

文章编号: 2095-4980(2022)06-0523-12

锗硅异质结双极晶体管空间辐射效应研究进展

李培¹, 贺朝会^{*1}, 郭红霞², 张晋新³, 魏佳男⁴, 刘默寒⁵

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究院, 陕西 西安 710024; 3. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 陕西 西安 710126; 4. 模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060; 5. 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 异质结带隙渐变使锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT)具有良好的温度特性, 可承受-180~+200 °C的极端温度, 在空间极端环境领域具有诱人的应用前景。然而, SiGe HBT器件由于材料和工艺结构的新特征, 其空间辐射效应表现出不同于体硅器件的复杂特征。本文详述了SiGe HBT的空间辐射效应研究现状, 重点介绍了国产工艺SiGe HBT的单粒子效应、总剂量效应、低剂量率辐射损伤增强效应以及辐射协同效应的研究进展。研究表明, SiGe HBT作为双极晶体管的重要类型, 普遍具有较好的抗总剂量和位移损伤效应的能力, 但单粒子效应是制约其空间应用的瓶颈问题。由于工艺的不同, 国产SiGe HBT还表现出显著的低剂量率辐射损伤增强效应响应和辐射协同效应。

关键词: 锗硅异质结双极晶体管; 单粒子效应; 总剂量效应; 低剂量率辐射损伤增强效应; 电离总剂量/单粒子效应协同效应; 电离总剂量/位移损伤协同效应

中图分类号: TN325

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021443

Advance in space radiation effects of SiGe heterojunction bipolar transistors

LI Pei¹, HE Chaohui^{*1}, GUO Hongxia², ZHANG Jinxin³, WEI Jia'nan⁴, LIU Mohan⁵

(1. Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China; 3. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710126, China; 4. National Key Laboratory of Analog Integrated Circuits, Chongqing 400060, China; 5. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang 830011, China)

Abstract: Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors(SiGe HBTs) is a strong contender for space applications in extreme environment on account of its superior temperature characteristics, which can bear extreme temperatures from -180 °C to 200 °C owing to the bandgap grading of heterojunction. Because of new features in material, structure and process, the radiation effects of SiGe HBTs present complex characteristics which are different from those of bulk-Si devices. In this work, the research dynamics and trends of space radiation effects in SiGe HBTs are introduced, and the radiation effects of domestic SiGe HBTs include Single Event Effects(SEE), Total Ionizing Dose(TID) effect, Enhanced Low Dose Rate Sensitivity(ELDRS) and synergistic effect are highlighted. The research shows that SiGe HBT naturally presents favorable build-in TID and displacement damage hardness without any radiation hardening, but the high sensitivity to SEE is a main drawback. Due to the different manufacturing processes, the domestic SiGe HBTs experience significant low dose rate sensitivity and are vulnerable to combined effect of ionizing dose/displacement damage and total ionizing dose on single event effect.

Keywords: SiGe heterojunction bipolar transistors; Single Event Effects; Total Ionizing Dose effect; Enhanced Low Dose Rate Sensitivity; synergistic effect of total ionizing dose and single event effect; synergistic effects of ionizing dose and displacement damage

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12005159); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室开放课题资助项目(SKLIPR2010)

*通信作者: 贺朝会 email:hechaohui@mail.xjtu.edu.cn

锗硅异质结外延生长技术首次实现了硅基的能带工程, Ge的引入带来了一系列器件性能的提升^[1-3]。SiGe技术与目前主流的Si CMOS工艺具有天然的兼容性, 形成的SiGe BiCMOS技术为高频集成电路提供了独特的解决方案, 在无线通信、毫米波雷达以及太赫兹频谱等诸多领域得到广泛应用。目前, SiGe技术每年有大约百亿美金的市场规模, 许多全球顶级的半导体公司, 如IBM, Jazz, Texas Instruments和IHP等都投入了大量的研发工作。

SiGe HBT基区Ge组分的引入有效降低了基区载流子在极低温度下出现“载流子冻结”现象的温度阈值, 将星用器件工作温度范围从-55~125 °C扩展至-180~200 °C, 这一优势使其在地外星系和深空探测航天任务中具有极大的应用前景^[4-7]。如, 火星表面的温度变化范围通常为-133~27 °C; 月球车需面临的月表温度变化范围通常为-180~120 °C, 在极地陨石坑位置, 最低温度可达-230 °C。此外, 国外早期研究表明, SiGe HBT的薄发射极-基极隔离介质层、重掺杂基区以及超薄外延基区等工艺使其具有卓越的抗总剂量和位移损伤效应的能力, 其中抗总剂量效应能力达Mrad(Si)量级^[8-11], 抗位移损伤能力达 10^{15} cm^{-2} 量级(等效1 MeV中子注量)^[12-13]。然而研究发现, SiGe HBT对单粒子效应非常敏感, 表现出不同于传统体硅器件的复杂电荷收集机制^[13-16], 使SiGe HBT及SiGe BiCMOS技术相关的电路易受单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)效应的影响, 因此单粒子效应研究一直是SiGe HBT辐射效应研究的热点问题。

自2012年以来, 国内研究单位, 如中国科学院新疆理化技术研究所、清华大学以及西安交通大学等陆续针对国产SiGe HBT开展了辐射效应研究, 发现由于工艺的差异, 国产SiGe HBT的单粒子效应电荷收集机制不同于国外工艺, 并表现出显著的低剂量率辐射损伤增强效应(ELDRS)与位移损伤/电离总剂量协同效应。经过近10年的研究, 国内学者针对国产工艺SiGe HBT器件基本定位了其辐射效应敏感区域, 完善了各类辐射实验方法, 总结了辐射效应的关键影响因素, 探索了单粒子效应的辐射加固方法。

1 SiGe HBT 技术发展历程

SiGe技术研究始于20世纪中叶, 当时硅基能带工程还只限于实验室里的想法, 直到1980年SiGe/Si外延技术的诞生, 实验室生长出没有缺陷、质量较好的SiGe薄膜。1987年, IBM公司报道了世界上第一只SiGe HBT晶体管^[17]。1989年, IBM研制出具有渐变可控Ge组分、多晶硅发射极的SiGe HBT, 其截止频率高达75 GHz, 能够进入高频领域与GaAs, InP等化合物半导体器件竞争。此后, SiGe HBT走出实验室, 成为微电子器件发展的重要方向^[18-19]。1994年, 商用SiGe HBT的频率响应首次超过100 GHz, 并实现了200 mm晶圆的商业生产。国际上许多先进的半导体公司都有SiGe工艺生产线, 如IBM, Jazz Semiconductor, Texas Instruments, IHP, Infineon, Analog Devices, TEMIC, IHP等近20余家^[20-23]。其中, IBM是最早开展SiGe HBT技术研发的实验室, 几乎主导了商用SiGe技术的发展进程, 截止到2015年IBM公司将旗下的微电子业务转让给Global Foundries时, 已经推出了四代SiGe技术。表1列出了IBM四代SiGe HBT技术的关键电学参数, 随着SiGe工艺节点的进步, 表现出越来越优异的电学特性。基于此, 国外关于SiGe HBT的辐射效应研究几乎都是围绕IBM SiGe工艺开展。

表1 四代IBM SiGe HBT工艺关键电学参数

Table1 Key electrical parameters of the fourth-generation IBM SiGe HBT process

technology node	peak f_T /GHz	peak f_{max} /GHz	BV_{CEO} /V	$W_E/\mu\text{m}$
1st-generation(IBM 5AM)	50	70	3.3	0.5
2nd-generation(IBM 7HP)	120	100	2.5	0.2
3rd-generation(IBM 8HP)	207	285	1.7	0.12
4th-generation(IBM 9HP)	350	307	1.2	0.12

由于设备条件等原因的限制, 国内SiGe技术研究起步较晚。清华大学、浙江大学、北京工业大学等在1995年前后开始关于SiGe材料生长、器件理论的研究。电子科技大学、西安电子科技大学分别在场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)和双极结晶体管(Bipolar Junction Transistor, BJT)型器件结构方面开展研究。此外, 西安交通大学针对SiGe探测器开展研究, 天津大学、南京大学、中国电科13所等科研院所也涉及了一些SiGe技术的研究。目前国内最先进的SiGe工艺是中电24所开发的 $0.35 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS工艺以及上海华虹NEC的 $0.13 \mu\text{m}$ SiGe双极工艺与 $0.18 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS工艺。

近年来, SiGe技术正在迈进太赫兹技术领域, 欧盟启动了为期3.5年的研发项目“DOTSEVEN”, 目标是突破截止频率高达0.7 THz的SiGe HBT技术, 进一步巩固和加强欧洲具有领先优势地位的SiGe HBT技术^[24]。

2 SiGe HBT 辐射效应研究动态

得益于SiGe HBT技术的早期发展和技术积累, 国外对SiGe HBT空间辐射效应的研究起步较早。美国国防部

和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在2004~2006年联合进行的MURI计划中,将SiGe、SOI、应变硅、高K材料等新材料与电子系统对空间粒子辐射所表现出的新损伤机理列为重点研究内容,联合佐治亚理工学院、奥本大学、范德堡大学以及波音公司等多家知名机构,针对IBM, National Semiconductor, Jazz Semiconductor等公司的商用SiGe HBT开展了大量研究工作^[25-28]。NASA新登月计划也将SiGe器件作为其极端温度环境下的重要应用之一^[29-33]。国外SiGe HBT辐射效应研究主要围绕IBM公司的四代SiGe工艺开展。其中,最先研究的是总剂量效应和位移损伤效应,美国佐治亚理工学院John D Cressler教授和奥本大学Guofu NIU教授的研究团队最早针对IBM工艺SiGe HBT开展了中子、质子、X射线以及 γ 射线辐照实验。实验表明,即使未采用任何加固措施, SiGe HBT器件相比于传统Si BJT,仍表现出良好的抗总剂量效应和位移损伤效应能力。随着SiGe HBT在数字和射频等电路中的广泛应用,针对其单粒子效应的研究也逐渐受到关注。自2005年起,美国佐治亚理工学院和奥本大学相关研究团队又相继开展了SiGe HBT的质子、重离子以及激光辐照等地面单粒子效应模拟实验,发现基于SiGe HBT的寄存器对单粒子效应非常敏感,表现为发生单粒子效应的重离子线性能力传输(Linear Energy Transfer, LET)阈值很低,饱和出错截面大。随后, SiGe HBT空间辐射效应研究主要集中在单粒子效应的电荷收集机制、关键影响因素以及抗单粒子效应加固技术方面。

国内SiGe HBT辐射效应研究起步于2002年,清华大学、中国科学院新疆理化技术研究所以及西安交通大学等研究单位对国产SiGe HBT开展了较全面的SiGe HBT总剂量效应相关研究,包括不同型号、不同偏置状态下SiGe HBT的高、低剂量率辐照实验以及相关数值模拟仿真研究。综合研究结果表明,国产SiGe HBT具有天然的抗总剂量效应能力,与国外SiGe HBT总剂量效应结论一致。2010年前后,中科院新疆理化技术研究所率先针对典型SiGe HBT器件构建了单粒子效应损伤模型;2015年,西安交通大学、中科院新疆理化技术研究所、西北核技术研究院和中国原子能科学研究院合作开展了国产SiGe HBT的激光微束、重离子微束以及质子辐照实验,并结合计算机辅助设计技术(Technology Computer Aided Design, TCAD)数值模拟研究给出了国产SiGe HBT的单粒子效应敏感区域和抗辐射加固方法。2017~2020年,随着研究的不断深入,发现国产SiGe HBT器件的辐射效应响应不同于国外工艺,表现出显著的ELDRS效应、位移损伤/电离总剂量协同效应以及累积电离总剂量效应/单粒子效应协同效应。

2.1 总剂量效应

早在1995年, Babcock等在NSREC会议上首次报道了第一代IBM SiGe HBT在没有任何加固措施下抗总剂量效应能力能够达到Mrad量级^[34]。随后佐治亚理工大学Cressler教授和奥本大学Guofu NIU教授的研究团队围绕IBM工艺,从三个方面开展了SiGe HBT的总剂量效应研究:a)室温条件下的总剂量辐照实验;b)低温条件下的总剂量辐照实验;c)不同剂量率辐照实验。实验结果表明,与硅双极晶体管相比, SiGe HBT天然具有优异的抗总剂量效应能力^[35-37];在累积总剂量(1 Mrad)相同条件下,不同辐射源引起的SiGe HBT总剂量效应响应不同,其中63 MeV质子辐照导致的过剩基极电流增量最大。上述研究都表明,四代IBM工艺的SiGe HBT器件均表现出较好的抗总剂量效应能力。

2002~2005年,清华大学康爱国、中科院新疆理化技术研究所牛振红等基于国产SiGe HBT开展了 γ 辐照总剂量效应研究。实验表明,当累积总剂量达到400 krad后,器件基极电流增大,集电极电流减小,导致电流增益降低11%。但与硅器件相比,仍表现出一定的抗总剂量效应的能力^[38-39]。随后,西安交通大学张晋新、中科院新疆理化技术研究所刘默寒、清华大学孙亚宾等较全面地开展了国产SiGe HBT总剂量效应的相关实验^[40-42],包括不同偏置状态下的高、低剂量率辐照实验、不同型号样品的总剂量效应实验以及总剂量效应TCAD数值模拟仿真研究。综合研究结果表明,国产SiGe HBT在辐照总剂量累积至1 Mrad(Si)时,未发生电学性能失效现象,但随着辐射剂量的增加,器件基极电流升高,引起了电流增益衰减,且在不同工作条件下表现出复杂的基极电流退化机制。结合TCAD模拟结果分析,认为辐射在SiGe HBT的EB Spacer和硅的局部氧化(Local Oxidation of Silicon, LOCOS)隔离氧化层与基区的Si/SiO₂界面附近电离感生出大量氧化物陷阱电荷和界面态。在不同偏置条件下, EB Spacer和LOCOS隔离鸟嘴区域形成不同方向的电场,造成氧化物陷阱电荷与界面态的累积数量与分布存在差异,从而引起不同偏置辐照下SiGe HBT总剂量效应的不同程度损伤。

值得注意的是,国产SiGe HBT存在显著的ELDRS效应,这与国外研究结果不同。尤其以佐治亚理工学院的Cressler教授研究团队为代表,围绕着四代IBM SiGe工艺开展了剂量率辐照实验,结果都表明SiGe HBT不存在ELDRS效应^[43-45]。但国外早期低剂量率辐照实验设计较为简单,样品工艺单一,对偏置条件考虑不全面,累积总剂量水平较低,不能全面地评价SiGe HBT的ELDRS效应。从2012年开始,国内清华大学、中科院新疆理化技术研究所以及西安交通大学等都针对国产SiGe HBT开展了高、低剂量率辐照实验,新疆大学刘默寒等还针对

不同工艺 SiGe HBT 开展了剂量率辐照实验^[41,46-50], 如表 2 所示。实验样品来自多个半导体公司, 包含 8 种器件型号, 10 次独立的剂量率辐照实验, 其中 IBM 5AM、7HP、8HP 以及 9T 工艺 SiGe HBT 都无明显的 ELDRS 效应, 英飞凌(BFP640ESD)和瑞萨(NESG260234)SiGe HBT 工艺分别为部分样品损伤和无明显损伤, 而国产 SiGe HBT (KT9041 和 KT1151)则表现出不同程度的 ELDRS 效应和时间相关效应。

表 2 不同型号 SiGe HBT 剂量率辐照实验结果对比

Table 2 Comparison of dose rate experiments results in different SiGe HBTs

device type	accumulated total dose	high dose rate	low dose rate	response
IBM 5AM	100 krad	50 rad/s	0.01 rad/s	no obvious damage
IBM 7HP	100 krad	50 rad/s	0.01 rad/s	no obvious damage
IBM 8HP	100 krad	50 rad/s	0.01 rad/s	no obvious damage
IBM 9T	100 krad	50 rad/s	0.01 rad/s	no obvious damage
KT9041	1 000 krad	80 rad/s	0.01 rad/s	ELDRS
KT9041	1 000 krad	80 rad/s	0.13 rad/s	ELDRS
KT9041	5 00 krad	50 rad/s	0.10 rad/s	ELDRS
KT1151	1 000 krad	80 rad/s	0.05 rad/s	time-dependent effects
BFP640ESD	1 000 krad	80 rad/s	0.05 rad/s	partial sample damage
NESG260234	1 000 krad	80 rad/s	0.05 rad/s	no obvious damage

如图 1 所示, 在正向偏置状态下, 随着辐照总剂量的不断累积, 低剂量率辐照导致的 SiGe HBT 归一化过剩基极电流明显大于高剂量率辐照引起的过剩基极电流, 并在高剂量率辐照经过等时室温退火后仍没有真正地消除高、低剂量率的电离辐射损伤差异, 表明 KT9041 SiGe HBT 存在真正的剂量率效应, 即 ELDRS 效应。同时, 当器件工作于不同偏置状态时, 接受低剂量率辐照, 其最终损伤程度有所差别。

SiGe HBT 在材料、结构以及工艺等方面的内在性质与特点(如超薄发射极-基极隔离层、超薄内基区以及重掺杂多晶外延基区等), 使其在相同条件下具有比硅基 BJT 更好的抗总剂量效应能力。但对于 ELDRS 效应, 不同工艺 SiGe HBT 表现出不同的损伤响应, 这是由于器件尺寸、内部结构、隔离氧化工艺等都存在很大差异, 因此 SiGe HBT 作为双极晶体管的重要类型, 同样面临着 ELDRS 效应的挑战。

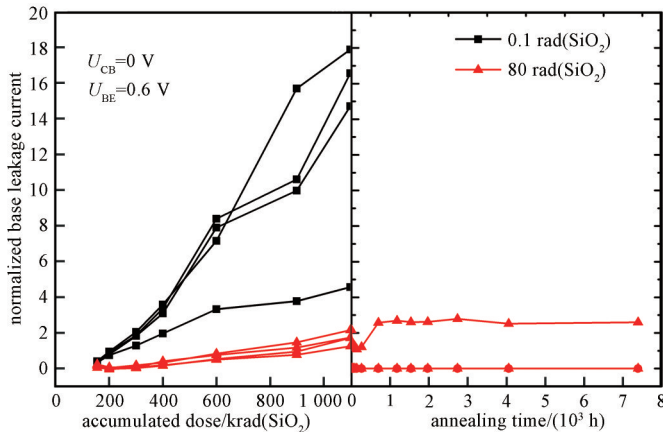


Fig.1 Normalized base leakage current of KT9041 SiGe HBTs for dose rate irradiation and room-temperature annealing as a function of the accumulated total dose

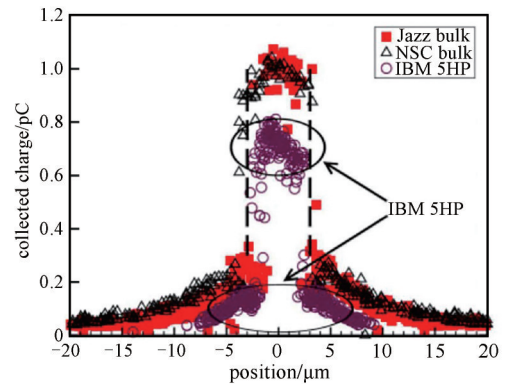
图 1 正向偏置状态下高、低剂量率辐照及退火过程中 KT9041 SiGe HBT 归一化过剩基极电流变化^[47]

Fig.2 Charge collection of collector in DTI SiGe HBT with different ion incident positions

图 2 DTI 结构 SiGe HBT 集电极电荷收集随入射位置的变化^[15]

2.2 单粒子效应

随着 SiGe HBT 广泛用于数字和射频等电路中, 针对其单粒子效应研究也逐渐成为关注的热点。2005 年起, 美国佐治亚理工学院和奥本大学等相继开展了 SiGe HBT 的质子、重离子以及激光微束等单粒子效应模拟实验, 并结合 TCAD 数值模拟方法开展了 SiGe HBT 单粒子效应的电荷收集机制、关键影响因素以及抗辐射加固设计等研究。结果表明, 具有深槽隔离(Deep Trench Isolation, DTI)结构的 SiGe HBT 单粒子效应敏感区域即为 DTI 区域^[14-16,51-56]。如图 2 所示, 针对 IBM, Jazz Semiconductor 和 National Semiconductor 三家先进工艺 SiGe HBT 的重离子辐照实验表明, DTI 结构不仅会阻挡其外部的过剩载流子向其内部的收集节点扩散, 还能限制过剩载流子向其外侧扩散, 导致电荷收集量显著提升。因此, 受 DTI 结构的影响, 被测器件单粒子效应敏感面积的角度依赖性与电路的临界电荷有紧密联系。此外, 单粒子效应引起的瞬态电流幅值和积分电荷收集量除与入射离子线性能量

传输(Linear Energy Transfer, LET)值有关外, 还与其射程密切相关, 表明体硅工艺中轻掺杂衬底对 SiGe HBT 单粒子效应敏感性有重要影响。

张晋新等利用 TCAD 仿真工具建立了国产 SiGe HBT 的三维模型并开展了单粒子效应仿真, 探索了国产器件的单粒子效应敏感区域, 并进一步改变器件偏置状态、工艺参数、环境温度以及入射离子 LET、角度等参数, 模拟了不同条件下 SiGe HBT 各端口的瞬态电流响应^[43,57-60]。如图 3 所示, 集电极和衬底产生了较大的电流瞬变, 集电极/衬底结(C/S 结)反偏是 SiGe HBT 单粒子效应的最劣偏置; 由于反偏 C/S 结面积较大, 集电极的电荷收集量达到 5 pC。

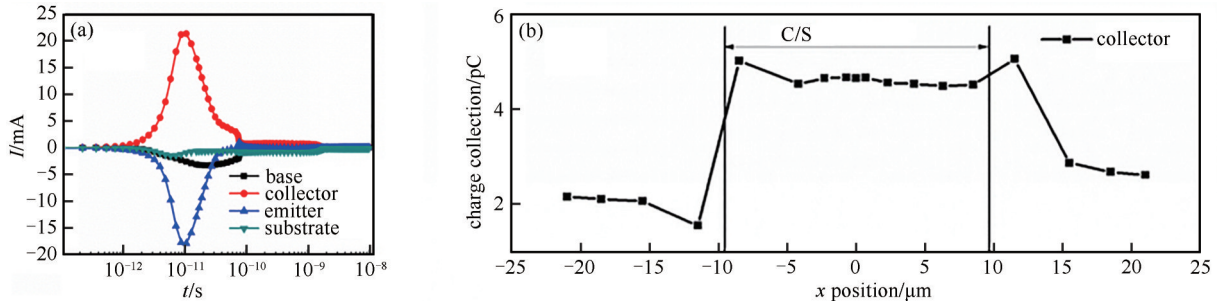


Fig.3 (a) transient currents of different terminals with reverse bias of C/S junction; (b) charge collection of collector in different ion incident positions
图 3 (a) C/S 结反偏条件下各端口电流随时间的变化; (b) 集电极电荷收集量随离子入射位置的变化^[59-60]

国产 SiGe HBT 在制造工艺上和国外主流器件存在差异, 主要体现在氧化隔离工艺和衬底接触上, 因此两类工艺器件的单粒子效应电荷收集机制也有所不同。图 4(a)为国产 SiGe HBT(KT9041), 采用垂直型 npn 结构; 图 4(b)为 IBM 工艺第三代 SiGe HBT 的结构示意图。国产 SiGe HBT 基极和集电极间的隔离采用 LOCOS 工艺形成, 没有 DTI 结构, 衬底接触制造在一个 p 型重掺杂隔离环上。IBM SiGe HBT 的基极/集电极结则由 STI 结构隔离, 并采用 DTI 结构进行器件间隔离。李培等针对两款典型的 SiGe HBT 开展了激光微束单粒子效应模拟实验, 图 5 为激光从不同位置入射两款 SiGe HBT 诱发的集电极瞬态电流随时间的变化关系: 激光入射位置不同, 诱发的单粒子效应电流瞬变差异较大; 两款 SiGe HBT 集电极的峰值电流数值接近, 这是由于电流瞬变峰值取决于激光微束入射瞬间电离的电子-空穴对形成的等离子体径迹, 主要与掺杂浓度有关, 两款器件集电区掺杂浓度相近, 电流瞬变峰值相似。由于 KT9041 SiGe HBT 具有较大的 C/S 结, 其集电极的扩散机制电荷收集能力较强, 因此瞬态电流脉冲宽度较大^[61-62]。

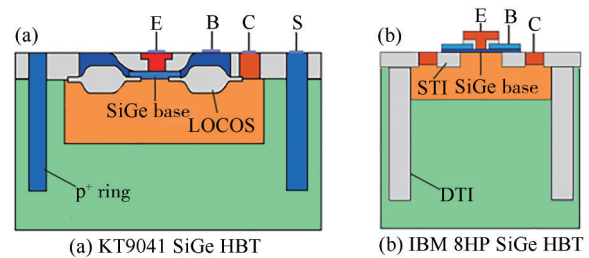


Fig.4 Schematic of device cross section of the SiGe HBTs
图 4 SiGe HBT 器件截面示意图

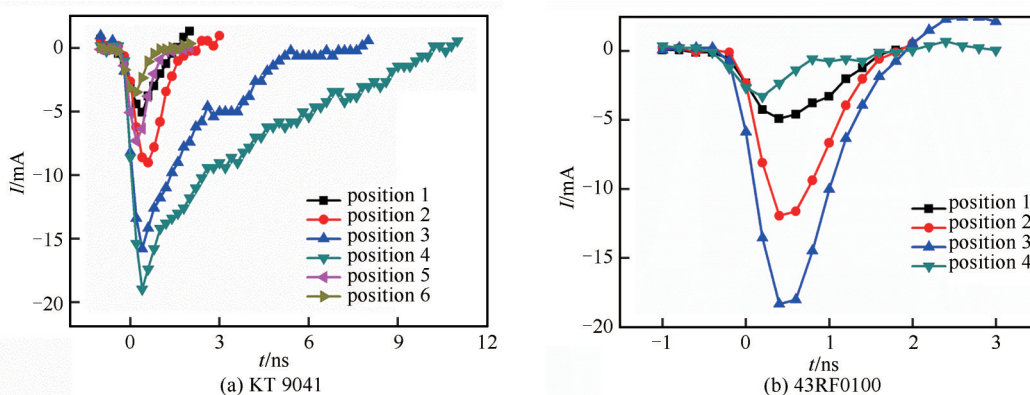


Fig.5 Induced collector transient current with time when laser incoming in SiGe HBTs at different positions
图 5 激光从不同位置入射 SiGe HBT 诱发的集电极电流瞬变随时间的变化关系

国外对于 SiGe HBT 的单粒子效应实验研究主要集中在重离子辐照。但国内学者发现重离子辐照引起的 SiGe HBT 寄存器单粒子效应翻转 LET 阈值低, 并表现出较高的饱和截面, 推断质子辐照应该也会导致 SiGe HBT 发生

单粒子效应。2017~2019年,魏佳男等分别开展了国产 SiGe HBT 的重离子微束和质子辐照实验^[63-64],结果如图 6 所示,在相同的偏置条件下,重离子导致的集电极瞬态电流峰值显著高于质子导致的集电极瞬态电流峰值。同时,重离子导致的 SiGe HBT 集电极瞬态电流脉冲也比质子的持续时间更长。由此可见,当 SiGe 电路工作在较高频率,其工作周期缩短至 ps 或几个 ns 的时间尺度时,重离子诱发的单个集电极瞬态电流脉冲可比质子诱发的集电极瞬态脉冲覆盖更多的工作周期,从而诱发更为严重的多位翻转效应。如上所述,虽然重离子辐照导致的 SiGe HBT 单粒子效应瞬态电流脉冲峰值和宽度都比质子辐照大,但空间辐射环境中质子占比最大,仍是 SiGe HBT 空间单粒子效应研究不可忽略的重要方面。

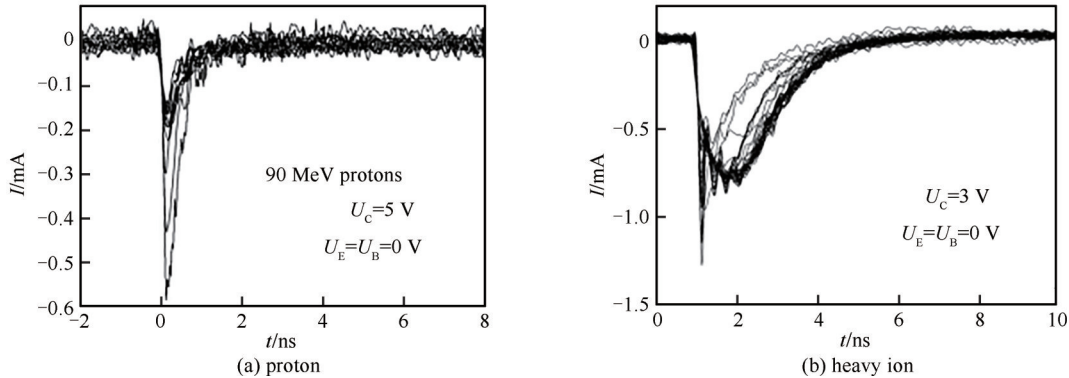


Fig.6 Transient currents of collector as a function of time induced by proton and heavy ion
图 6 质子与重离子辐照导致的集电极瞬态电流随时间的变化

国外研究表明,DTI 结构对 SiGe HBT 单粒子效应的角度相关性有重要影响,可导致器件的单粒子效应敏感面积在不同的临界电荷条件下,随重离子入射角度变化呈现出不同的变化趋势。国产 SiGe HBT 没有 DTI 结构,粒子入射角度对其单粒子效应的影响不同于国外具有 DTI 结构的 SiGe HBT。张晋新等利用 TCAD 仿真工具开展了重离子入射角度对国产 SiGe HBT 单粒子效应的影响研究,认为重离子倾角入射会显著改变其在器件模型中的电离径迹长度,从而导致电荷沉积量的不同,并最终导致电荷收集量的差异^[59]。但这一结论并不适用于解释中高能质子以角度入射 SiGe HBT 的影响机制,因为中高能质子通过核反应产生的次级粒子的发射方向具有较大随机性,改变质子的入射角度并不能唯一地确定次级粒子的方向,因此也不能确定过剩电荷的沉积路径。

图 7 为 90 MeV 质子以不同角度入射国产 SiGe HBT 诱发的集电极瞬态电流脉冲持续时间分布情况。由图可知,集电极瞬态电流脉冲波形分布的主体都呈现出相同的基本特性,即快速的上升沿和相对缓慢的下降沿,但随着质子入射角度增大,集电极瞬态脉冲波形的形貌开始发生变化,下降沿变得极为缓慢,出现明显的拖尾,导致瞬态电流脉冲的持续时间显著延长,集电极瞬态电流脉冲持续时间的分布范围发生展宽。根据蒙特卡洛模拟计算结果,集电极瞬态电流脉冲的持续时间随入射角度的增加可能和两个因素有关:一是入射角度较大的情况下, SiGe HBT 灵敏体积内过剩载流子数量增加,电荷收集时间将变得更长;二是倾角入射增加了高能次级粒子的电离径迹同时穿过相邻的分立灵敏体积的概率,瞬态电流脉冲将拥有较多的扩散组分,从而导致脉冲持续时间的增长。

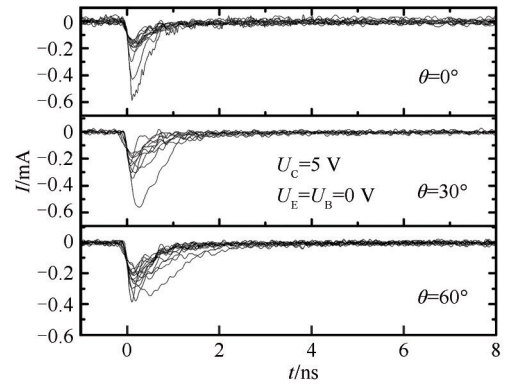


Fig.7 Transient currents of collector as a function of time induced by 90 MeV proton with different incident positions
图 7 不同入射角度下 90 MeV 质子诱发的 SiGe HBT 集电极瞬态电流随时间的变化^[64]

国外基于 SiGe HBT 单粒子效应机理和影响因素的研究也开展了一些器件级加固方面的工作。美国奥本大学 Guofu NIU 等基于 TCAD 仿真方法提出了一种用于单粒子效应加固的背结结构^[65],如图 8(a)所示,该结构在 DTI 下部引入 n 型埋层并引出单独接触,当带电粒子入射器件内部时,一部分过剩载流子被背结收集,从而减弱 CS 结的电荷收集。Varadharajaperumal 等则提出了一种伪集电极结构^[66-67],如图 8(b)所示,该结构在 DTI 外部引入了一个重掺杂的 n 型环状区域并引出单独的接触,从而形成一个伪 CS 结,带电粒子入射器件内部时,一部分过剩载流子被该结收集。仿真结果表明,伪集电极结构可显著降低来自 DTI 外部的扩散电荷收集,但对 DTI 内部粒子

入射导致的漂移电荷收集减弱较少。

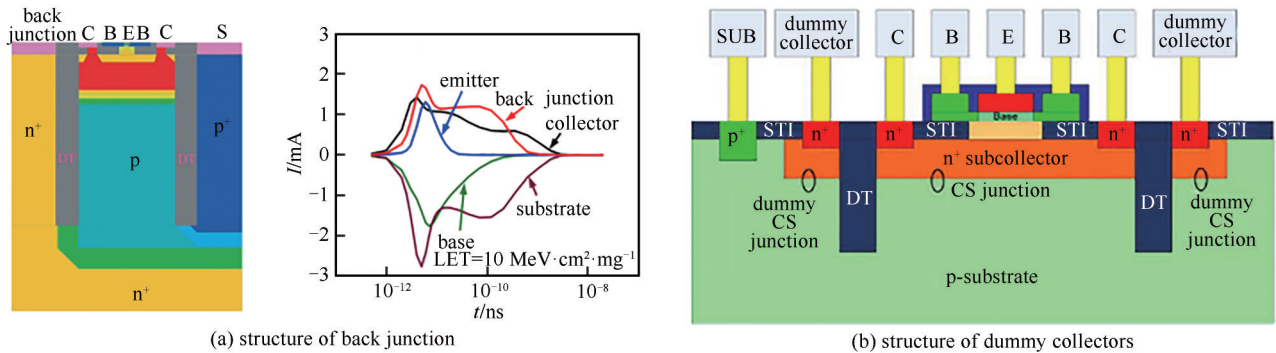


Fig.8 Schematics of radiation hardening
图8 SiGe HBT加固方法示意图

国产 SiGe HBT 单粒子效应电荷收集机制不同于国外，在 CS 结内及其附近的区域对电荷收集较为敏感，当粒子入射器件时，CS 结通过漂移或扩散形式收集沿离子径迹产生的电荷，收集量越多，产生单粒子效应的概率和影响程度就越大。针对国产 SiGe HBT 单粒子效应的敏感区域和电荷收集机制，其抗辐射加固技术主要集中在如何减少集电极对电荷的收集上。单粒子效应抗辐射加固主要分为工艺抗辐射加固和设计抗辐射加固：工艺加固需改变器件的制造工艺，如背结加固和绝缘衬底工艺(Silicon-On-Insulator, SOI)技术，但加固成本昂贵且研制周期较长；设计抗辐射加固采用特殊版图或电路结构进行抗辐射加固，不改变制造工艺，成本较低，逐渐成为一种重要的电子元器件抗辐射加固技术。李培等通过半导体器件模拟工具改变版图布局，实现 SiGe HBT 的设计抗辐射加固^[68]，如图 9 所示，在经过校准的 SiGe HBT 三维物理模型版图布局中引入伪集电极，形成的新 C/S 结具有更大的反偏能力，能够大量收集单粒子效应产生的电荷，从而有效降低集电极的电荷收集量，提高 SiGe HBT 单粒子效应抗辐射能力。模拟结果表明，伪集电极加固后的 SiGe HBT 各电极电荷收集量都不同程度地降低，集电极电荷收集量由原来的 5 pC 降至 2 pC，伪集电极能够更多地收集扩散电荷以减少实际集电极的电荷收集量，加固后 SiGe HBT 集电极电荷收集敏感区域面积与电荷收集量都缩小为加固前的 50%。

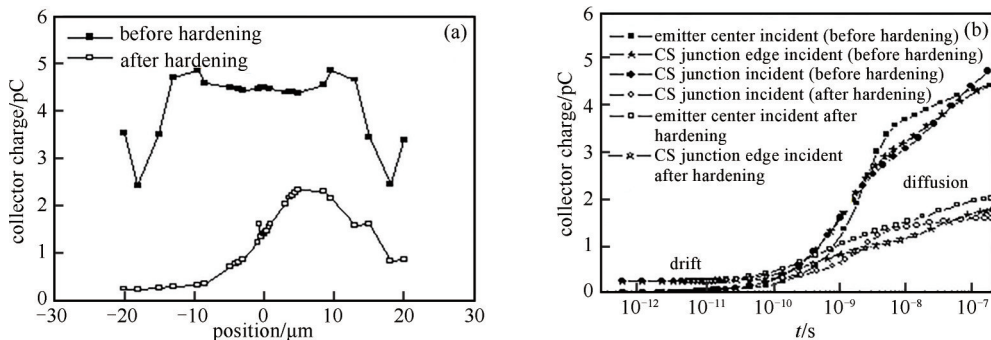


Fig.9 Before and after radiation:(a) charge collection of collector in different ion incident positions; (b) the charge collection of collector as a function of time in different ion incident positions

图9 加固前后(a)集电极电荷收集量随入射位置的变化；(b)不同入射位置集电极瞬态电流随时间的变化^[68]

综上所述，单粒子效应引起的电荷收集以及电流脉冲是 SiGe HBT 空间辐射应用的瓶颈问题，国内外都开展了大量的地面模拟实验、模拟计算以及抗辐射加固设计研究。国内学者主要针对国产工艺 SiGe HBT 器件系统开展了重离子辐照、质子辐照以及激光模拟单粒子效应实验，并结合器件数值模拟仿真分析，给出了国产器件的单粒子效应敏感区域，分析了单粒子效应电荷收集的关键影响因素，初步提出了单粒子效应的抗辐射加固思路。

2.3 辐射协同效应

空间电子学系统面临着由多样粒子与射线组成的复杂辐射环境，；不同类型辐射效应之间存在相互影响，混合辐照引起的参数退化甚至可加剧为单项辐射退化的数倍，导致强烈的非预期失效，严重威胁电子系统的可靠性。近年来，随着国产 SiGe HBT 辐射效应研究的不断深入，张晋新、李培等率先针对国产 SiGe HBT 开展了辐射协同效应研究^[69]，主要集中在电离总剂量/单粒子效应协同效应和电离总剂量/位移损伤协同效应。其中，针

对国产 SiGe HBT 开展的高、低剂量率 ^{60}Co - γ 辐照实验和脉冲激光微束实验表明: SiGe HBT 的电离总剂量/单粒子效应协同效应与 ^{60}Co - γ 辐照实验中的偏置条件、剂量率以及脉冲激光实验中的能量、偏置电压密切相关。如图 10 所示, 当入射激光能量较低时, 不同剂量率辐照后的单粒子效应集电极电荷收集量几乎相同, 在激光能量超过 5 nJ 后, 单粒子效应的影响才开始表征显著。当 SiGe HBT 外加 $U_c=+1.5\text{ V}$ 的偏置时, 单粒子效应引起的电荷收集量显著增大; 而当 SiGe HBT 处于 $U_c=+3\text{ V}$ 时, 电离总剂量效应对 SiGe HBT 的单粒子效应的影响并不显著。分析认为, 电离总剂量效应在 SiGe HBT 氧化层中引入的深能级氧化物陷阱正电荷形成的空间电场对单粒子效应畸变静电势的影响是协同效应的主要影响因素; 同时, 辐射诱发的界面陷阱电荷也对单粒子效应扩散电荷的收集起到少量复合作用, 有可能抵消 SiGe HBT 单粒子效应辐射损伤。

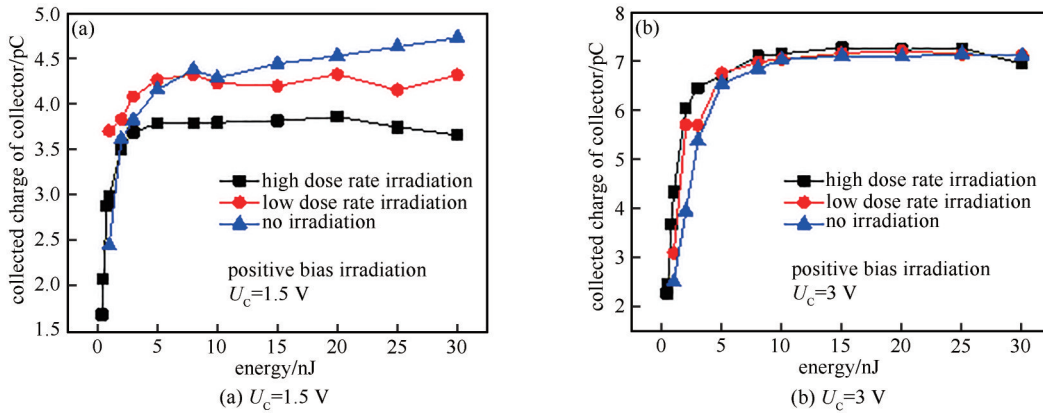


Fig.10 Charge collection versus laser energy after irradiated by high and low dose rates with different biases
图 10 不同偏置条件下高、低剂量率辐照后集电极电荷收集量随入射激光能量的变化^[69]

研究表明, 双极晶体管还存在位移损伤/电离总剂量协同效应, 单项辐照实验的考核方式并不能正确评估电子器件抗辐射性能, 这无疑给电子器件的抗辐射能力评估和加固设计带来了挑战^[70-72], SiGe HBT 作为双极晶体管的重要类型, 有必要开展其位移损伤/电离总剂量协同效应研究。西安交通大学李培等分别针对国产 SiGe HBT 开展了 ^{60}Co - γ 辐照、中子以及中子/ γ 混合辐照实验, 实验结果如图 11 所示, 中子/ γ 混合辐照实验前后的集电极电流基本保持不变, 但基极电流退化较为严重。此外, 混合辐照实验导致的 ΔI_B 大于 ^{60}Co - γ 和中子单项辐照的 ΔI_B 之和, 并且这种损伤增强随着 U_{BE} 的增大而减弱。

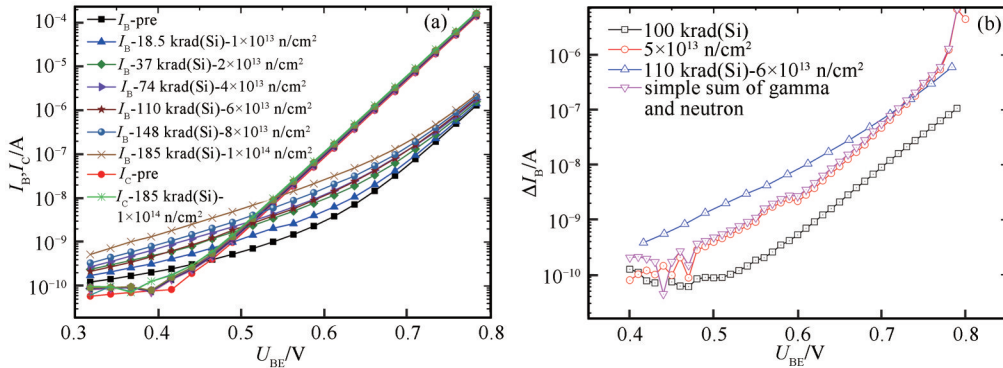


Fig.11 Characteristics before and after irradiation:(a) Gummel characteristics with the total dose and neutron fluence accumulating;
(b) ΔI_B induced by different radiation as a function of U_{BE}

图 11 (a) 中子/ γ 混合辐照前后电学特性随时间变化;(b) 不同辐射条件下 ΔI_B 随 U_{BE} 的变化

由于 SiGe HBT 具有优异的抗位移损伤和总剂量效应的能力, 并且早期辐射效应研究对双极晶体管协同效应的认识不够深入, 因此国内外关于 SiGe HBT 协同效应的研究较少。然而, 空间辐射环境是一个多种粒子组成的复杂环境, 形成的辐射损伤是多种效应(总剂量效应、单粒子效应、位移效应)的综合结果, 但地面模拟实验环境较为单一, 且与实际空间辐射环境存在差异, 因此, 总剂量效应与位移损伤、单粒子效应的协同作用是空间长寿命电子元器件面临的关键问题。近年来, 国内学者基于国产工艺 SiGe HBT 开展了电离总剂量/单粒子效应以及电离总剂量/位移损伤协同效应研究。研究表明, 国产 SiGe HBT 器件表现出一定的协同效应规律, 但其损伤机理还需进一步深入研究。

3 结论

综上所述,空间单粒子效应引起的瞬态电荷收集和功能失效是 SiGe HBT 空间应用的瓶颈问题。由于工艺不同,国产 SiGe HBT 表现出不同于国外器件的单粒子效应电荷收集机制,并存在显著的 ELDRS 效应。由于不同类型辐射效应之间存在相互影响,国内学者还率先开展了国产 SiGe HBT 的辐射协同效应研究,研究表明国产工艺表现出显著的电离总剂量/单粒子效应协同效应以及位移损伤/电离总剂量协同效应。SiGe HBT 作为 SiGe BiCMOS 电路的核心器件,其空间辐射效应直接影响 SiGe BiCMOS 电路的空间应用。

未来,我国还将开展更多的对外星系和深空探测任务,这对航天器电路系统的远程控制功能提出了更高的要求,尤其在数据传输和收发功能方面。随着 CMOS 工艺的日益成熟和 SiGe HBT 技术的不断提高, SiGe BiCMOS 电路已广泛用于卫星通信、GPS 定位导航、军事雷达以及无线局域网和全球卫星定位系统中,在空间无线通信领域扮演着越来越重要的角色。早在 1993 年, NASA 就在 X-33 型号的航天飞机安全控制单元中应用了 SiGe BiCMOS 工艺射频电路,用于收集壳体外部传感器的各类信号。基于先进的 SiGe BiCMOS 技术,美国和欧洲已经开展了 SiGe BiCMOS 低噪声放大器、比较器、差分器以及分频器等电路的辐射效应研究,特别是单粒子效应研究。随着国产 SiGe HBT 空间辐射效应的不断完善和国产 SiGe BiCMOS 工艺的不断发展,国内已有学者开始关注 SiGe BiCMOS 电路的空间辐射效应,相信在不久的将来会有更多关于国产 SiGe BiCMOS 电路的辐射效应研究成果。

参考文献:

- [1] APPASWAMY A. Operation of inverse mode SiGe HBTs and ultra-scaled CMOS devices in extreme environments[D]. Atlanta, USA:Georgia Institute of Technology, 2009.
- [2] 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.
- [3] CRESSLER J D. Re-engineering silicon:Si-Ge heterojunction bipolar technology[J]. IEEE Spectrum, 1995,32(3):49-55.
- [4] CRESSLER J D. SiGe BiCMOS technology:an IC design platform for extreme environment electronics applications[C]// 2007 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. Phoenix,AZ,USA:IEEE, 2007:141-149.
- [5] WEINREB S,BARDIN J C,MANI H. Design of cryogenic SiGe low-noise amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(11):2306-2312.
- [6] KRITHIVASAN R,LU Y,NAJAFIZADEH L,et al. A high-slew rate SiGe BiCMOS operational amplifier for operation down to deep cryogenic temperatures[C]// IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Maastricht,Netherlands:IEEE, 2006: 1-4.
- [7] PRUVOST S,DELCOURT S,TELLIEZ I,et al. Microwave and noise performance of SiGe BiCMOS HBT under cryogenic temperatures[J]. IEEE Electron Device Letters, 2005,26(2):105-108.
- [8] INANLOU F,LOURENCO N E,FLEETWOOD Z E,et al. Impact of total ionizing dose on a 4th generation,90 nm SiGe HBT Gaussian pulse generator[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(6):3050-3054.
- [9] HEGDE V N,PRADEEP T M,PUSHPA N,et al. A comparison of electron, proton and gamma irradiation effects on the IV characteristics of 200 GHz SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2018,18(4):592-598.
- [10] VONNO N V,LUCAS R,THORNBERRY D. Total dose hardness of a commercial SiGe BiCMOS technology[C]// IEEE Radiation and Its Effects on Components and Systems. Fontevraud,France:IEEE, 1999:414-417.
- [11] ROLDHN J,ANSLEY W E,CRESSLER J D,et al. Neutral radiation tolerance of advanced UHV/CVD SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997,44(6):1965-1973.
- [12] METCALFE J,DORFAN D E,GRILLO A A,et al. Evaluation of the radiation tolerance of SiGe heterojunction bipolar transistors under 24 GeV proton exposure[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(2):3889-3893.
- [13] HANSEN D L,PONG S,ROSENTHAL P,et al. Total ionizing dose testing of SiGe 7HP discrete heterojunction bipolar transistors for ELDRS effects[C]// IEEE NSREC Data Workshop. Honolulu,HI,USA:IEEE, 2007:215-220.
- [14] REED R A,MARSHALL P W,PICKEL J C,et al. Heavy-ion broad-beam and microprobe studies of single-event upsets in 0.20 μm SiGe heterojunction bipolar transistors and circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(6):2184-2190.
- [15] PELLISH J A,REED R A,SCHRIMPF R D,et al. Substrate engineering concepts to mitigate charge collection in deep trench isolation technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3298-3305.
- [16] VIZKELETHY G,PHILLIPS S D,NAJAFIZADEH L,et al. Nuclear microbeam studies of Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors(HBTs)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2010,268(11-12):2092-2098.

- [17] PATTON G L, IYER S S, DELAGE S L, et al. Silicon-Germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy[J]. IEEE Electron Device Letters, 1988,9(4):165–167.
- [18] FISCHER S E, COOK R K, KNEPPER R W, et al. A 45 GHz strained-layer SiGe heterojunction bipolar transistor fabricated with low temperature epitaxy[C]// International Technical Digest on Electron Devices Meeting. Washington, DC, USA: IEEE, 1989: 890–892.
- [19] PATTON G L, COMFORT J H, MEYERSON B S, et al. 75 GHz f_T SiGe-base heterojunction bipolar transistors[J]. IEEE Electron Device Letters, 1990,11(4):171–173.
- [20] CRABBE E F, MEYERSON B S, STORK J M C, et al. Vertical profile optimization of very high frequency epitaxial Si and SiGe-base bipolar transistors[C]// IEEE International Electron Devices Meeting(IEDM). Washington, DC, USA: IEEE, 1994:83–86.
- [21] AHLGREN D C, GILBERT M, GREENBERG D, et al. Manufacturability demonstration of an integrated SiGe HBT technology for the analog and wireless marketplace[C]// International Electron Devices Meeting Technical Digest. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1996:859–862.
- [22] WASHIO K. SiGe HBT and BiCMOS technologies[C]// IEEE International Electron Devices Meeting 2003. Washington, USA: IEEE, 2003.
- [23] PEIYI C. Development of SiGe materials and devices[C]// 6th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Shanghai, China: IEEE, 2001:570–574.
- [24] HEINEMANN B, RÜCKER H, BARTH R, et al. SiGe HBT with f_T/f_{max} of 505 GHz/720 GHz[C]// IEEE International Electron Devices Meeting(IEDM). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016:1–4.
- [25] LABEL K A, SAMPSON M J. The NASA Electronic Parts and Packaging(NEPP) program:roadmap for NASA's radiation effects on and reliability of electronics efforts-update[C]// Government Microcircuits Application Conference. San Diego, USA: [s. n.], 2006.
- [26] MARSHALL P, CHEN D, PELLISH J, et al. SiGe technology-radiation update[C]// NASA Electronic Parts and Packaging(NEPP) Program Electronic Technology Workshop. Greenbelt, Maryland: [s. n.], 2011.
- [27] JIANG N, MA Z, MA P, et al. Impact of proton radiation on the large-signal power performance of SiGe power HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(4):2361–2366.
- [28] LABEL K A, SAMPSON M J. The NASA Electronic Parts and Packaging(NEPP) program-parts, packaging, and radiation reliability research on electronics[C]// The Netherlands:European Space Components Conference. Noordwijk, NE: [s. n.], 2013.
- [29] CRESSLER J D. On the potential of SiGe HBTs for extreme environment electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2005,93(9): 1559–1582.
- [30] NIU G F, MA R, LUO L, et al. Wide temperature range SiGe HBT noise parameter modeling and LNA design for extreme environment electronics[J]. International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices & Fields, 2015,28(6): 675–683.
- [31] NIU G F. Enablement and optimization of SiGe HBTs for extreme environment electronics[J]. The Electrochemical Society, 2010,33(6):287–299.
- [32] LIU B, CHEN S, LIANG B, et al. Temperature dependency of charge sharing and MBU sensitivity in 130 nm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(4):2473–2479.
- [33] YUAN J. Cryogenic operation of silicon-germanium heterojunction bipolar transistors and its relation to scaling and optimization[D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [34] BABCOCK J A, CRESSLER J D, VEMPATI L S, et al. Ionizing radiation tolerance and low-frequency noise degradation in UHV/CVD SiGe HBT's[J]. IEEE Electron Device Letter, 1995,16(8):351–353.
- [35] BELLINI M, JUN B, SUTTON A K, et al. The effects of proton and X-ray irradiation on the DC and AC performance of complementary(npn+npn) SiGe HBTs on thick-film SOI[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,54(6):2245–2250.
- [36] CHEN T, SUTTON A K, BELLINI M, et al. Proton radiation effects in vertical SiGe HBTs fabricated on CMOS-compatible SOI[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(6):2353–2357.
- [37] CRESSLER J D, KRITHIVASAN R, ZHANG G, et al. An investigation of the origins of the variable proton tolerance in multiple SiGe HBT BiCMOS technology generations[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002,49(8):3203–3207.
- [38] 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[J]. 核技术, 2005,28(3):213–216. (HUANG Wentao, WANG Jilin, LIU Zhinong, et al. Electrical performance analysis of electron irradiated SiGe HBT and Si BJT[J]. Nuclear Techniques, 2005,28(3):213–216.)
- [39] 牛振红, 郭旗, 任迪远, 等. SiGe HBT 与 Si BJT 的 ^{60}Co - γ 射线总剂量辐照效应比较[J]. 固体电子学研究与进展, 2007,27(3):

- 317–319. (NIU Zhenhong, GUO Qi, REN Diyuan, et al. A comparison of the effects of total dose Gamma irradiation on SiGe HBT and Si BJT[J]. Research & Progress of SSE, 2007,27(3):317–319.)
- [40] 孙亚宾,付军,许军,等. 不同剂量率下锗硅异质结双极晶体管电离损伤效应研究[J]. 物理学报, 2013,62(19):196104. (SUN Yabin, FU Jun, XU Jun, et al. Study on ionization damage of silicon-germanium heterojunction bipolar transistors at various dose rates[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(19):196104.)
- [41] LIU M H, LU W, MA W Y, et al. Total ionizing dose effects of domestic SiGe HBTs under different dose rates[J]. Chinese Physics C, 2016,40(3):036003.
- [42] ZHANG J, GUO Q, GUO H, et al. Impact of bias conditions on total ionizing dose effects of ^{60}Co - γ in SiGe HBT[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016,63(2):1251–1258.
- [43] 张晋新,郭红霞,郭旗,等. 重离子导致的锗硅异质结双极晶体管单粒子效应电荷收集三维数值模拟[J]. 物理学报, 2012,62(4):487–494. (ZHANG Jinxin, GUO Hongxia, GUO Qi, et al. 3D simulation of heavy ion induced charge collection of single event effects in SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2012,62(4):487–494.)
- [44] HANSEN D L, PONG S, ROSENTHAL P, et al. Total ionizing dose testing of SiGe 7HP discrete heterojunction bipolar transistors for ELDRS effects[C]// 2007 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Honolulu, USA:IEEE, 2007:215–220.
- [45] FLEETWOOD Z E, CARDOSO A S, SONG I, et al. Evaluation of enhanced low dose rate sensitivity in fourth-generation SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(6):2915–2922.
- [46] ZHANG Jinxin, GUO Hongxia, REN Diyuan, et al. Dose rate effects of SiGe HBT for Gamma rays under different biases[C]// IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. San Francisco, USA:IEEE, 2013.
- [47] LI Pei, HE Chaohui, GUO Hongxia, et al. An investigation of ELDRS in different SiGe processes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,64(5):1137–1141.
- [48] 刘默寒. 典型SiGe HBTs的总剂量辐射效应研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015. (LIU Mohan. Total ionizing radiation effect of typical SiGe HBTs[D]. Urumqi, Xinjiang, China: Xinjiang University, 2015.)
- [49] SUN Y, FU J, XU J, et al. Investigation of bias dependence on enhanced low dose rate sensitivity in SiGe HBTs for space application[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2014,738(2):82–86.
- [50] SUN Y, FU J, XU J, et al. Bias dependence of ionizing radiation damage in SiGe HBTs at different dose rates[J]. Physica B: Condens Matter, 2014,434(2):95–100.
- [51] PeLLISH J A, REED R A, MCMORROW D, et al. Heavy ion microbeam- and broadbeam-induced transients in SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(6):3078–3084.
- [52] LOURENCO N E, FLEETWOOD Z E, ILDEFONSO A, et al. The impact of technology scaling on the single-event transient response of SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,64(1):406–414.
- [53] OMPRAKASH A P, ILDEFONSO A, FLEETWOOD Z E, et al. The effects of temperature on the single-event transient response of a high-voltage(>30 V) complementary SiGe-on-SOI technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019,66(1):389–396.
- [54] XU Z, NIU G, 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.
- [55] CRESSLER J D. Radiation effects in SiGe technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,60(3):1992–2014.
- [56] MARSHALL P, CARTS M, CURRIE S, et al. Autonomous bit error rate testing at multi-gbit/s rates implemented in a 5AM SiGe Circuit for Radiation Effects Self Test(CREST)[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(6):2446–2454.
- [57] 张晋新,贺朝会,郭红霞,等. 不同偏置影响锗硅异质结双极晶体管单粒子效应的三维数值仿真研究[J]. 物理学报, 2014,63(24):248503. (ZHANG Jinxin, HE Chaohui, GUO Hongxia, et al. Three-dimensional simulation study of bias effect on single event effects of SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(24):248503.)
- [58] 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(8):1180–1186.
- [59] ZHANG Jinxin, GUO Hongxia, WEN Lin, et al. 3D simulation of angled strike heavy-ion induced charge collection in silicon-germanium heterojunction bipolar transistors[J]. Journal of Semiconductors, 2014,35(4):56–61.
- [60] ZHANG Jinxin, HE Chaohui, GUO Hongxia, et al. Three-dimensional simulation of fabrication process-dependent effects on single event effects of SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Chinese Physics B, 2017,26(8):542–550.
- [61] LI Pei, GUO Hongxia, GUO Qi, et al. Laser-induced single event transients in local oxidation of silicon and deep trench isolation silicon-germanium heterojunction bipolar transistors[J]. Chinese Physics Letters, 2015,32(8):088505.
- [62] LI Pei, GUO Hongxia, GUO Qi, et al. Single-event response of the SiGe HBT in TCAD simulations and laser microbeam experiment[J]. Chinese Physics B, 2015,24(8):088502.

- [63] ZHANG Jinxin, GUO Hongxia, ZHANG Fengqi, et al. Heavy ion micro-beam study of Single-Event Transient(SET) in SiGe Heterjunction Bipolar Transistor[J]. Science China Information Sciences, 2017,60(12):116–118.
- [64] WEI Jianan, LI Yong, YANG Weitao, et al. Proton-induced current transient in SiGe HBT and charge collection model based on Monte Carlo simulation[J]. Science China Technological Sciences, 2020,63(5):851–858.
- [65] NIU G, YANG H, VARADHARAJAPERUMAL M, et al. Simulation of a new back junction approach for reducing charge collection in 200 GHz SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(6):2153–2157.
- [66] VARADHARAJAPERUMAL M, NIU G, WEI X, et al. 3D simulation of SEU mitigation of SiGe HBTs using shared dummy collector[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,54(6):2330–2337.
- [67] SUTTON A K, BELLINI M, CRESSLER J D, et al. An evaluation of transistor-layout RHBD techniques for SEE mitigation in SiGe HBTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,54(6):2044–2052.
- [68] 李培, 郭红霞, 郭旗, 等. 锗硅异质结双极晶体管单粒子效应加固设计与仿真[J]. 物理学报, 2015,64(11):421–427. (LI Pei, GUO Hongxia, GUO Qi, et al. Simulation and design of SEE radiation hardening for SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(11):421–427.)
- [69] ZHANG Jinxin, GUO Hongxia, PAN Xiaoyu, et al. Synergistic effect of total ionizing dose on single event effect induced by pulsed laser microbeam on SiGe heterojunction bipolar transistor[J]. Chinese Physics B, 2018,27(10):108501.
- [70] LI X, YANG J, LIU C, et al. Synergistic effects of NPN transistors caused by combined proton irradiations with different energies[J]. Microelectronics Reliability, 2018(82):130–135.
- [71] LI X, LIU C, YANG J. Synergistic effect of ionization and displacement damage in NPN transistors caused by protons with various energies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015,62(3):1375–1382.
- [72] WANG C, BAI X, CHEN W, et al. Simulation of synergistic effects on lateral PNP bipolar transistors induced by neutron and gamma irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2015(796):108–113.

作者简介:

李培(1989–), 女, 西安市人, 讲师, 主要研究方向为电子元器件空间辐射效应研究, email:lipei0916@xjtu.edu.cn.

(上接第522页)

- [65] KRISHNA R, JONES A N, MCDERMOTT L, et al. Neutron irradiation damage of nuclear graphite studied by high-resolution transmission electron microscopy and Raman spectroscopy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015,467(2):557–565.
- [66] KARTHIK C, KANE J, BUTT D P, et al. In situ transmission electron microscopy of electron-beam induced damage process in nuclear grade graphite[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011,412(3):321–326.

作者简介:

史明霞(1999–), 女, 甘肃省白银市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为石墨烯及其电子器件的辐照损伤, email:mxshiemily@std.uestc.edu.cn.