

锗硅异质结双极晶体管单粒子效应加固设计与仿真

李培 郭红霞 郭旗 文林 崔江维 王信 张晋新

Simulation and design of single event effect radiation hardening for SiGe heterojunction bipolar transistor

Li Pei Guo Hong-Xia Guo Qi Wen Lin Cui Jiang-Wei Wang Xin Zhang Jin-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 118502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.118502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Three-dimensional simulation study of bias effect on single event effects of SiGe heterojunction bipolar transistor

物理学报.2014, 63(24): 248503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248503>

沟槽型发射极 SiGe 异质结双极化晶体管新结构研究

Research on SiGe heterojunction bipolar transistor with a trench-type emitter

物理学报.2014, 63(14): 148503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148503>

超结硅锗碳异质结双极晶体管机理研究与特性分析优化

Mechanism and characteristic analysis and optimization of SiGeC heterojunction bipolar transistor with super junction

物理学报.2014, 63(4): 048501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048501>

异质结界面电荷对突变 InP/InGaAs 异质结双极晶体管热场发射影响研究

The impact of interface charges at the heterojunction on the carriers transport in abrupt InP/InGaAs heterojunction bipolar transistor

物理学报.2013, 62(17): 178501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.178501>

不同样式的高功率微波对双极晶体管的损伤效应和机理

The damage effect and mechanism of the bipolar transistor induced by different types of high power microwaves

物理学报.2013, 62(12): 128501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.128501>

锗硅异质结双极晶体管单粒子效应加固设计与仿真^{*}

李培¹⁾²⁾ 郭红霞^{1)2)3)†} 郭旗¹⁾²⁾ 文林¹⁾²⁾ 崔江维¹⁾²⁾
王信¹⁾²⁾ 张晋新⁴⁾

1)(中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室;
新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(西北核技术研究所, 西安 710024)

4)(西安交通大学, 西安 710049)

(2014年9月21日收到; 2015年1月16日收到修改稿)

本文设计了一种通过在版图布局中引入伪集电极的方法来提高锗硅异质结双极晶体管 (SiGe HBT) 抗单粒子性能的方法. 利用半导体器件模拟工具, 针对加固前后的 SiGe HBT 开展了单粒子效应仿真模拟, 分析了伪集电极对 SiGe HBT 电荷收集机理的影响. 结果表明, 引入的伪集电极形成的新的集电极-衬底结具有较大的反偏能力, 加固后 SiGe HBT 伪集电极通过扩散机理, 大量收集单粒子效应产生的电荷, 有效地减少了实际集电极的电荷收集量, 发射极、基极电荷收集量也有不同程度的降低, 加固设计后 SiGe HBT 的单粒子效应敏感区域缩小, 有效的提高了 SiGe HBT 器件抗单粒子效应辐射性能. 此项工作的开展为 SiGe HBT 电路级单粒子效应抗辐射加固设计打下良好的基础.

关键词: 锗硅异质结双极晶体管, 单粒子效应, 加固设计, 伪集电极

PACS: 85.30.Pq, 61.80.Az, 73.40.Lq, 61.80.X

DOI: 10.7498/aps.64.118502

1 引言

高可靠、强抗辐照性能且适应空间极端环境温度的电子元器件是确保航天探测系统正常工作的关键^[1]. SiGe HBT 由于其硅基能带工程的材料和器件结构的优势, 具有卓越的低温特性和优异的抗总剂量辐照性能, 使其具有推广应用于卫星通信、深空探测设备等极端空间环境中的潜在可能^[2-7]. 然而相关研究表明, SiGe HBT 对单粒子效应非常敏感, 表现在导致器件发生单粒子效应的重离子 LET 阈值很低和较高的饱和截面^[8-12]. 单粒子效应成为制约其空间应用的关键因素, 因此迫切需要开展 SiGe HBT 单粒子效应抗辐射加固技术研究.

从2000年开始, 美国国防部和国家航空航天局 (NASA) 强力合作开展美国国防部多学科大学研究 (MURI) 计划, 其目标就是研究未来空间应用电子元器件的抗辐射加固, SiGe HBT 已被列入空间极端环境下采用的电子元器件. SiGe HBT 单粒子效应抗辐射加固主要分为工艺和设计抗辐射加固: 工艺加固需要改变器件的制造工艺, 如背结加固和 SOI 技术^[13-15], 但加固成本昂贵且研制周期较长; 设计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.

国外已经针对 SiGe HBT 单粒子效应提出了伪集电极的加固设计思路^[16-19], 但国内外器件在工艺和结构上有很大不同, 使得伪集电极的引入方

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 61274106) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: guohxnint@126.com

式和电荷收集过程也有很大差异^[20-23]. 本文率先针对国产 SiGe HBT 开展单粒子效应的伪集电极加固设计研究, 利用半导体器件模拟工具, 对加固前后的 SiGe HBT 开展单粒子效应仿真模拟, 分析伪集电极对 SiGe HBT 电荷收集机理的影响, 探讨加固前后 SiGe HBT 各电极电荷收集量和敏感区域的变化, 为国产 SiGe HBT 电路开展抗辐射加固提供支持.

2 伪集电极抗辐射加固设计方法

2.1 加固设计原理

当前电子元器件的抗辐射加固研究是按照机理-建模-加固的思路展开, 其中辐射效应机理是指导器件建模和抗辐射加固的基础. 国产 SiGe HBT 在集电极-衬底结 (CS 结) 内及其附近的区域对单粒子效应中电荷收集较为敏感, 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, 因此针对国产 SiGe HBT 单粒子效应的敏感区域和电荷收集机理, SiGe HBT 单粒子效应的设计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. 在电路设计中, 器件之间都留有几个微米的间隔, 利用电路中相邻 SiGe HBT 之间用不上的硅面积引入伪集电极, 伪集电极通过收集电荷有效减少 SiGe HBT 实际集电极的电荷收集量, 且不涉及额外的面积损失和复杂的版图设计. 本文通过在经过校准的 SiGe HBT 三维物理模型版图布局中引入伪集电极, 形成的新 CS 结具有更大的反偏能力, 能够大量的收集单粒子效应产生的电荷, 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.

2.2 伪集电极的版图布局

根据国产 SiGe HBT 的材料结构, 几何结构, 掺杂参数构建合理的 SiGe HBT 三维物理模型, 图 1 是加固前后 SiGe HBT 的三维物理模型外部图, 其中深蓝色部分为 N^+ 埋层引出的各电极, 浅蓝色为浅槽隔离 (STI) 氧化层, STI 氧化层在单粒子效应过程中起到阻隔扩散载流子的作用, 黄色部分为 p 型区域, 包括基区和重掺 p 型环状隔离墙引出的衬底接触, 黑色线条是为了优化模拟计算而划分的网格.

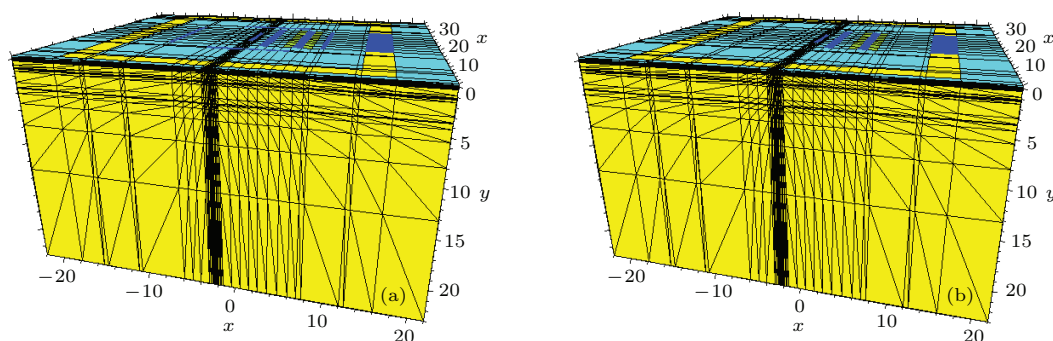


图 1 SiGe HBT 三维物理模型图 (a) 加固前; (b) 加固后

Fig. 1. 3 D view of the entire device: (a) normal; (b) hardened.

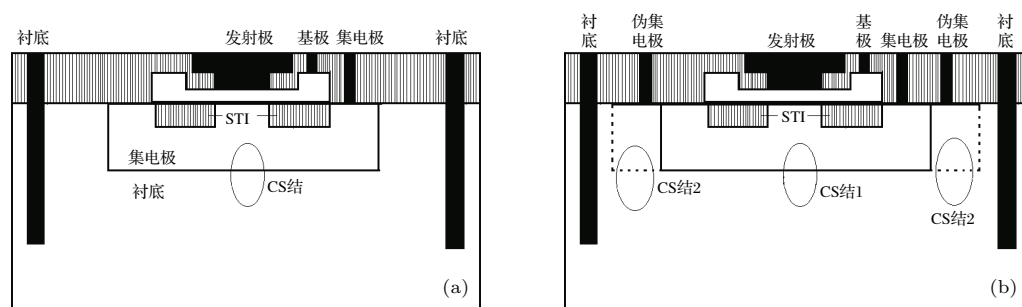


图 2 沿 X-Y 平面截取的内部结构示意图 (a) 加固前; (b) 加固后

Fig. 2. X-Y Cross-section views of the SiGe HBT: (a) normal; (b) hardened.

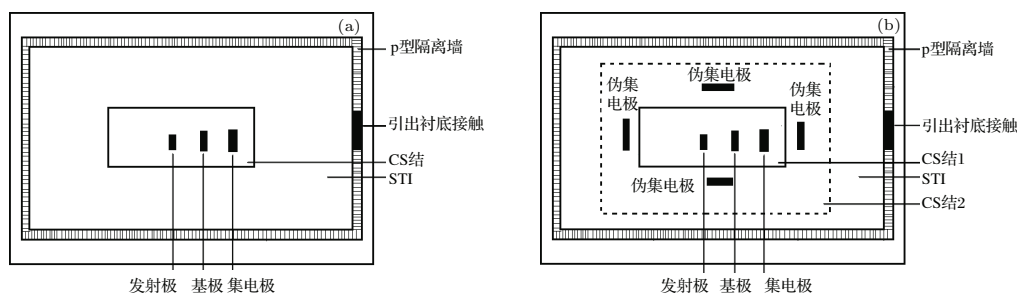


图3 沿X-Z平面截取的内部结构示意图 (a)加固前; (b)加固后

Fig. 3. X-Z Cross-section views of the SiGe HBT: (a) normal; (b) hardened.

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. 图2、图3是SiGe HBT加固前后内部结构二维示意图, 其中图2为沿X-Y平面截取的内部结构示意图, 图3为沿X-Z平面截取的内部结构示意图. 首先延伸器件版图布局中的CS结1至CS结2, 虚线区域所示为延伸后的CS结2, 然后通过N⁺埋层引入伪集电极与CS结2互连, 伪集电极均匀对称的分布在CS结2四周, 形成新的CS结. 如图1(b)所示是加固后SiGe HBT三维物理模型外部图, N⁺埋层引出的深蓝色伪集电极均匀对称的分布在CS结2周围.

3 加固前后单粒子效应仿真模拟及物理机理分析

3.1 加固前后单粒子效应仿真模拟

模拟SiGe HBT单粒子效应时选择衬底接-5 V、其他电极接地(即0偏)的偏置, 在CS结处形成反向外加电场, 增强电子向n区、空穴向p区的漂移运动, CS结处于最大反偏状态, 实现SiGe HBT的最劣偏置. 利用SRIM软件计算不同种类、不同能量的离子LET值随器件深度的变化, 编写成LET文件并嵌入SiGe HBT单粒子效应三维损

伤模型, 模拟不同种类、不同能量离子导致的SiGe HBT单粒子效应.

离子在不同材料中穿透能力不同, 根据离子垂直穿过SiGe HBT的不同区域、不同材料和不同结选取3个典型的离子入射位置开展单粒子效应仿真模拟, 如图4所示, 分别为1) 离子从器件发射极中心入射, 穿过发射极、基极、集电极和衬底; 2) 离子从器件CS结边缘处入射, 穿过氧化层、集电极、衬底; 3) 离子从器件CS结外入射, 穿过氧化层、衬底.

3.2 加固前后关键电学参数性能对比

图5(a)~(g)详细描绘了加固前后离子在器件发射极中心垂直入射后内部电势的变化, 完整模拟出器件内部电势从出现到扩大、加强、深入衬底再到减弱、收缩、恢复, 一系列随时间的变化过程. 离子刚入射器件4 ps时, 沿离子径迹产生大量电子空穴对, 使得沿离子径迹的电势产生畸变; 75 ps时, 电势等高线电位逐渐增高, 高电势逐渐向衬底低电势扩展, 漏斗区域明显; 260 ps时, 随着离子不断深入, 电势在衬底中的范围不断扩大, 漏斗势形成; 4.5 ns时, 沿离子径迹产生的电荷密度减小, 耗尽层开始恢复, 衬底中的电势等高线逐渐收缩, 漏斗势逐渐减弱; 10 ns后, 耗尽层基本恢复, 电势等高线范围缩小, 主要集中在CS结下方.

在单粒子效应过程中, 加固前后SiGe HBT内部电势的变化总趋势是一致的, 但在同一时刻的内部电势有较大差异. 由于引入伪集电极后, SiGe HBT形成了面积更大的反偏CS结, 大量收集在浓度梯度作用下向器件其他部分不断扩散的电荷, 因此电势恢复到原始状态需要较长的时间. 伪集电极通过扩散机理大量收集电荷, 有效的减少了实际集电极的电荷收集量, 使得加固后SiGe HBT的内部电势范围缩小且漏斗势变弱.

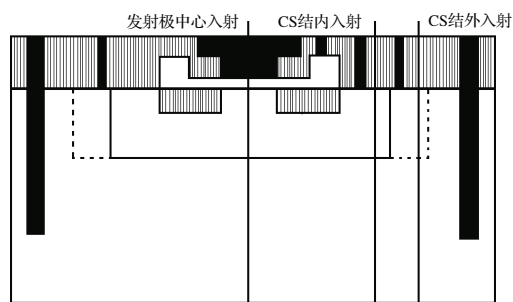


图4 离子的不同入射位置 (a)加固前; (b)加固后

Fig. 4. Different ion incident positions of the SiGe HBT: (a) normal; (b) hardened.

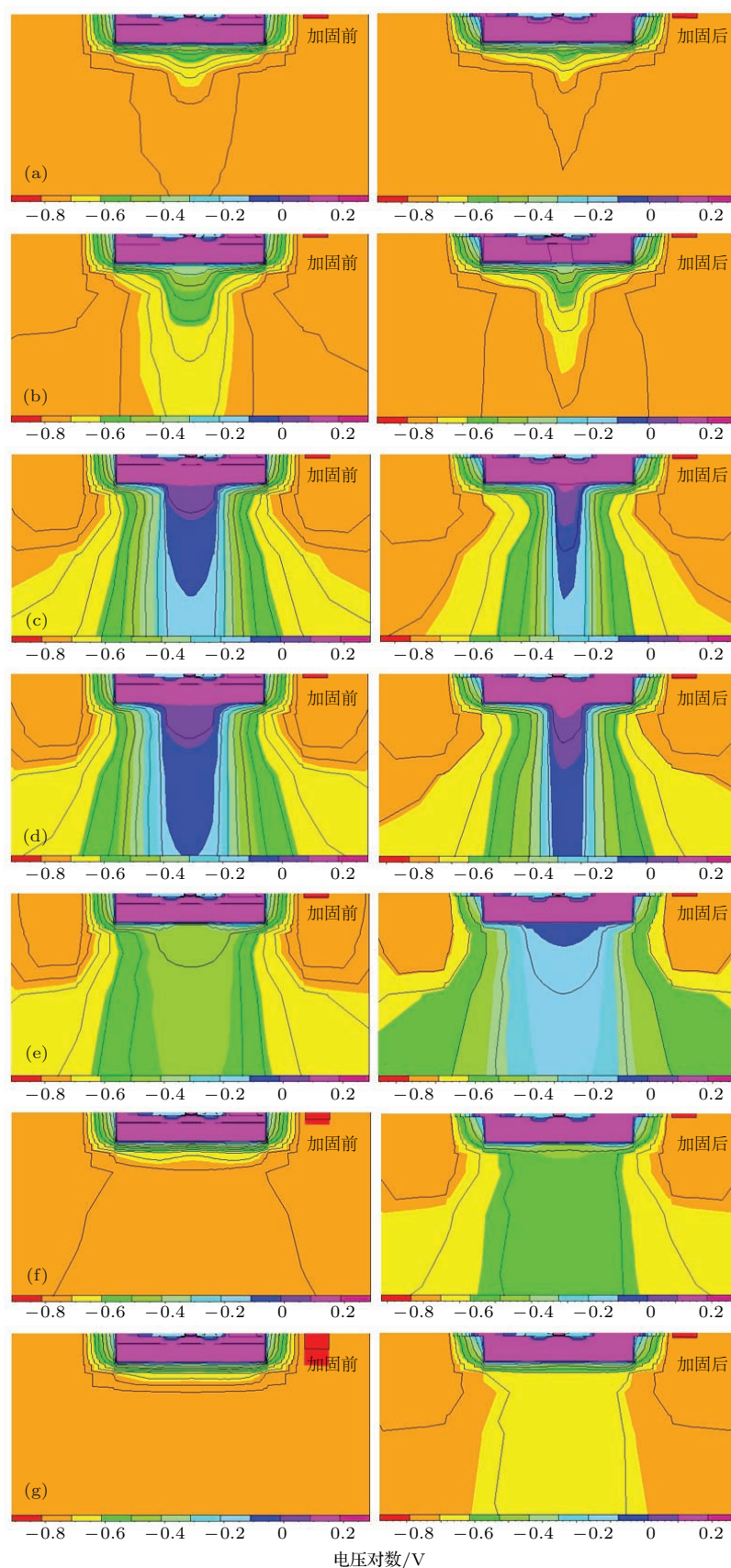


图5 离子沿器件发射极中心入射后不同时刻内部电势的变化 (a) 4 ps; (b) 6 ps; (c) 75 ps; (d) 260 ps; (e) 4.5 ns; (f) 10 ns; (g) 21 ns

Fig. 5. Electrostatic potential as a function of time after an ion strike: (a) 4 ps; (b) 6 ps; (c) 75 ps; (d) 260 ps; (e) 4.5 ns; (f) 10 ns; (g) 21 ns.

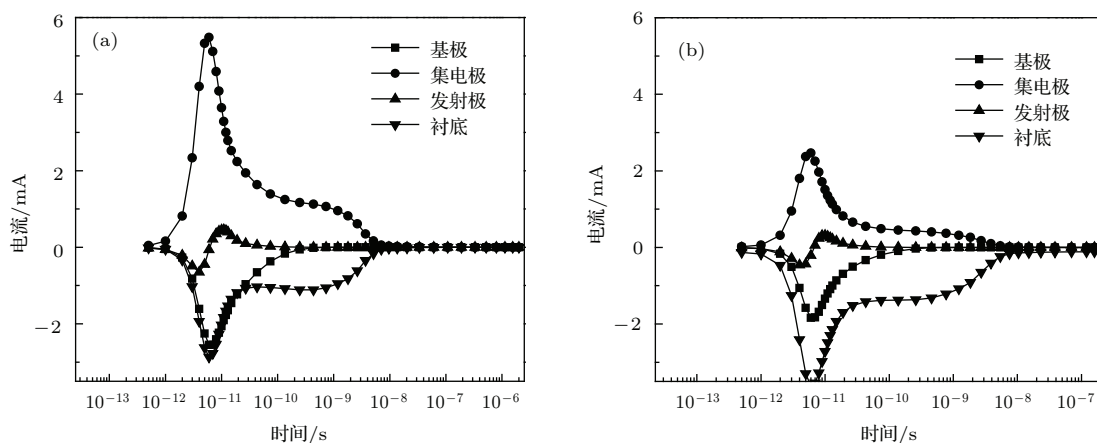


图6 发射极中心垂直入射各电极电流随时间的变化 (a) 加固前; (b) 加固后

Fig. 6. Transient terminal currents as a function of time: (a) normal; (b) hardened.

如图6(a), (b)所示分别是加固前后离子在SiGe HBT发射极中心位置入射各电极电流随时间的变化关系, 加固后SiGe HBT的基极和集电极电流峰值明显减小, 集电极电流峰值由原来的5.48 mA减小至2.46 mA, 基极电流峰值由原来的2.55 mA减小至1.83 mA, 发射极、衬底电流峰值基本保持不变.

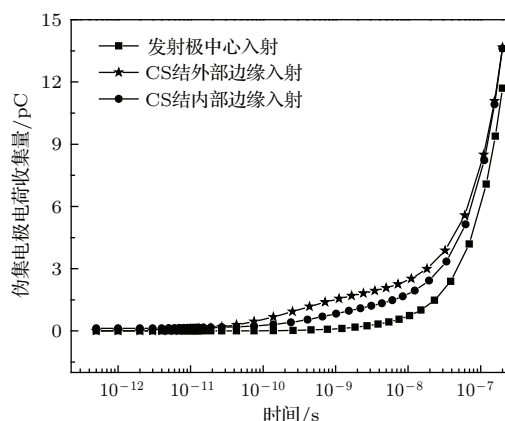


图7 离子在不同位置入射伪集电极电荷收集量随时间的变化

Fig. 7. Dummy collector charge collection as a function of time in different ion incident positions.

如图7所示是伪集电极在离子不同入射位置电荷收集量随时间的变化关系, 伪集电极的电荷收集曲线在漂移段基本保持不变, 当漏斗势消失后, 衬底中的电荷在浓度梯度的作用下开始向器件的其他部分不断扩散, 加固后SiGe HBT形成面积更大的反偏CS结并通过扩散方式大量收集电荷, 使得伪集电极电荷收集曲线在扩散段陡升.

如图8所示是加固前后SiGe HBT在离子不同位置入射集电极电荷收集量随时间的变化关系, 集

电极电荷收集过程可以分为两部分: 漂移段和扩散段, 加固前后SiGe HBT在集电极电荷收集漂移段的电荷收集是大致相同的, 而在扩散段电荷收集差别很大, 加固后的SiGe HBT集电极电荷收集与加固前相比明显减少.

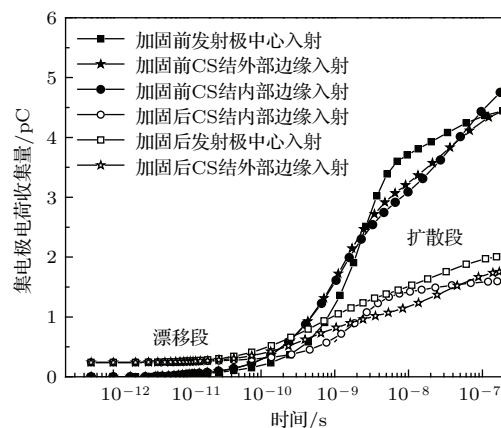


图8 不同离子入射位置集电极电荷收集量随时间的变化

Fig. 8. Collector charge collection as a function of time in different ion incident positions.

3.3 加固前后单粒子效应敏感区域对比

离子分别沿加固前后SiGe HBT表面密集入射, 定位SiGe HBT单粒子效应的敏感区域. 如图9所示是加固前后SiGe HBT集电极电荷收集量随入射位置的变化, 加固前SiGe HBT集电极电荷收集主要集中在CS结区域, 电荷收集在5 pC上下浮动, 加固后SiGe HBT集电极电荷收集敏感区域明显减小, 由原来的CS结宽度缩小为15 μm , 电荷收集降低至2 pC左右.

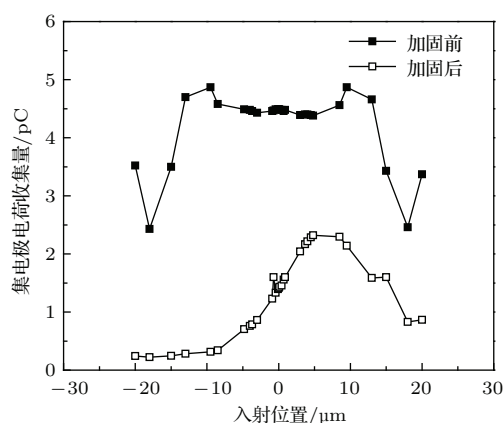


图9 离子沿器件表面密集入射集电极电荷收集量随入射位置的变化

Fig. 9. Collector charge collection in different ion incident positions.

4 结 论

本文根据国产 SiGe HBT 的单粒子效应辐射损伤机理, 通过在器件版图布局中引入伪集电极进行单粒子效应的抗辐射加固, 分别开展加固前后 SiGe HBT 的单粒子效应仿真, 对比加固前后 SiGe HBT 的单粒子响应, 分析伪集电极对电荷收集机理的影响, 验证 SiGe HBT 单粒子效应的设计抗辐射加固效果. 结果表明, 加固后 SiGe HBT 的发射极、基极、集电极电荷收集量都有不同程度的降低, 其中对单粒子效应最敏感的集电极电荷收集量降低最显著, 由原来 5 pC 降至 2 pC; 从电势分布图分析得出: 加固后 SiGe HBT 电势恢复到初始状态需要较长时间, 这是由于伪集电极与衬底形成面积更大的反偏 CS 结, 能够收集更多的扩散电荷以减少实际集电极的电荷收集量, 因此加固后的 SiGe HBT 内部电势范围缩小且漏斗势减弱; 加固后 SiGe HBT 单粒子效应敏感区域面积缩小为加固前的一半, 电荷收集量约为加固前的 40%. 此项工作提出的伪集电极加固方法为 SiGe HBT 电路级单粒子效应抗辐射加固设计提供了技术支撑.

衷心感谢清华大学微电子所提供的技术帮助.

参考文献

- [1] Cressler J D 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1992
- [2] Cressler J D 2005 *Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Santa Barbara, October 9–11, 2005 p248
- [3] Cressler J D, Niu G F 2003 *Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors* (Norwood: Artech House) pp95–182

- [4] Babcock J A, Cressler J D, Vempati L S, Clark S D, Jaeger R C, Hareme D L 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1558
- [5] Lu Y, Cressler J D, Krithivasan R, Li Y, Reed R A, Marshall P W, Polar C, Freeman G, Ahlgren D 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1811
- [6] Sutton A K, Haugerud B M, Prakash A P G, Jun B, Cressler J D, Marshall C J, Marshall P W, Ladbury R, Joseph A J 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2358
- [7] Sutton A K, Prakash A P G, Jun B, Enhai Zhao, Bellini M, Pellish J, Diestelhorst R M, Carts M A, Phan A, Ladbury R, Cressler J D, Marshall P W, Marshall C J, Reed R A, Schrimpf R D, Fleetwood D M 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3166
- [8] Krithivasan R, Niu G F, Cressler J D, Currie S M, Fritz K E, Reed R A, Marshall P W, Riggs P A, Randall B A, Gilbert B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2126
- [9] Krithivasan R, Marshall P W, Nayeem M, Sutton A K, Wei-Min Kuo, Haugerud B M, Najafizadeh L, Cressler J D, Carts M A, Marshall C J, Hansen D L, Jobe K C M, McKay A L, Niu G F, Reed R A, Randall B A, Burfield C A, Lindberg M D, Gilbert B K, Daniel E S 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3400
- [10] Reed R A, Marshall P W, Pickel J C, Carts M A, Fodness B, Niu G F, Fritz K, Vizkelethy G, Dodd P E, Irwin T L, Cressler J D, Krithivasan R, Riggs P A, Prairie J, Randall B A, Gilbert B K, Label K A 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2184
- [11] Sutton A K, Bellini M, Cressler J D, Pellish J A, Reed R A, Marshall P W, Niu G F, Vizkelethy G, Turowski M, Raman A 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2044
- [12] Marshall P W, Carts M A, Campbell A, McMorro D, Buchner S, Stewart Ryan, Randall B, Gilbert Barry, Reed R A 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2669
- [13] Niu G F, Yang H, Varadharajaperumal M, Shi Y, Cressler J D, Krithivasan R, Marshall P W, Reed R A 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2153
- [14] Varadharajaperumal M, Niu G F, Wei X Y, Zhang T, Cressler J D, Reed R A, Marshall P W 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2330
- [15] Varadharajaperumal M 2010 *Ph.D. Dissertation* (Alabama: Auburn University)
- [16] Sutton A K, Bellini M, Cressler J D, Pellish J A, Reed R A, Marshall P W, Niu G f, Vizkelethy G, Turowski M, Raman A 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2044
- [17] Phillips S D, Moen K A, Najafizadeh L, Diestelhorst R M, Sutton A K, Cressler J D, Vizkelethy G, Dodd P E, Marshall P W 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3400
- [18] Zhang T 2009 *MS Dissertation* (Alabama: Auburn University)
- [19] Phillips S D 2012 *Ph.D. Dissertation* (Georgia: Georgia Institute of Technology)
- [20] Zhang J X, Guo H X, Guo Q, Wen L, Cui J W, Xi S B, Wang X, Deng W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 048501 (in Chinese) [张晋新, 郭红霞, 郭旗, 文林, 崔江维, 席善斌, 王信, 邓伟 2013 物理学报 **62** 048501]
- [21] Lai F, Hu G Y 2013 *Microelectronics* **43** 0094 (in Chinese) [赖凡, 胡刚毅 2013 微电子学 **43** 0094]

- [22] Liu Z, Chen S M, Liang B, Liu B W, Zhao Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 064906 (in Chinese) [刘征, 陈书明, 梁斌, 刘必慰, 赵振宇 2010 物理学报 **59** 064906]
 [23] Sun Y B, Fu J, Xu J, Wang Y D, Zhou W, Zhang W,

Cui J, Li G Q, Liu Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 196104 (in Chinese) [孙亚宾, 付军, 许军, 王玉东, 周卫, 张伟, 崔杰, 李高庆, 刘志弘 2013 物理学报 **62** 196104]

Simulation and design of single event effect radiation hardening for SiGe heterojunction bipolar transistor*

Li Pei¹⁾²⁾ Guo Hong-Xia^{1)2)3)†} Guo Qi¹⁾²⁾ Wen Lin¹⁾²⁾ Cui Jiang-Wei¹⁾²⁾
 Wang Xin¹⁾²⁾ Zhang Jin-Xin⁴⁾

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of CAS; Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices; Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry of CAS, 40-1 South Beijing Road, Urumqi 830011, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

4) (Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

(Received 21 September 2014; revised manuscript received 16 January 2015)

Abstract

With the rapid development of satellite, manned space flight and deep space exploration technology, semiconductor devices are used in extreme environments, especially in radiation and low temperature environment. SiGe HBT is a potential candidate for space applications because of its inherent robustness to total ionizing dose (TID) radiation. However, due primarily to charge collection through the collector-substrate (CS) junction and the relatively low substrate doping, SiGe HBTs are vulnerable to single event effects (SEEs) because of new features of process and structure. Thus, the SEE becomes a key factor in restricting space applications of SiGe HBTs. This paper presents an SEE hardening approach that uses a dummy collector to reduce charge collection in the SiGe HBT. The dummy collector is obtained by using the silicon space between adjacent HBTs. It is obtained without any process modification or area penalty. At first, we build simulation models for both normal and hardened SiGe HBTs, and then carry out SEE simulations respectively. The charge collection mechanism is obtained by analyzing the transient current and charge collection changes at different ion incident positions. Unlike the normal HBT, we can see that charge is continuously collected by the dummy CS junction. This causes more charges diffuse outward and the charges available for collector terminal to be reduced. For all ion incident positions, in the case of hardening, the drift components of charge collection are approximately the same, while the diffusion charge collection components are nearly completely compressed. During SEE, the CS junction either directly collects the deposited charges through drift within the potential funnel or indirectly collects charges after they have arrived at the junction after diffusion. The diffusion length of the carriers is on the order of tens of microns or more. Hence a dummy CS junction should be able to reduce the quantity of diffusive charges collected by the HBT collector. The actual charges collected by the collector are effectively reduced. The emitter and base charge collection also decrease by the dummy collector to different extents. Dummy-collector effectively mitigates the SEE of SiGe HBT. The SEE sensitive area of SiGe HBT is also effectively reduced by half. This work is carried out for the SiGe HBT circuit level radiation hardening design of single event effects

Keywords: SiGe heterojunction bipolar transistor, single event effect, hardening design, dummy collector

PACS: 85.30.Pq, 61.80.Az, 73.40.Lq, 61.80.X

DOI: 10.7498/aps.64.118502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274106).

† Corresponding author. E-mail: guohxnint@126.com