

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

张晋新 贺朝会 郭红霞 唐杜 熊涔 李培 王信

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

Zhang Jin-Xin He Chao-Hui Guo Hong-Xia Tang Du Xiong Cen Li Pei Wang Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 63, 248503 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.248503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

偏置条件对 NPN 及 PNP 双极晶体管电离辐射损伤的影响研究

The influence of bias conditions on ionizing radiation damage of NPN and PNP transistors

物理学报.2013, 62(9): 098503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.098503>

# 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\*

张晋新<sup>1)</sup> 贺朝会<sup>1)†</sup> 郭红霞<sup>2)3)</sup> 唐杜<sup>1)</sup> 熊涔<sup>1)</sup> 李培<sup>2)</sup> 王信<sup>2)</sup>

1)(西安交通大学, 西安 710049)

2)(中国科学院新疆理化技术研究所, 中科院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3)(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2014年7月3日收到; 2014年8月21日收到修改稿)

针对国产锗硅异质结双极晶体管 (SiGe HBT), 采用半导体器件三维计算机模拟工具, 建立单粒子效应三维损伤模型, 研究不同偏置状态对 SiGe HBT 单粒子效应的影响. 分析比较不同偏置下重离子入射器件后, 各端口电流瞬变峰值和电荷收集量随时间的变化关系, 获得 SiGe HBT 单粒子效应与偏置的响应关系. 结果表明: 不同端口对单粒子效应响应的最劣偏置不同, 同一端口电荷收集量和瞬变电流峰值的最劣偏置也有所差异. 载流子输运方式变化和外加电场影响是造成这种现象的主要原因.

**关键词:** 锗硅异质结双极晶体管, 不同偏置, 单粒子效应, 三维数值仿真

**PACS:** 85.30.Pq, 61.80.Az, 73.40.Lq, 75.40.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.63.248503

## 1 引言

锗硅异质结双极晶体管 (SiGe HBT) 技术首次实现了硅基能带工程, 使器件同时具备电流增益大、响应频率高的性能优势, 与 Si CMOS 工艺良好的集成性大大降低了其制造成本, 成为目前微电子领域重要的技术应用之一<sup>[1-4]</sup>. 带隙渐变使 SiGe HBT 具有卓越的温度特性, 可承受  $-180-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围的极端温度, 可在深空探测中去掉庞大的保温装置降低发射成本; 同时 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考虑的器件之一<sup>[5-8]</sup>. 研究结果表明, 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失效. 先前报道的单粒子效应电荷收集数值模拟研究发现, 大面积反偏集电极/衬底结 (C/S 结) 是引起 SiGe HBT 单粒子效应

的主要原因, 因此目前多采用衬底接负电压的偏置状态进行仿真研究<sup>[9,10]</sup>. 然而, 晶体管实际应用中, 多种偏置都可能形成反偏 C/S 结, 但不同偏置对 SiGe HBT 单粒子效应影响的相关研究鲜有报道. 另一方面, 我国对 SiGe HBT 的研究起步较晚, 国产 SiGe HBT 器件单粒子效应损伤研究尚未形成完善的体系, 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 (TCAD) 研究偏置对 SiGe HBT 单粒子效应的影响, 可为国产 SiGe HBT 的空间实际应用提供理论基础.

本文针对国产 SiGe HBT 器件进行单粒子效应三维数值仿真模拟. 以实际器件结构和电学参数实验测试数据为基础, 构建合理的器件结构模型; 在不同偏置状态下进行重离子入射 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, 探讨偏置对 SiGe HBT 单粒子效应的影响因素, 结果表现出一些新的有趣现象.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61274106, 11175138) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hechaohui@mail.xjtu.edu.cn

## 2 器件结构三维仿真建模

研究对象是清华大学研发的SiGe HBT器件,其结构与体硅npn垂直型双极晶体管(Si BJT)类似. 区别在于基区由组分渐变的SiGe构成,引入的Ge含量从发射极/基极结(E/B结)和基极/集电极结(B/C结)处的0%向基区中央缓慢变化至20%,形成缓变质结. 基区厚度约为0.08 μm,掺杂浓度为 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,基区电阻有效减小,器件频率和电流增益同时提高. 基区外部集电极内采用浅槽隔离(STI)形成有源区,隔离氧化层上采用双多晶硅自对准工艺外延一层多晶硅掺硼掺锗引出基区接触. 集电区面积为 $18 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,掺杂浓度较低,用重掺杂的 $n^+$ 埋层引出集电区接触<sup>[11-13]</sup>. 发射区使用多晶硅制造,在顶部引出发射区接触,发射区面积为 $1.2 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ . 在接近器件边缘处,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. 器件整体尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m} \times 21.35 \mu\text{m}$ . 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是器件三维结构在z轴中心处的内部结构仿真剖面图.

为使仿真模型更接近真实器件工艺,采用实际测试获得的器件电学特性曲线对仿真模型进行校准,通过调整器件模型中结区附近的掺杂分布,最终得到较为合理的器件三维结构模型<sup>[14,15]</sup>. 本文选取双极晶体管最重要的电学参数Gummel特性曲线作为校准参数. 图2对比了TCAD仿真与半导体参数测试仪 KETHLEY4200测试得到Gummel特性,可以看出,二者符合得较好,表明构建的SiGe HBT结构仿真模型可较准确地反映实际器件情况.

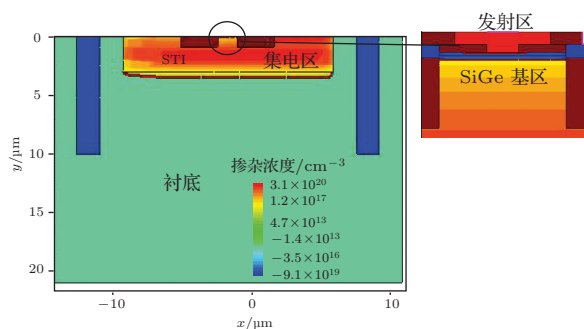


图1 (网刊彩色) 器件内部结构二维剖面图

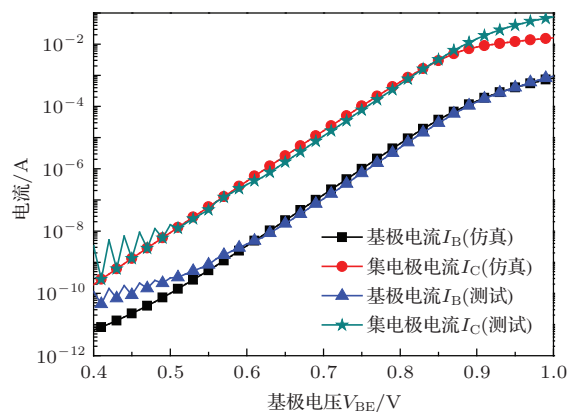


图2 (网刊彩色) 对比仿真与测试的Gummel特性曲线

## 3 单粒子效应三维数值仿真

离子入射器件结构内部,沿其径迹电离产生大量电子空穴对,使耗尽层内的电势发生畸变,向衬底方向形成漏斗势. 载流子在漏斗电场及浓度梯度作用下先后通过漂移和扩散机制快速被各端口收集,这种电荷的大量收集还会在短时间(几纳秒)内引起各端口电流发生变化. 因此,探讨器件内部在每一瞬时的载流子变化情况是单粒子效应仿真中重点关注的方面,我们采用TCAD工具对上节构建的SiGe HBT器件模型进行单粒子效应瞬态仿真. 仿真中,每一瞬时重离子引起的载流子生成率是计算的关键,在离子入射初始时间之前的电子空穴对数量会在仿真开始时添加至载流子密度中,离子入射后载流子生成率由(1)式给出,

$$G(l, w, t) = G_{\text{LET}}(l)R(w, l)T(t), \quad (1)$$

式中,  $R(w, l)$  和  $T(t)$  分别代表载流子生成率随空间和时间变化的函数. 其中载流子随时间的变化为高斯分布,即  $T(t)$  可由(2)式表示. 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,(3)式是  $R(w, l)$  的函数表示.  $G_{\text{LET}}(l)$  为线性能量传递(LET)的生成密度,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得出<sup>[16-19]</sup>.

$$T(t) = \frac{2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\sqrt{2} \cdot s_{\text{hi}}}\right)^2\right)}{\sqrt{2} \cdot s_{\text{hi}} \sqrt{\pi} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t_0}{\sqrt{2} \cdot s_{\text{hi}}}\right)\right)}, \quad (2)$$

$$R(w, l) = \exp\left(-\left(\frac{w}{w_t(l)}\right)^2\right), \quad (3)$$

式中  $t_0$  是重离子进入器件的时刻,  $s_{hi}$  是高斯特征值,  $w$  是到离子径迹的垂直距离,  $w_t(l)$  为特征长度.

重离子从器件表面发射极中心处入射. 根据 (1)–(3) 式, 电荷沉积量选取  $0.2 \text{ pC}/\mu\text{m}$ , 相当于 LET 值为  $20 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ , 离子入射径迹使用高斯波形,  $1/e$  特征时间 ( $s_{hi}$ ) 范围是  $2 \text{ ps}$ ,  $1/e$  特征半径 ( $w_t(l)$ ) 为  $0.2 \mu\text{m}$ , 高斯峰值是  $5 \text{ ps}$ . 仿真模拟的物理模型选择了 Philips 统一迁移率模型、SRH 复合模型、Auger 复合模型、速率饱和模型和禁带变窄模型. 嵌入上述物理模型, 代入 (1) 式计算出的载流子生成率, 求解泊松方程和连续性方程, 从而获得电流和电荷收集随时间的变化关系.

大面积 C/S 结反偏增强了漏斗效应, 造成 SiGe HBT 对单粒子效应敏感. 为比较不同偏置状态对 SiGe HBT 单粒子效应的影响, 同时考虑双极器件在电路中的实际应用, 本文在单粒子效应仿真中选取正向偏置 (Positive: Base = +1.2 V, Collector = +3 V)、截止偏置 (Off: Emitter =

+3 V, Collector = +3 V)、集电极正偏 (Collector = +3 V) 以及衬底反偏 (Substrate = -3 V) 四种会形成反偏 C/S 结的工作偏置.

## 4 偏置对单粒子效应的影响研究

### 4.1 不同偏置仿真结果

重离子入射 SiGe HBT 敏感区域, 穿过其反偏 C/S 结, 电离的大量载流子通过漂移和扩散机制被各端口收集, 当电荷收集量超过临界电荷值, 引起相关电路逻辑状态改变, 诱发单粒子翻转效应. 另一方面, 电子空穴对在漏斗电场作用下快速输运形成电流, 各端口电流发生瞬变, 瞬变电流脉冲会对后续电路造成扰动. 因此, 各端口的电荷收集量和瞬态电流变化量是本文研究 SiGe HBT 单粒子效应重点讨论的两方面. 图 3—图 6 给出四种不同偏置下各端口电流和电荷收集随时间的变化关系.

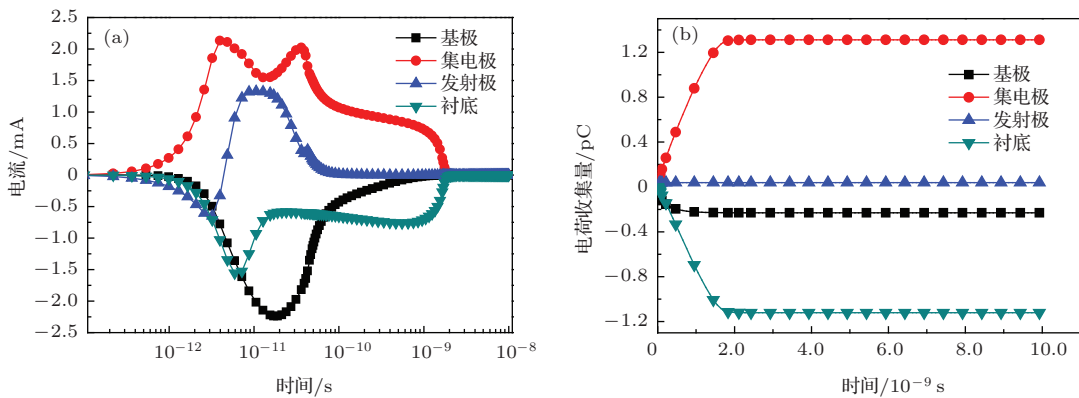


图 3 (网刊彩色) 衬底反偏 (Substrate = -3 V) 的仿真结果 (a) 各端电流随时间的变化; (b) 各端总电荷收集量随时间的变化

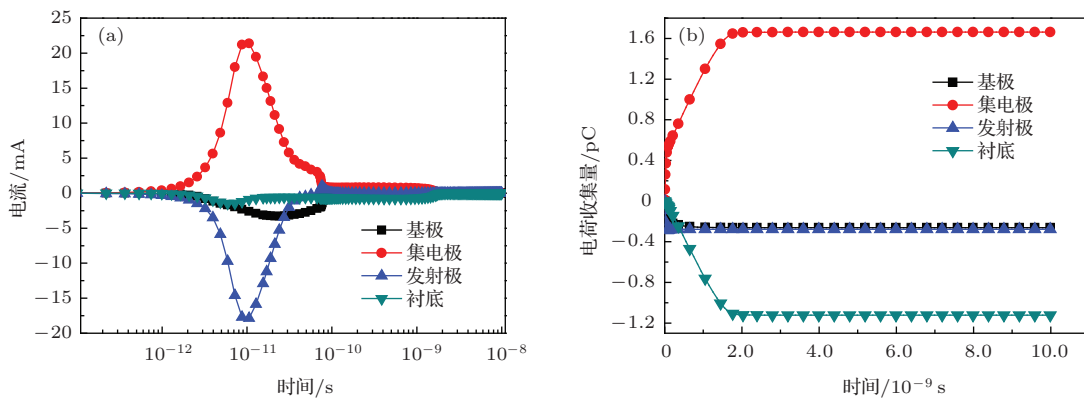


图 4 (网刊彩色) 集电极正偏 (Collector = 3 V) 的仿真结果 (a) 各端电流随时间的变化; (b) 各端总电荷收集量随时间的变化



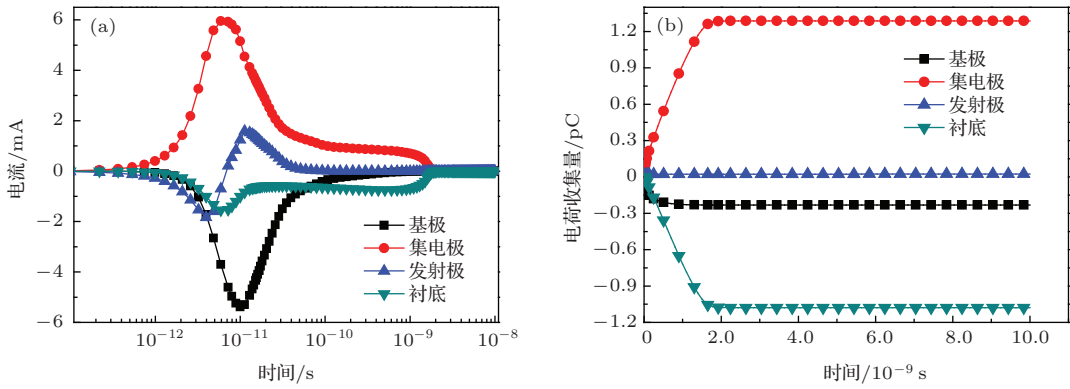


图5 (网刊彩色) 截止偏置的仿真结果 (a) 各端电流随时间的变化; (b) 各端总电荷收集量随时间的变化

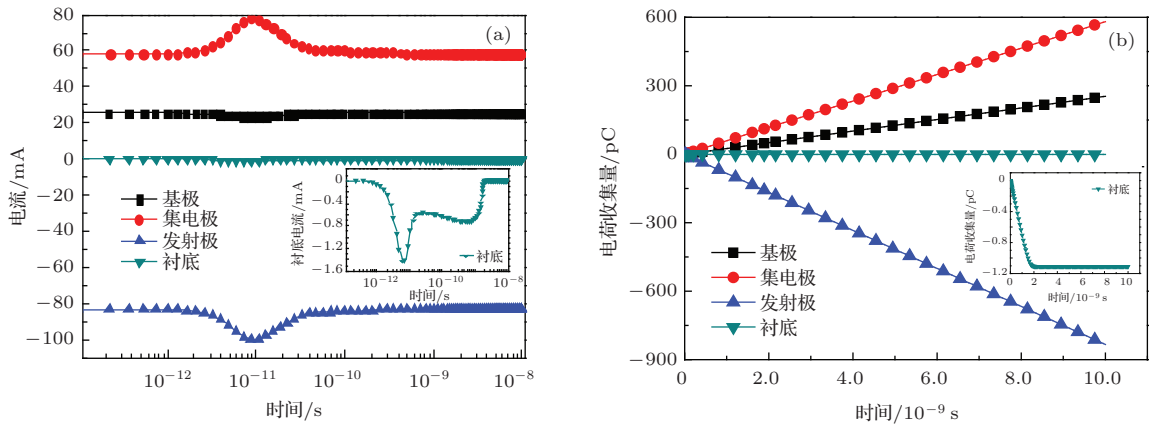


图6 (网刊彩色) 正向偏置的仿真结果 (a) 各端电流随时间的变化; (b) 各端总电荷收集量随时间的变化

由图可知, 衬底反偏和截止偏置下发射极和集电极收集电子, 基极和衬底收集空穴; 集电极正偏下集电极收集电子, 发射极、基极和衬底收集空穴; 正向偏置下基极和集电极收集电子, 发射极和衬底收集空穴. 引起这种差异的原因在于离子入射器件敏感区域, 电离产生电子空穴对, 电子由正电压区收集, 空穴则流向低电位方向, 不同偏置状态的器件内部电场方向和载流子输运方式不同, 造成单粒子效应响应不同. 图7(a)—(d)分别给出四种偏置下, 离子入射10 ps时SiGe HBT器件内局部的电势分布图.

从图7(a)可看出, 对于衬底反偏, C/S结形成由集电区指向衬底的外加电场, 离子入射在此处引起较强漏斗势, E/B结和B/C结处没有外加电压, 只形成从n指向p的弱内建电势(等势线变化不明显), 因此图3(a)中发射极和基极电流在弱电场扩散作用下, 瞬变趋势较平缓; 截止偏置发射极和集电极端接正电压, 形成发射区指向基区、集电区指向基区和集电区指向衬底的三个外加电场, 图7(c)

表明E/B结、C/B结和C/S结处都存在较强电势变化, 漂移作用下, 发射极和基极电流瞬变迅速, 波峰的脉宽较窄(如图5(a)); 外加电场和内建电势的共同作用使这两种偏置下电子和空穴分别被n区和p区收集. 集电极正偏在C/B结处形成强外加电场, 薄基区中其影响远超过E/B结处内建电场, 引起E/B结耗尽层电势扰动(如图7(b)), 造成空穴向基区输运并最终漂移扩散至发射区被收集. 正向偏置是双极晶体管电流正向放大的模式, 发射极、基极和集电极电流本身较大, 约为 $10^{-2}$ — $10^{-1}$  A, 单粒子效应诱发的电流瞬变量大约为 $10^{-2}$  A, 与晶体管自身电流处于同一数量级, 可认为离子入射引起的电流变化对器件影响不大; 器件内电势变化如图7(d)所示, 电荷在正向放大输运状态下, 电子向集电极流动, 造成集电极和基极收集电子, 空穴反向放大, 发射极收集空穴, 且各个端口收集的电荷量随时间增加; 只有衬底有较明显的电流瞬变和空穴收集(如图6), 因此正向偏置对SiGe HBT单粒子效应不敏感.

### 4.2 最劣偏置分析

从上述仿真结果可以看出, 四种偏置虽都在 SiGe HBT 内部形成反偏 C/S 结, 但各端口电流瞬变趋势和电荷收集情况却有很大差异. 为深入探讨不同区域单粒子效应的最劣偏置, 表 1 和

表 2 分别给出离子入射  $10^{-8}$  s 后不同偏置状态下各端口最终的电荷收集量和瞬变电流变化量 ( $\Delta I = I_{\text{peak}} - I_0$ ). 在前面的分析中, 我们发现 SiGe HBT 在正向偏置下单粒子效应并不显著, 因此这里没有列出正向偏置的计算结果.

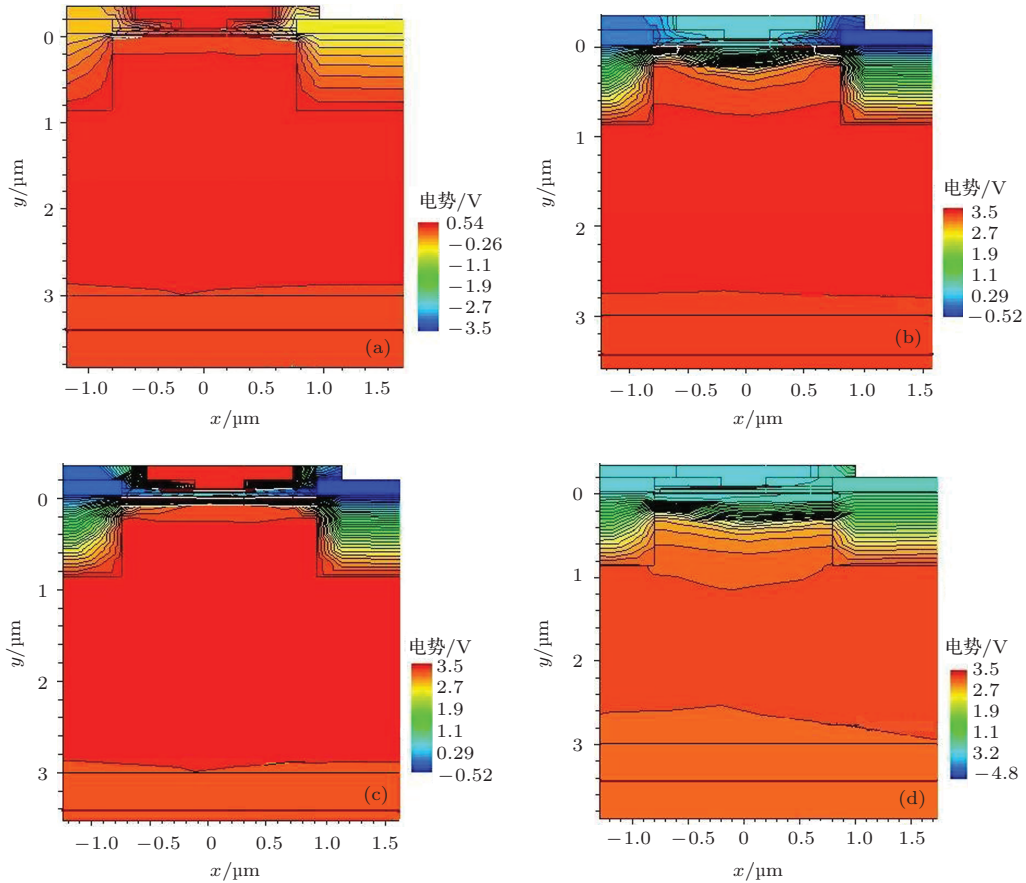


图 7 (网刊彩色) 不同偏置下离子入射 10 ps 时 SiGe HBT 器件内部电势分布 (a) 衬底反偏; (b) 集电极正偏; (c) 截止偏置; (d) 正向偏置

表 1 不同偏置下各端口最终的电荷收集量

偏置	各端收集的电荷/ $10^{-12}$ C			
	基极	集电极	发射极	衬底
集电极正偏: Collector = +3 V	-0.2620	1.6600	-0.2780	-1.1217
衬底反偏: Substrate = -3 V	-0.2300	1.3100	0.0391	-1.1203
截止偏置: Emitter = +3 V Collector = +3 V	-0.2330	1.2900	0.0234	-1.0800

表 2 不同偏置下各端口瞬变电流变化量

偏置	电流瞬变量 $\Delta I$ /A			
	基极	集电极	发射极	衬底
集电极正偏: Collector = +3 V	0.00328	0.02138	0.01785(空穴)	0.00148
衬底反偏: Substrate = -3 V	0.00224	0.00213	0.00133	0.00156
截止偏置: Emitter = +3 V Collector = +3 V	0.00539	0.00593	0.00159	0.00155

根据表中数据发现,不同端口对单粒子效应响应的最劣偏置不同,同一端口电流瞬变和电荷收集量的最劣偏置也有所差异.原因在于不同偏置状态下,各pn结处形成的电场不同,引起器件内部能带发生不同变化,对电子空穴对的输运产生不同影响.上述三种偏置状态的器件内部能带如图8所示.

根据能带变化对每个端口单粒子效应响应情况分析如下:

1) 发射极

① 电荷收集量: 衬底反偏 > 截止偏置 (收集电子); 集电极正偏 (收集空穴)

衬底反偏和截止偏置下,发射极收集电子,数量约为 $10^{-14}$  C,可忽略不计.晶体管的截止偏置旨在阻止内部载流子的流动,形成器件关断状态,此时电子空穴对输运较慢,电荷收集量略小于衬底反偏.发射极在集电极正偏时收集空穴,BC结处形成的较强外加电场,使基区对空穴形成势阱,空穴向基区输运并扩散至发射区,造成部分空穴在发射极被收集.

② 电流瞬变量  $\Delta I$ : 截止偏置 > 衬底反偏; 集电极正偏 (空穴电流)

与电荷收集量相反,截止偏置下发射极的电流瞬变值大于衬底反偏,这是由于截止偏置在E/B结处形成外加电场(图8(c)),较强外加电场对离子入射诱发的电子空穴产生迅速的漂移作用,瞬时内发射区单位面积通过的电荷略多,形成的电流瞬变较大;而衬底反偏,发射极电流变化是由缓慢的扩散作用所引起,单位时间内电流密度相对较小.集电极正偏,发射极收集少量空穴,其电流以空穴电流为主.

2) 基极

① 电荷收集量: 集电极正偏 > 截止偏置 > 衬底反偏

集电极正偏和截止偏置都在B/C结处形成外加反偏电场,此时基区成为利于空穴向其输运的势阱(图8(b), (c)),离子入射穿过B/C结,诱发的部

分空穴在外加电场作用下漂移至基区,造成基极空穴收集较多;另一方面,与发射极分析类似,截止偏置下载流子输运受阻,基极电荷收集略少于集电极正偏.衬底反偏没有在E/B结和B/C结处添加外加电场造成能带变化(图8(a)),单粒子效应产生的电子空穴对只通过扩散作用在晶体管自身能带作用下自然向p区和n区流动,空穴收集量相对较少.

② 电流瞬变量  $\Delta I$ : 截止偏置 > 集电极正偏 > 衬底反偏

截止偏置的电流瞬变量比集电极正偏大2 mA,原因是截止偏置在E/B结与B/C结处都形成3 V的外加电场,如图8(c)所示,两个电场同时加剧了离子入射在pn结耗尽层内形成的畸变漏斗势,本文研究的SiGe HBT基区非常薄,漏斗效应对整个基区产生了较大影响,极短时间内漂移作用引起电流发生大的瞬变脉冲.而集电极正偏只在B/C结处有外加电场,瞬变电流略小于截止偏置.衬底反偏的外加电场对基区没有影响,基极电流主要由扩散空穴电流组成,瞬变量相对较小.

3) 集电极

① 电荷收集量: 集电极正偏 > 衬底反偏 > 截止偏置

对比表1中集电极数据发现,集电极正偏比另外两种偏置的电荷收集量约多0.4 pC,主要原因在于集电极接正向电压使B/C结和C/S结同时形成反偏pn结,此时集电区成为电子势阱,如图8(b)所示,电子在两个外加电场作用下有利于向集电区漂移扩散,造成集电极电荷收集量增多.衬底反偏只在C/S结处形成反偏(图8(a)),集电极的电荷收集主要取决于大面积C/S结处的漏斗效应.截止偏置在集电区处能带变化与集电极正偏的相似,但电荷收集量最少:一方面截止偏置使载流子输运受阻,另一方面截止偏置在E/B结处也形成反偏pn结,离子入射后率先穿过E/B结,产生的电子空穴对在E/B结处电场的影下不利于向集电极输运.

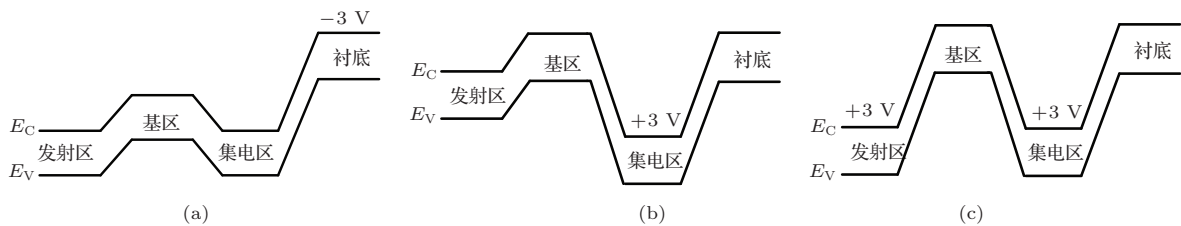


图8 不同偏置下器件内部能带示意图 (a) 衬底反偏; (b) 集电极正偏; (c) 截止偏置

② 电流瞬变量  $\Delta I$ : 集电极正偏 > 截止偏置 > 衬底反偏

从表 2 数据中可以看出, 集电极正偏下, 集电极电流瞬变量比其他偏置大一个数量级, 离子入射对 B/C 结和 C/S 结处的两个较大的反偏电场都产生了很大扰动, 电势线在集电区两端的耗尽层内发生较严重的漏斗效应, 造成电流瞬变量大大增加. 截止偏置虽也形成了两个相同的反偏电场, 但截止偏置抑制载流子输运, 电流形成受到影响. 衬底反偏只在 C/S 结形成反偏电场, 电流主要由 C/S 结两侧的漂移扩散电流组成, 电流瞬变量最小.

#### 4) 衬底

① 电荷收集量: 衬底反偏  $\approx$  集电极正偏 > 截止偏置

集电极正偏和衬底反偏下, C/S 结处于反偏, 且没有其他外加电场的干扰, 衬底收集空穴最多. 截止偏置下, 载流子输运受阻, 另外离子入射先穿过 C/B 结, 诱发的空穴在 C/B 结反偏作用下部分向基区输运, 衬底空穴收集较少. 由图 6 可知, 离子在正向偏置下入射穿过 C/S 结, 衬底发生较大的电流瞬变和电荷收集, 但其收集量略小于前两种偏置, 原因是正向偏置有利于电子电流从发射区向集电区放大, 同时造成空穴电流反向放大, 部分空穴向发射区的输运造成衬底电荷收集有所减少.

② 电流瞬变量  $\Delta I$ : 衬底反偏  $\approx$  集电极正偏  $\approx$  截止偏置

衬底反偏、集电极正偏和截止三种偏置在 C/S 结处对衬底的外加电场相同, 引起的电流瞬变相近.

综上所述, 衬底反偏是发射极和衬底电荷收集的最劣偏置; 集电极正偏是基极、集电极和衬底电荷收集, 以及集电极电流瞬变的最劣偏置; 截止偏置则对发射极和基极的电流瞬变影响最大.

## 5 结 论

本文采用 TCAD 工具研究不同偏置对国产 SiGe HBT 单粒子效应的影响. 仿真结果表明, 工作于不同偏置状态下的 SiGe HBT, 离子入射后其电流瞬变情况和电荷收集极性不同, 且不同端口对单粒子效应响应的最劣偏置不同, 同一端口电荷收集量和瞬变电流峰值的最劣偏置也有所差异. 单粒子效应引起的电荷收集是漂移和扩散共同作用的结果, 不同偏置引起的器件内部能带变化对电子和

空穴形成不同的势垒或势阱, 造成载流子输运方向和速度不同, 因此不同端口电荷收集情况取决于电荷输运的长期过程. 电流瞬变发生在离子入射几皮秒内, 主要受漂移作用影响, 外加电场加剧漏斗势畸变, 形成较大瞬变电流, pn 结处的外加电场则是电流瞬变的主要影响因素. 研究结果为国产 SiGe HBT 的空间应用, 以及进一步的单粒子效应实验验证提供了理论基础.

衷心感谢清华大学微电子所对本文提供的技术帮助.

## 参考文献

- [1] Marshall P W, Carts M A, Campbell A 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2669
- [2] Cressler J D 2005 *Proc. IEEE* **93** 1559
- [3] Cressler J D 2010 *NASA NEPP Electronics Technology Workshop*
- [4] Cressler J D, Niu G F 2003 *Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors* (1st Ed.) (Boston London: Artech House) p20
- [5] Diestelhorst R M 2009 *M. S. Dissertation* (Georgia: Georgia Institute of Technology)
- [6] Chai C C, Ma Z Y, Ren X R, Yang Y T, Zhao Y B, Xin H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 068502
- [7] Guo Y, Chen J J, He Y B, Liang B, Liu B W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 046103
- [8] Sutton A K, Prakash A P G, Jun B, et al. 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3166
- [9] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B, Song K, Zhao Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098502
- [10] Bellini M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Georgia: Georgia Institute of Technology)
- [11] Hu H Y, Shu J, Zhang H M, Song J J, Xuan R X, Qin S S, Qu J T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017303 (in Chinese) [胡辉勇, 舒钰, 张鹤鸣, 宋建军, 宣荣喜, 秦珊珊, 屈江涛 2011 物理学报 **60** 017303]
- [12] Zhao X, Zhang W R, Jin D Y, Fu Q, Chen L, Xie H Y, Zhang Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134401 (in Chinese) [赵昕, 张万荣, 金冬月, 付强, 陈亮, 谢红云, 张瑜洁 2012 物理学报 **61** 134401]
- [13] Akil K S 2005 *Ph. D. Dissertation* (Georgia: Georgia Institute of Technology)
- [14] 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]
- [15] Zhang J X, Guo H X, Wen L, Guo Q, Cui J W, Wang X, Deng W, Zhen Q W, Fan X, Xiao Y 2014 *J. Semicond.* **35** 044354
- [16] Varadharajaperumal M 2010 *Ph. D. Dissertation* (Alabama: Auburn University)
- [17] Xu Z Y, Niu G F, Luo L, Cressler J D, Alles M L, Reed R A, Mantooth H A, Holmes J, Marshall P W 2010 *IEEE Tran. Nucl. Sci.* **57** 3206



[18] Liang B, Chen S M, Liu B W 2008 *J. Semiconductors* **29** 1692

[19] Dodd P E, Massengill L W 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 583

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

Zhang Jin-Xin<sup>1)</sup> He Chao-Hui<sup>1)†</sup> Guo Hong-Xia<sup>2)3)</sup> Tang Du<sup>1)</sup>  
Xiong Cen<sup>1)</sup> Li Pei<sup>2)</sup> Wang Xin<sup>2)</sup>

1) (Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

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

( Received 3 July 2014; revised manuscript received 21 August 2014 )

## Abstract

In this paper we establish a three-dimensional (3D) numerical simulation model of domestic SiGe heterojunction bipolar transistor (SiGe HBT) by using technology computer aided design tools, to study the bias effect on single event effect (SEE) of SiGe HBT. The response relationship between SEE and the bias of SiGe HBT is identified based on the analyses of transient current peak and charge collection of each terminal. The results show that the worst biases for SEE are different for different terminals. Even for the same terminal, the worst biases for charge collection and transient current peak are different. This phenomenon is caused mainly by the influence of applied electric field and the change of carrier transport mode.

**Keywords:** SiGe heterojunction bipolar transistor, different bias, single event effect, 3D numerical simulation

**PACS:** 85.30.Pq, 61.80.Az, 73.40.Lq, 75.40.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.63.248503

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61274106, 11175138).

† Corresponding author. E-mail: [hechaohui@mail.xjtu.edu.cn](mailto:hechaohui@mail.xjtu.edu.cn)