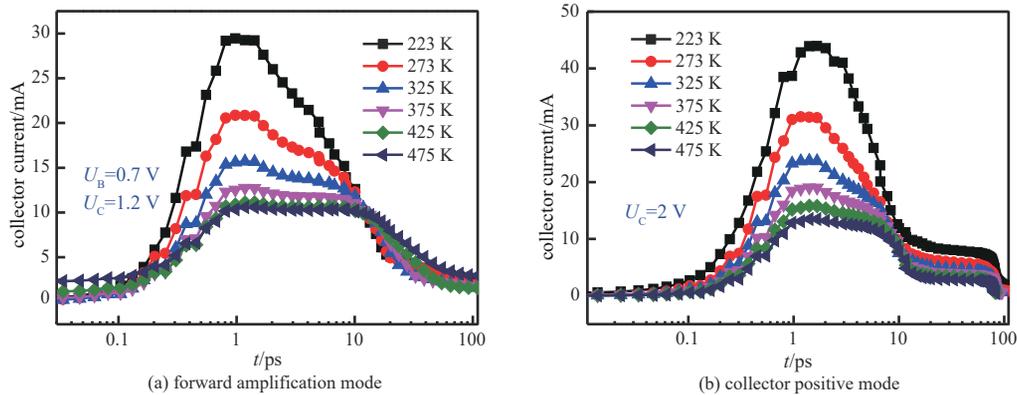


Fig.9 Transient current of collector in SiGe HBT under different temperatures

图9 不同温度下 SiGe HBT 集电极瞬态电流随时间变化情况

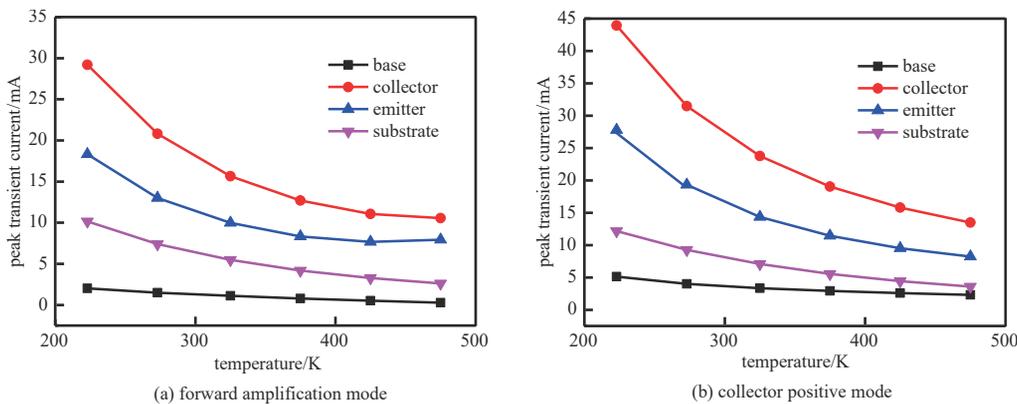


Fig.10 Current transient peak as function of temperature in SiGe HBT

图10 器件各端口电流瞬态峰值随温度的变化情况

由图 9 可以看出，随着温度的降低，集电极单粒子效应的瞬态电流峰值不断升高，在低温下损伤加剧；但正向放大模式下，随着温度的降低，单粒子瞬态电流的持续时间逐渐缩短；而集电极正偏模式下，单粒子瞬态电流的持续时间差别不大。图 10 的结果表明，随着温度的降低，瞬态电流的峰值升高，低温下集电极的瞬态电流峰值可达 30~40 mA，大的电流瞬变脉冲极易影响后续电路和器件。这是由于半导体内部的电流强度与时间成反指数关系，低温下电流强度增大。由图可以看出，所有端口最终的电流瞬态峰值随着温度的升高而逐渐上升，截止模式下瞬态电流大于放大模式。

4 结论

采用 TCAD 数值模拟工具建立 SiGe HBT 器件三维结构模型，选择物理模型和数值计算方法开展单粒子效应三维损伤仿真，通过分析各电极的电流变化和感生电荷收集情况，研究 SiGe HBT 单粒子效应损伤机理和影响单粒子瞬态的关键因素。研究表明，SiGe HBT 对空间电离辐射单粒子效应敏感，离子入射易引发电流瞬变和形成电荷收集，改变器件工作环境和模式时，其单粒子效应表现出不同的响应形式，不同工作模式下，单粒子电流瞬态的损伤程度不同，电荷收集的极性也略有差异。同时在不同离子能量、不同温度影响下，正向放大模式和集电极正偏模式的损伤程度也不相同。研究结果可为 SiGe HBT 空间抗辐射加固提供依据与理论基础。

参考文献：

[1] CRESSLER J D. SiGe HBT technology: a new contender for Si-based RF and microwave circuit applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998,46(5):572-589.
 [2] CRESSLER J D. Radiation effects in SiGe technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,60(3):1992-2014.
 [3] CRESSLER J D, NIU G F. Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors[M]. Boston London: Artech House, 2003.
 [4] CRESSLER J D. On the potential of SiGe HBTs for extreme environment electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2005,93(9): 1559-1582.

- [5] APPASWAMY A. Operation of inverse mode SiGe HBTs and ultra-scaled CMOS devices in extreme environments[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [6] WEN J C, SHI R Y, GONG M, et al. Gamma irradiation effects on collector current and early voltage of SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(2):545–549.
- [7] BANERJE G, NIU G, CRESSLER J D, et al. Anomalous dose rate effects in gamma irradiated SiGe heterojunction bipolar transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999,46(6):1620–1626.
- [8] LIU S H, LIN D S, GUO X Q, et al. Degradation of SiGe HBT with reactor pulse neutron and gamma ray irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006,569(3):810–814.
- [9] VARADHARAJAPERUMAL M. 3D simulation of SEU in SiGe HBTS and radiation hardening by design[D]. Alabama: Auburn University, 2010.
- [10] XU Z Y, NIU G F, LUO L, et al. Charge collection and SEU in SiGe HBT current mode logic operating at cryogenic temperatures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010,57(6):3206–3211.
- [10] XU Z Y, NIU G F, LUO L, et al. Charge collection and SEU in SiGe HBT current mode logic operating at cryogenic temperatures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010,57(6):3206–3211.
- [11] ZHANG B, YANG Y T, LI Y J, et al. Electrical behavior research of silicon-on-insulator SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(23):535–543.
- [12] YANG H. 3D device simulation of SEU-induced charge collection in 200 GHz SiGe HBTs[D]. Alabama: Auburn University, 2005.
- [13] ZHANG J H, GUO H X, GUO Q, et al. 3D simulation of heavy-ion induced charge collection of single event effects in SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(4):048501.
- [14] ZHANG Jinxin, HE Chaohui, GUO Hongxia, et al. 3D simulation study of single event effects of SiGe heterojunction bipolar transistor in extreme environment[J]. Microelectronics Reliability, 2015(55):1180–1186.

作者简介:

张晋新(1987-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为半导体器件空间辐射效应. email: zhangjinxin87@hotmail.com.

郭红霞(1964-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

吕玲(1984-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为化合物半导体器件空间辐射效应.

王信(1987-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为半导体器件空间辐射效应.

潘雷宇(1991-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为半导体器件空间辐射效应.