

基于锗硅异质结双极晶体管的低噪声放大器 及其反模结构的单粒子瞬态数值仿真研究

黄馨雨¹⁾ 张晋新^{1)†} 王信²⁾ 吕玲¹⁾ 郭红霞²⁾³⁾

冯娟¹⁾ 闫允一¹⁾ 王辉¹⁾ 戚钧翔¹⁾

1) (西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710049)

2) (中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

3) (西北核技术研究院, 西安 710024)

(2024 年 2 月 29 日收到; 2024 年 4 月 19 日收到修改稿)

针对锗硅异质结双极晶体管 (SiGe HBT) 进行 TCAD 仿真建模, 基于 SiGe HBT 器件模型搭建低噪放大器 (LNA) 电路, 开展单粒子瞬态 (SET) 的混合仿真, 研究 SET 脉冲随离子不同 LET 值、入射角度的变化规律. 结果表明: 随着入射离子 LET 值的增大, LNA 端口的 SET 脉冲的幅值增大, 振荡时间延长; 随着离子入射角的增大, LNA 端口的 SET 脉冲的幅值先增大后减小, 振荡时间减小. 使用反模 (IM) 共射共基结构 (Cascode) 降低 LNA 对单粒子效应的敏感度, 验证了采用 IM 结构的 LNA 电路的相关射频性能. 针对离子于共基极 (CB) 晶体管、共发射极 (CE) 晶体管两种位置入射进行 SET 实验. 实验结果与本研究中的正向模式相比, IM Cascode 结构的 LNA 电路的瞬态电流持续时间明显减少, 并且峰值减小了 66% 及以上.

关键词: 锗硅异质结双极晶体管, 单粒子效应, 反模, 混合仿真

PACS: 61.80.Az, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.73.20240307

1 引言

硅 (Si) 是在半导体工业中占据绝对优势的材料. Si 材料易形成绝缘膜 (SiO_2 以及 SiN_4) 的优良特性便于实现廉价集成电路工艺, 使得 Si 器件在微电子技术中的应用率非常高, 但 Si 材料载流子的迁移率和饱和漂移速度较低, 及其能带结构间接跃迁的特性^[1], 限制了 Si 材料的进一步发展. 因此, 在目前高频、低噪声、高要求的模拟电子电路的领域, 例如: 射频 (RF) 电路、低噪放大器 (LNA) 和功率放大器 (PA) 等, 通常使用化合物半导体材料如 GaAs, InP 等提升性能. IBM 的 Meyerson^[2] 发明的 UHV/CVD 技术, 通过在成熟廉价的 Si 工艺

中引入少量的 Ge 来制造 SiGe 材料, 可实现更高的开关速度、更低的成本、功耗以及噪声系数等优势, 并且与 Si 具有更好的兼容性.

锗硅异质结双极晶体管 (SiGe HBT) 通过加入 Ge 降低 Si 的禁带宽度, 对于 NPN 型晶体管, 能带结构的调整使得少数载流子的势垒降低, 可以抑制空穴从 SiGe 区到 Si 区的注入, 提升少数载流子在基区的渡越能力, 从而提高 SiGe 异质结电子注入的速度^[3,4]. 当其他条件的影响导致晶体管放大系数降低时, 可通过调整 Ge 的组分, 实现高频低噪声的 RF 电路的设计.

SiGe HBT 因其高频率、高线性度、低功耗、低噪声系数以及 CMOS 工艺的高兼容性等优势, 被广泛地应用于 RF 电路的设计^[5]. 其中, LNA 作

† 通信作者. E-mail: jxzhang@xidian.edu.cn

为接收机链路的第一级有源电路, 极大程度地影响整个接收电路^[6]. 利用 SiGe 工艺的性质: 即更高的截止频率、更好的低噪性能以及 CMOS 工艺的高兼容性, 使用 SiGe 工艺设计 LNA 有极大的研究前景, 但是 SiGe HBT 对单粒子效应非常敏感, 具有较低的单粒子效应的临界阈值和较高的翻转截面积^[7], 空间粒子入射易造成其相关电路失效. 通过对 SiGe HBT 的反向模式 (inverse mode, IM) 结构进行探究, 在实验中采用 IM 结构作为对设计的 LNA 电路进行抗辐射加固的方式 (RHBD)^[8]. 在 RF LNA 的设计中, 处于有源增益级的 SiGe HBT 需要提供合理的功率增益和良好的噪声系数, 以保证 RF 接收器的正常工作. 在 SiGe 8HP 工艺之前, 对 RF SiGe 电路中的辐射效应的探究都是使用传统正向模式 (FM). 考虑到之前 SiGe 工艺不是十分合理的 Ge 组分变化以及较大的寄生现象导致采用 IM 结构的 SiGe HBT 的电流增益与高频性能下降的情况^[9], IM SiGe HBT 只能作为非关键晶体管使用在一些偏置电路、无源电路等结构中^[10], 以确保 IM 结构导致的 SiGe HBT RF 性能的下降不会对其电路性能造成影响. 随着 SiGe HBT 特征工艺的不断减小, IM 结构的 SiGe HBT 的单位增益频率 (f_T) 以及最高振荡频率 (f_{MAX}) 都得到了明显的改善, 可以达到几十 GHz 以上. 因此, 性能提升的 IM 结构的 SiGe HBT 具有应用于微电子电路的有源增益级的潜在能力, 为 IM 结构改善 RF 电路 SET 敏感性提供了可行性^[11].

本文在 Sentaurus TCAD 平台上搭建 SiGe HBT 模型, 并基于该模型设计一个 X 波段的 LNA 电路, 该放大器采用共射共基 (Cascode) 结构作为其有源增益. 对该放大器展开单粒子瞬态混合仿真, 探究 LNA 电路端口及电路中器件产生的 SET 脉冲随离子入射 CB 晶体管时, 根据离子 LET 值、入射角度等影响因素的变化规律. 然后采用 IM 结构研究 LNA 电路的单粒子瞬态响应, 在 ADS 平台验证 IM 结构对建立起的 LNA 电路的性能影响, 对比分析其可行性. 对比 IM, FM 两种模式结构的 LNA 电路性能, 以及入射 CB, CE 两种情况下, 对采用 FM 结构、IM 结构的 LNA 电路的输出端口瞬态电流变化情况进行探究、分析和总结.

2 SiGe HBT LNA 搭建

LNA 是接收机的重要组成部分, 其对接收机

的性能会产生重大影响, 当离子入射 LNA 的核心器件时, 会引发单粒子效应, 对放大器的增益以及性能产生影响, 严重时甚至可导致电路损坏^[12]. 本节将在 Sentaurus TCAD 平台搭建 0.13 μm SiGe HBT 模型, 并作为核心器件, 设计建立 LNA 电路.

2.1 0.13 μm SiGe HBT 二维模型建立

SiGe HBT 的结构类似于 NPN Si BJT 垂直型晶体管, 区别在于使用宽禁带的 Si 作为发射极和集电极、窄禁带的 SiGe 作为基区^[13]. 本文搭建的 HBT 结构的基区为组分渐变的 SiGe 材料, Ge 的含量由基极/集电极 (B/C) 结和发射极/基极 (E/B) 结的 0% 逐渐增加到基区中央的 25%.

本文中仿真的 SiGe HBT 尺寸为 $2.4 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$; 发射区厚度为 $0.225 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 使用多晶硅覆盖在顶部引出发射极接触. 基区厚度为 $0.075 \mu\text{m}$, 具有较高的掺杂浓度, 为 10^{20}cm^{-3} , 使得基区电阻大大降低, 满足了该 SiGe HBT 良好的交流特性以及噪声特性; 集电极部分可分为内集电极区以及外集电极区, 内部使用高斯掺杂, 掺杂浓度为集电极中心的 10^{19}cm^{-3} 逐渐下降至衬底边缘的 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 外集电极区在接触层的掺杂浓度峰值为 10^{20}cm^{-3} . 所有的有源区生长在 SiGe HBT 的衬底上, 厚度为 $0.6 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$.

通过 TCAD 仿真工具构建的器件二维结构模型如图 1(a) 所示. 基区 Ge 的组分通过函数控制, 使用梯形分布的组分设计可以使得器件的截止频率最大^[14], 与均匀分布相比, Ge 组分随着纵轴坐标变化如图 1(b) 所示. 外延基区使用多晶硅材料掺硼掺锗引出基区接触, 增大基区电极的接触面积, 减小 B/C 结电阻. 通过在外延过程中引入 Ge 组分梯度, 可以在基区形成准电场, 提升载流子向集电区的漂移速度, 减小基区渡越时间^[15,16].

2.2 建立低噪放大器模型

LNA 的电路图如图 2 所示, 使用 Cascode 结构可以提高增益和稳定性^[17], Cascode 结构电路由两个晶体管组成, 主要工作方式共发射极 (CE) 晶体管的集电极端口将基极端口处施加的输入信号的电流放大, 该放大的集电极电流进入共基极 (CB) 晶体管的发射极, 在集电极处被单位增益放大^[18]. 图 2 中 L1 为发射极反馈电感, 可以消除输入阻抗

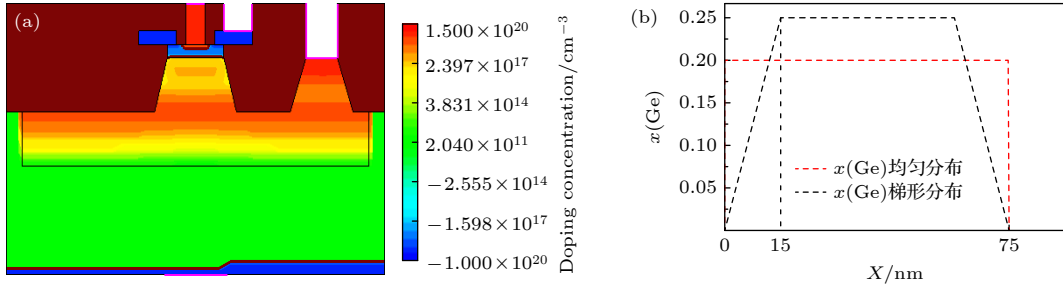


图1 二维器件模型示意图 (a) 二维器件模型图; (b) Ge组分随着纵轴坐标变化示意图

Fig. 1. Schematic of two-dimensional (2D) device model: (a) 2D Device model diagram; (b) schematic diagram of the variation of the Ge component with the coordinate of the vertical axis.

实部, 并且抵消掉一部分容性阻抗; L2 和 C2 在输出端口组成了 L 型的输出阻抗结构, C2 起到隔离直流并且匹配实部阻抗的作用; R1 串联分压, 搭载 C1 作为去耦合电容; CB, CE 为前文中搭建的 SiGe HBT, 保证电路的稳定工作.

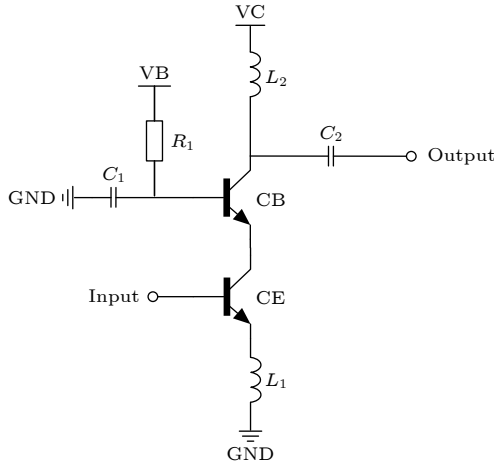


图2 低噪放大器电路图

Fig. 2. Low noise amplifier circuit diagram.

LNA 电路搭建完成之后, 对 CB 晶体管进行离子入射, 改变离子入射的 LET 值、角度, 获取实验结果, 探究不同因素对 LNA 电路端口及器件产生的瞬态电流的影响.

3 不同条件下的电路 SET 分析

根据上述建立的 SiGe HBT LNA 电路, 对其开展器件-电路单粒子效应混合仿真实验以分析离子 LET 值、离子入射角度对电路中的晶体管及 LNA 电路端口 SET 响应的影响.

离子入射 SiGe HBT 示意图如图 3 所示, 离子入射器件中心, 特征半径为 0.1 μm , 粒子入射时间为 0.1 ns, 电离电荷时空上采用高斯分布. 仿真过

程中使用到的物理模型有: Fermi-Dirac 分布模型、禁带变窄效应以及与浓度有关的 SRH (Shockley-Read-Hall) 复合模型、俄歇复合模型. 晶体管的中心部分是 SET 最敏感的部位. 这部分是 SiGe HBT 器件的有源区域, 具有垂直配置, 可以引起电荷收集, 产生最高的瞬态.

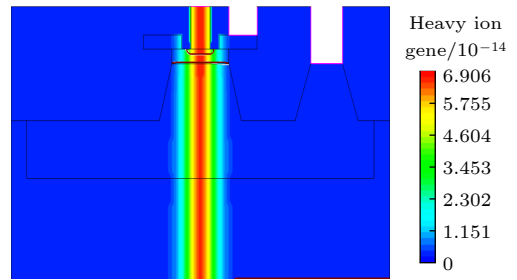


图3 离子入射轨迹仿真图

Fig. 3. Simulation of ion incidence trajectory.

3.1 不同 LET 值的电路 SET 仿真分析

LET 是描述空间离子入射半导体材料中电离作用的物理量, 也是研究电子器件单粒子效应的重要参数. 准确地说, LET 表示为入射离子在材料中单位长度上沉积的能量, 通过密度值进行归一化处理, 单位为 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$.

$$\text{LET} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}. \quad (1)$$

在入射离子的其他条件不变的情况下, 离子的 LET 值越大, 器件的单位长度上产生的电子-空穴对越多, 敏感区域内累计的电荷就越多, 产生的瞬态电流就越明显. 空间中太阳宇宙射线和银河宇宙射线包含的重离子原子序数分布在 2—92, 地面试验模拟中常采用 LET 值为 1—98 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 的离子进行辐照评估, 仿真选取 $\text{LET} = 10, 50, 70 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 作为变量进行仿真实验, 获得输

出端口电流随不同 LET 值的变化情况.

图 4—图 6 给出了模拟仿真获得的 SiGe HBT LNA 电路输出端口及电路内 CB, CE 晶体管在 CB 晶体管受到离子入射时, 单粒子瞬态电流的产生情况. 图 4 为离子入射 CB 时, LNA 电路端口瞬态电流的产生情况, 可以看出, 离子入射导致电路端口在 200 ps 内产生快速的电流瞬变, 幅值约为 20 mA. 随后在扩散作用下电流逐渐回落, 经过约 250 ps 的振荡后, 恢复至最初状态. 仿真同时分析电路中 CB 和 CE 两个晶体管在重离子入射 CB 时的瞬态电流产生情况, 图 5 表示不同 LET 值的重离子入射 CB 晶体管时, 电路中的 CB 晶体管集电极的瞬态电流仿真图, 离子入射 CB 导致 CB 晶体管的集电极在 100 ps 内出现电流瞬变, 在电流回落的过程中出现了第二个峰值, 电流在 200 ps 的振荡后, 恢复至最初状态. 图 6 表示未被入射重离子的 CE 晶体管的集电极瞬态电流仿真图, 离子入射 CB 后, CE 晶体管的集电极在 100 ps 内产生了约 1 mA 的瞬态电流, 并快速回落, 电流在 100 ps 的振荡后, 恢复至最初状态.

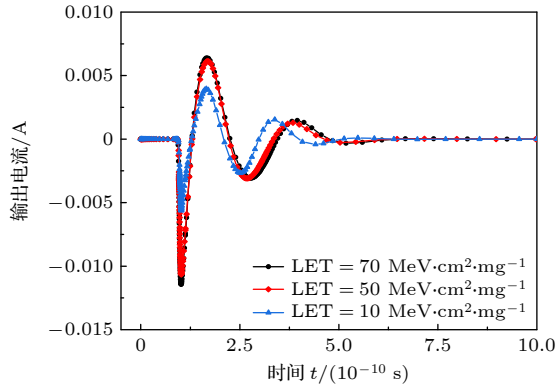


图 4 不同 LET 值的 LNA 输出端口瞬态电流对比图
Fig. 4. Comparison of transient currents at LNA output ports for different LET values.

如图 4 所示, 随着 LET 值的增大, LNA 电路的输出端口的瞬态电流增大, 随后 SET 瞬态电流在恢复过程中产生了长时间的振荡. 由于对 CB 晶体管进行重离子入射, 晶体管内部由离子入射产生的电荷被集电极收集, 集电极电压会随着电荷的收集而不断下降; 同时, 电子迁移率高于空穴迁移率, 导致 LNA 电路端口的瞬态电流存在向下的瞬变峰值, 之后多余的未被收集的电荷溢出集电极, 并且空穴到达, 集电极电流增大, 并随着离子入射过程, 不断振荡, 直到恢复到最初状态. 由理论分析可知,

CB 晶体管内部会因为入射离子 LET 值的增大, 产生更多的收集电荷, 导致 LNA 电路的输出端口的电流的幅度增大, 并且 SET 电流振荡时间变长.

由图 5 可知, 在重离子入射 CB 的情况下, CB 晶体管产生的 SET 电流随着 LET 值的增大而变大, 并且在电路稳定之前, 振荡时间增加. 在 LET 值大于 $50 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 后, 晶体管产生的 SET 电流出现第二次峰值, 出现了明显的扩散现象, 这表明 LET 值增大到一定程度, 电荷收集的速度小于电荷积累的速度. 由图 6 可知, 在重离子入射 CB 的情况下, CE 同样产生了 SET 瞬态电流, 证明 CE 器件在 CB 器件的发射极端提供了阻抗, 因此入射 CB 晶体管产生的额外的电荷载流子不能轻易地从该电路终端流出, 在 CE 器件内寻找另一条路径或重新组合, 导致 CE 晶体管产生了 SET 电流^[19]. 并且随着 LET 值的增大, CB 晶体管产生的未被

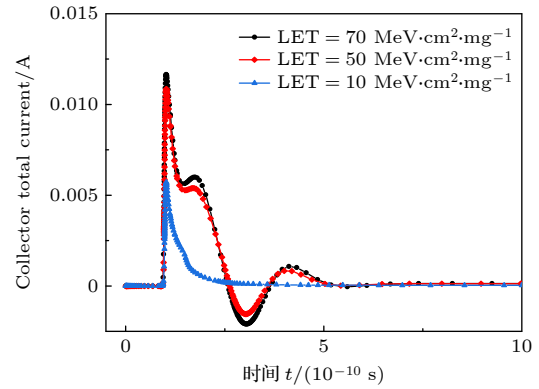


图 5 不同 LET 值的重离子入射 CB 晶体管时, CB 的 SET 电流仿真图

Fig. 5. Simulation of the SET current of the CB when the heavy ions with different LET values incident on the CB transistor.

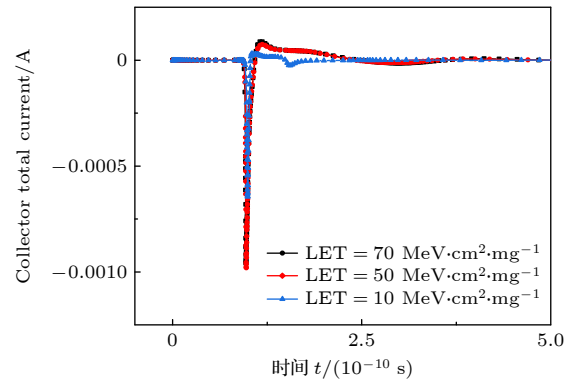


图 6 不同 LET 值的重离子入射 CB 晶体管时, CE 的 SET 电流仿真图

Fig. 6. Simulation of SET current of CE when the heavy ions with different LET values incident on CB transistor.

收集的电荷越多, CE 晶体管产生的 SET 电流越明显, 拖尾时间变长.

3.2 不同入射角度的电路 SET 仿真分析

入射角度是指离子入射方向和器件表面法线的夹角, 如图 7 所示为离子入射器件角度的示意图.

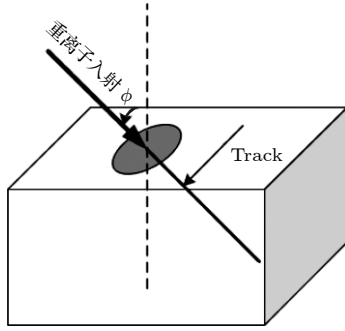


图 7 离子入射角度示意图

Fig. 7. Schematic diagram of the angle of incidence of ions.

本次仿真使用的模型为 $0.13\ \mu\text{m}$ 的 SiGe HBT 模型, 离子入射角度选取范围较小, 因此, 采用入射角度分别为 0° , 15° 以及 30° 的重离子进行实验, 离子的 LET 值为 $10\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$.

图 8—图 10 给出了模拟仿真获得的 SiGe HBT LNA 电路输出端口及电路内 CB, CE 晶体管在 CB 晶体管受到离子入射时, 单粒子瞬态电流的产生情况. 图 8 为离子以不同角度入射时, LNA 电路 SET 仿真输出端口瞬态电流变化图, 可以看出, 离子入射导致电路端口在 $100\ \text{ps}$ 内产生快速的电流瞬变, 幅值约为 $15\ \text{mA}$. 随后在扩散作用下电流逐渐回落, 经历约 $300\ \text{ps}$ 的振荡时间后, 恢复至最初状态. 仿真同时分析电路中 CB 和 CE 两个晶体管在重离子入射 CB 时的瞬态电流产生情况, 图 9 表示对 CB 晶体管进行不同角度的重离子入射时, 电路中的 CB 晶体管集电极的瞬态电流仿真图, 离子入射 CB 导致 CB 晶体管的集电极在 $100\ \text{ps}$ 内产生电流瞬变, 在电流回落的过程中, 由于采用的是 LET 为 $10\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 的离子, 电流扩散效应的特征不明显, 电流回落, 恢复至最初状态. 图 10 表示未被入射重离子的 CE 晶体管的集电极瞬态电流仿真图, 离子入射 CB 后, CE 晶体管的集电极在 $100\ \text{ps}$ 产生了 $1\ \text{mA}$ 的瞬态电流, 并快速回落, 电流在 $100\ \text{ps}$ 的振荡后, 恢复至最初状态.

如图 8 所示, 随着入射角度增大, 在 LNA 输出端口瞬态电流产生的初期, 第一个峰值变大, 之

后的第二个峰值, 入射角度为 30° 的离子产生的电流明显变小, 到第三个峰值, 为垂直入射的离子产生的电流幅度最大, 并且 SET 电流产生的振荡恢复时间最长. 这是由于离子在同样到达衬底的情况

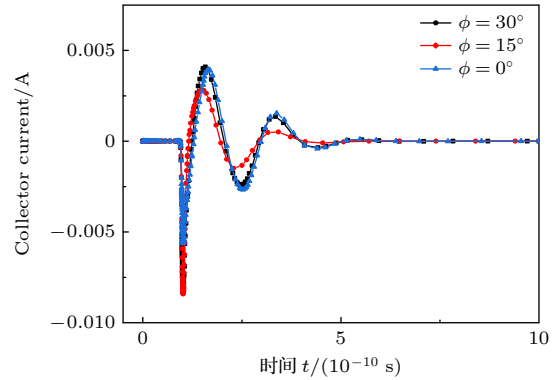


图 8 不同入射角度的 LNA 输出端口瞬态电流对比图

Fig. 8. Comparison of transient currents at the output ports of LNAs with different incidence angles.

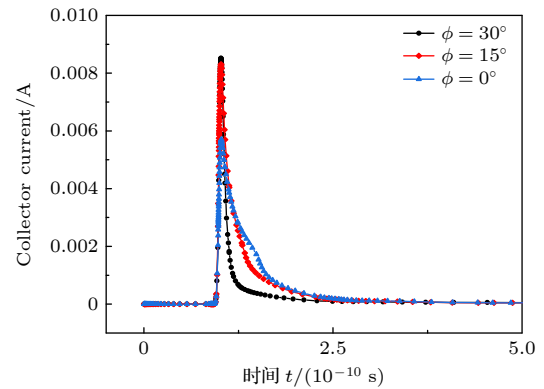


图 9 不同角度的重离子入射 CB 晶体管时, CB 的 SET 电流仿真图

Fig. 9. Simulation of the SET current of the CB when heavy ions are incident on the CB transistor at different angles.

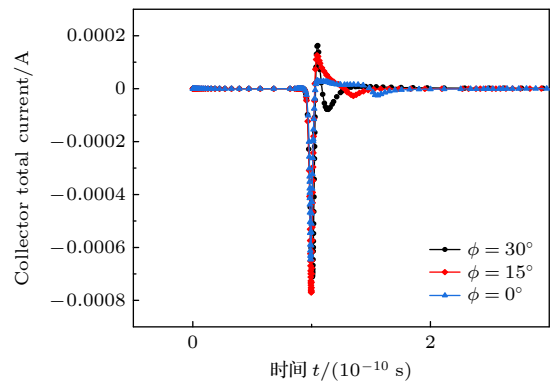


图 10 不同角度的重离子入射 CB 晶体管时, CE 的 SET 电流仿真图

Fig. 10. Simulation of the SET current of CE when heavy ions are incident on the CB transistor at different angles.

下,入射角度越大,射程越长,轨迹与器件接触面积越大,产生的电荷越多,收集到的电荷就会更多.但是只有当离子轨迹经过器件敏感区时才会产生有效的电荷收集,所以离子的入射角度变大,虽然击穿衬底的轨迹变长,产生了更多的电荷,但是在后期轨迹偏离器件的敏感区,所以 SET 电流幅度变小,振荡恢复时间减少.

如图 9 所示,当不同角度的离子入射电路中的 CB 晶体管时,虽然 CB 晶体管集电极 SET 的电流峰值随着入射角度的增大而变大,但是整体产生的积累电荷量变少,SET 电流的恢复时间明显小于垂直入射的离子所需的时间,并且由于入射角度的增大导致集电极产生的累计电荷减少,当离子垂直入射晶体管时,集电极的瞬态电流的扩散效应更明显.如图 10 所示,在重离子入射 CB 晶体管时,CE 晶体管同样产生了 SET 瞬态电流,同上述分析,CE 晶体管产生的 SET 电流是因为 CB 处晶体管受到离子入射后产生的多余载流子流入 CE 晶体管,所以随着离子入射 CB 晶体管角度的增大,前期产生的载流子数量增多,CE 晶体管产生的 SET 幅度变大.但后期随着离子轨迹偏离敏感区域,载流子数量减少,仍然是垂直入射 CB 晶体管时,CE 晶体管产生的 SET 电流的振荡时间最长.

4 反向模式 (IM) 电路性能与单粒子效应仿真研究

4.1 反向模式

由上述实验可知, SiGe HBT 在离子入射晶体管有源区时会产生瞬态电流,并且在 LNA 电路中工作时,会对设计的 LNA 电路输出造成影响,导致在模拟通信应用传播中产生失真.使用 IM 结构,即交换物理集电极与物理发射极,可使发射极与集电极和衬底互相隔离.采用 IM 结构下电路中的器件被离子撞击后,由于隔离作用,集电极产生的电子-空穴对较少,瞬态电流的峰值也会减少.因此与 FM 设计相比,采用 IM 的电路的单粒子翻转 (SEU) 的灵敏度降低 [20,21].

但是如果将 IM 结构的 SiGe HBT 作为有源增益级用在 LNA 中,其引起的增益衰退与额外噪声会对电路系统产生不可避免的影响.8HP 工艺出现之前,采用 IM-SiGe HBT 的 RF 电路的性能会极大程度地退化,致使电路无法正常工作.所以

很长一段时间, RF SiGe 电路中的辐射效应研究局限于 FM 结构.随着技术发展,8HP 工艺的 SiGe HBT 的 f_T 以及 f_{MAX} 峰值已超过 200 GHz [22]. IM 结构的 SiGe HBT 的 f_T 以及 f_{MAX} 峰值可以达到几十 GHz,这样的硬件条件可保证 IM-SiGe HBT 不仅可以减低对应电路对于 SET 的灵敏度,还可以更少地影响电路性能.

在 Sentaurus 平台上使用上文搭建的 130 nm SiGe HBT 器件,对 IM 结构的 SiGe HBT 进行 f_T 与 f_{MAX} 参数的测量,测量结果分别如图 11 与图 12 所示,其中 IM-SiGe HBT 的 f_T 为 36.4 GHz, f_{MAX} 为 42.2 GHz,具备了采用 IM 结构后较好维持电路性能的硬性条件.

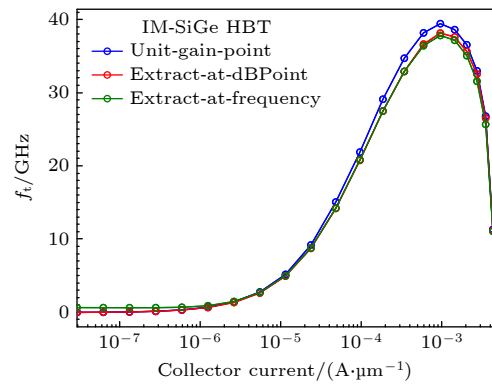


图 11 IM-SiGe f_T 与 IC 之间的关系

Fig. 11. Relationship between f_T and IC of IM-SiGe.

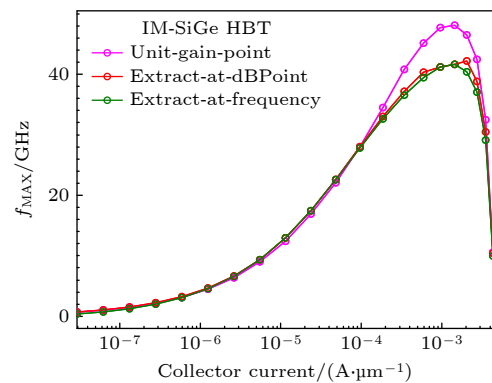


图 12 IM-SiGe f_{MAX} 与 IC 之间的关系

Fig. 12. Relationship between f_{MAX} and IC of IM-SiGe.

本文设计的 LNA 电路使用 Cascode 配置,作为放大电路的核心结构,选取合适的 IM 模式至关重要. CB 晶体管的集电极电流流过 CB 晶体管集电极处的负载阻抗被转换为放大电压.所以,从 LNA 电路的工作角度分析,为了获得更高的增益,CE 处应使用较大的跨导,采取 FM 结构.而

且 CB 晶体管作为 Cascode 结构中的电流增益极, 增益为 β , 所以可以使用 IM 结构, 因此, 本文采取的 IM Cascode 结构为 CB 晶体管反向模式, CE 晶体管正向模式, 即 I-F 结构, 如图 13 所示以缓解 SET 敏感度.

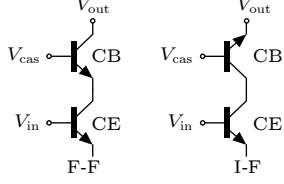


图 13 Cascode 配置的 F-F 与 I-F 结构示意图

Fig. 13. Schematic diagram of F-F and I-F structures with Cascode configurations.

4.2 LNA 电路性能

本文通过在 ADS 软件上校准器件的方法, 将 TCAD 中搭建的器件应用于 ADS 平台设计的电路中的 CB 及 CE 晶体管, 以进行后续的实验. 首

先在 TCAD 平台测量上述 SiGe HBT 的 S 参数, 通过 TCAD Sdevice 平台使用 rfx_load 语句调取 SiGe HBT 的 ACGummel 的 plot 文件中数据, 在指定的偏置点处提取 HBT 器件的 S 参数, 并在 Smith 圆图上绘制 S_{11}/S_{22} 和 S_{12}/S_{21} 参数的曲线和数据点, 如图 14 所示. 在偏置电压 V_{ce} 值固定为 1 V 情况下, 设定的参数值为: 1) Frequency 即频率范围 (1 MHz 至 1 THz); 2) 通过 BiasPointIndex 从 rfx_BiasPoints 列表中提取对应的偏置点值 BiasPoint 设定为 V_{be} (-0.5 V— 0.5 V).

在 ADS 软件上通过对 130 nm SiGe HBT 按照上图进行校准, 以便于作为后续实验中 LNA 电路的 CB 以及 CE 晶体管. 主要修改的器件参数为基极-发射极电容 C_{be} 、基极-发射极电阻 r_{be} 、发射极电阻 r_e 、集电极-发射极电阻 r_{ce} . 设定 V_{be} 为 0.5 V, V_{ce} 为 1 V, 调整后的 ADS SiGe HBT 的 S 参数图如图 15 所示.

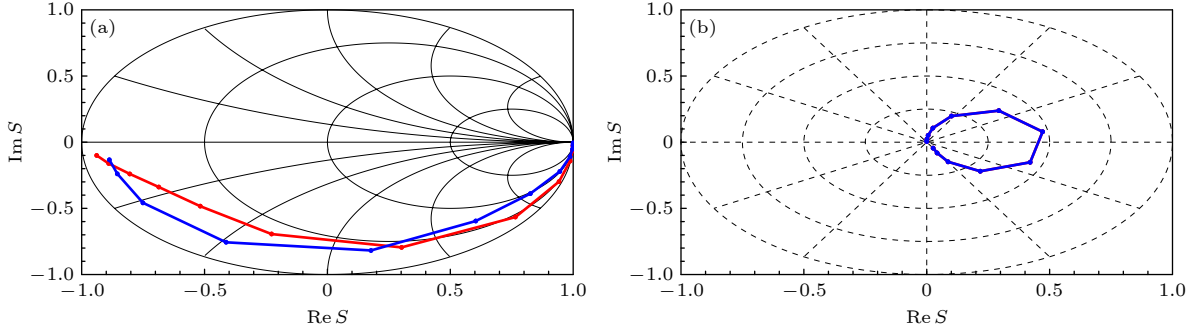


图 14 SiGe HBT 器件的 S 参数 Smith 图 (a) S_{11} (红色)/ S_{22} (蓝色); (b) S_{12} (红色)/ S_{21} (蓝色)

Fig. 14. Smith chart of S -parameters of SiGe HBT devices: (a) S_{11} (red)/ S_{22} (blue); (b) S_{12} (red)/ S_{21} (blue).

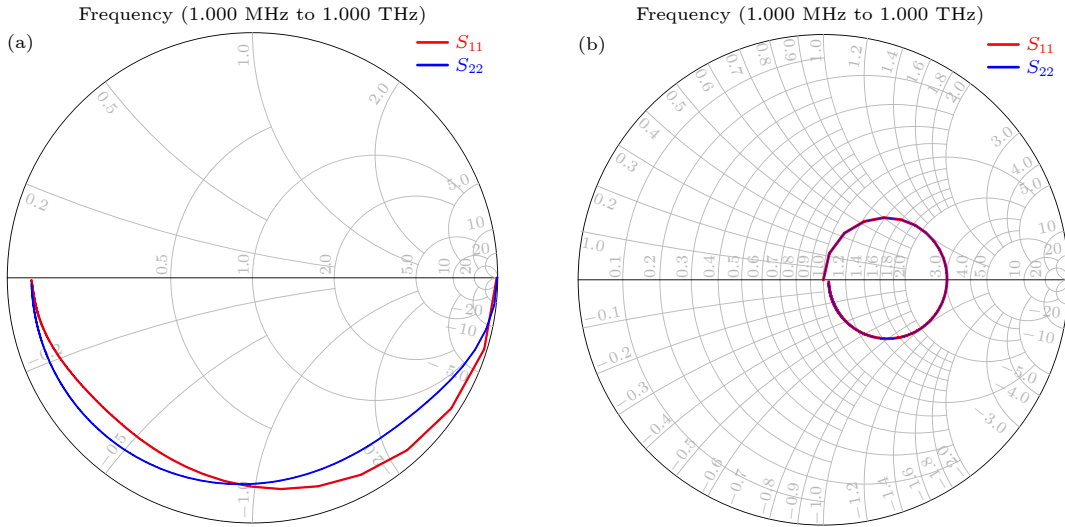


图 15 ADS SiGe HBT 器件的 S 参数 Smith 图 (a) S_{11} (红色)/ S_{22} (蓝色); (b) S_{12} (红色)/ S_{21} (蓝色)

Fig. 15. S -parameter Smith chart of ADS SiGe HBT device: (a) S_{11} (red)/ S_{22} (blue); (b) S_{12} (red)/ S_{21} (blue).

对数据进行处理, 将 S 参数图化为直角坐标系, SiGe HBT 的 V_{ce} 为固定值 1 V, 其中图例的偏压 bias 为 V_{be} 的值, 范围为 $-0.5 \sim 0.5$ V, 如图 16 所示.

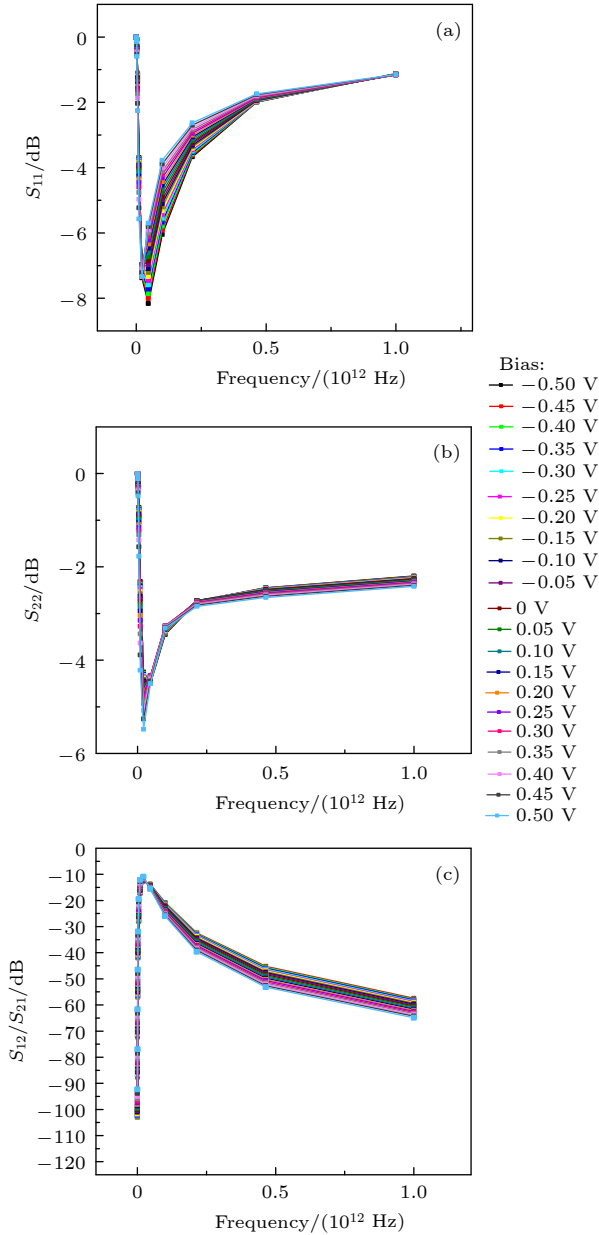


图 16 SiGe HBT 器件的 S 参数扫描图 (a) S_{11} ; (b) S_{22} ; (c) S_{21}

Fig. 16. S -parameter scan of SiGe HBT device: (a) S_{11} ; (b) S_{22} ; (c) S_{21} .

选取 V_{ce} 为 1 V, V_{be} 为 0.5 V 的情况, 将 TCAD 平台的 HBT 器件以及校准后的 ADS 平台 HBT 器件的 S 参数数据进行比对, 发现其射频特性非常接近, 如图 17 所示.

在 ADS 软件上对于以 F-F Cascode 为核心的 LNA 进行测量, 图 18 为 LNA 电路的 S 参数图.

如图 18 所示, S_{11} 与 S_{22} 曲线在中心频率 9.5 GHz 处均低于 -20 dB, S_{12} 低于 -40 dB, 具有良好的隔离性, S_{21} 所代表的正向功率增益在中心频率处高于 20 dB. 该 LNA 具有良好的 RF 性能.

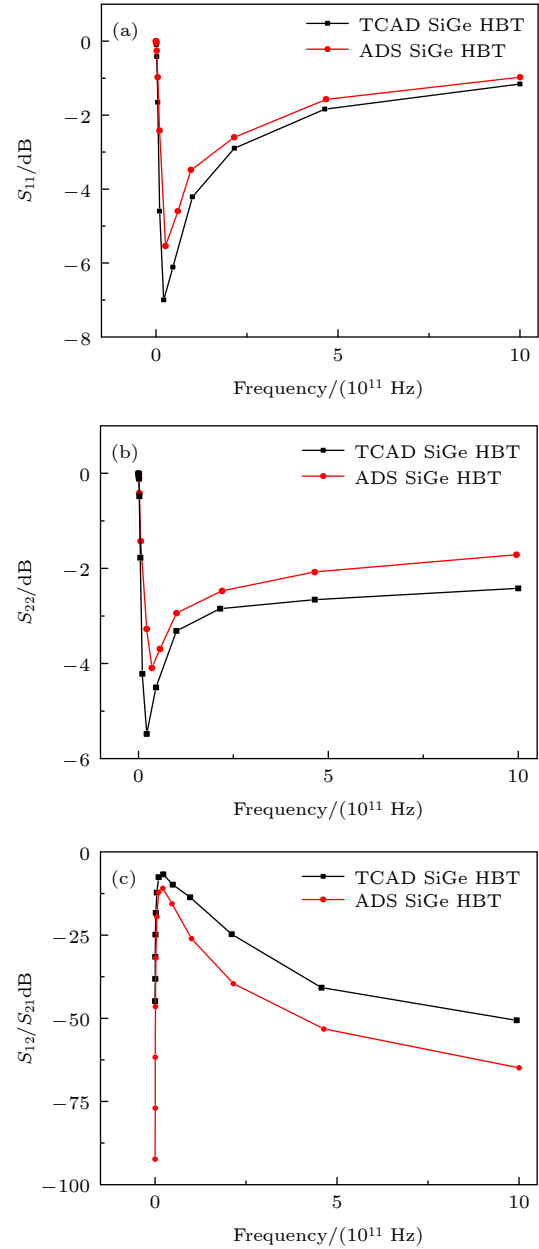


图 17 SiGe HBT TCAD 与 ADS 器件的 S 参数对比图 ($V_{ce} = 1$ V, $V_{be} = 0.5$ V) (a) S_{11} ; (b) S_{22} ; (c) S_{12}/S_{21}

Fig. 17. S -parameter comparison of SiGe HBT TCAD and ADS devices biased at 0.5 V ($V_{ce} = 1$ V, $V_{be} = 0.5$ V): (a) S_{11} ; (b) S_{22} ; (c) S_{12}/S_{21} .

在 ADS 平台, 将 LNA 电路中的核心区域 (F-F) 使用图 13 中的 I-F 结构进行替换, 并进一步测量和比对 I-F 结构对 LNA 电路性能的影响. 如图 19(a) 以及图 19(d) 所示, 采用 I-F 结构以及 F-F

结构的 LNA 的 S_{11} 曲线和 S_{22} 曲线在中心频率 9.5 GHz 处均低于 -10 dB. 其中 IM Cascode 结构在中心频率的回波损耗为 -15 dB, FM Cascode 结构在中心频率的回波损耗为 -35 dB, 虽然有所减少, 但是对电路性能影响不大. 图 19(b) 中采用 I-F 结构以及 F-F 结构的 LNA 的 S_{12} 曲线均低于 -40 dB, 具有良好的隔离度. 图 19(c) 表示, I-F LNA 与 F-F LNA 相比, I-F LNA 的增益为 20 dB, 相较于 F-F LNA 的中心频率增益为 23 dB, 相差不大, 且满足 LNA 性能需求.

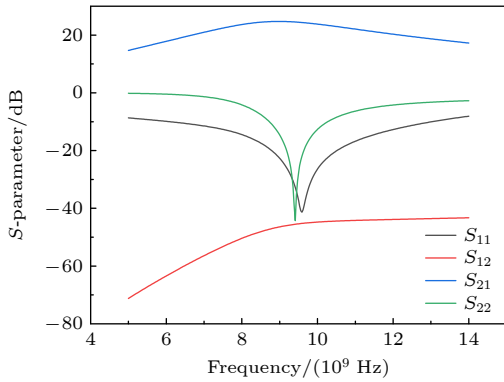


图 18 传统模式下 LNA 的 S 参数图

Fig. 18. S -parameter plot of LNA in forward mode.

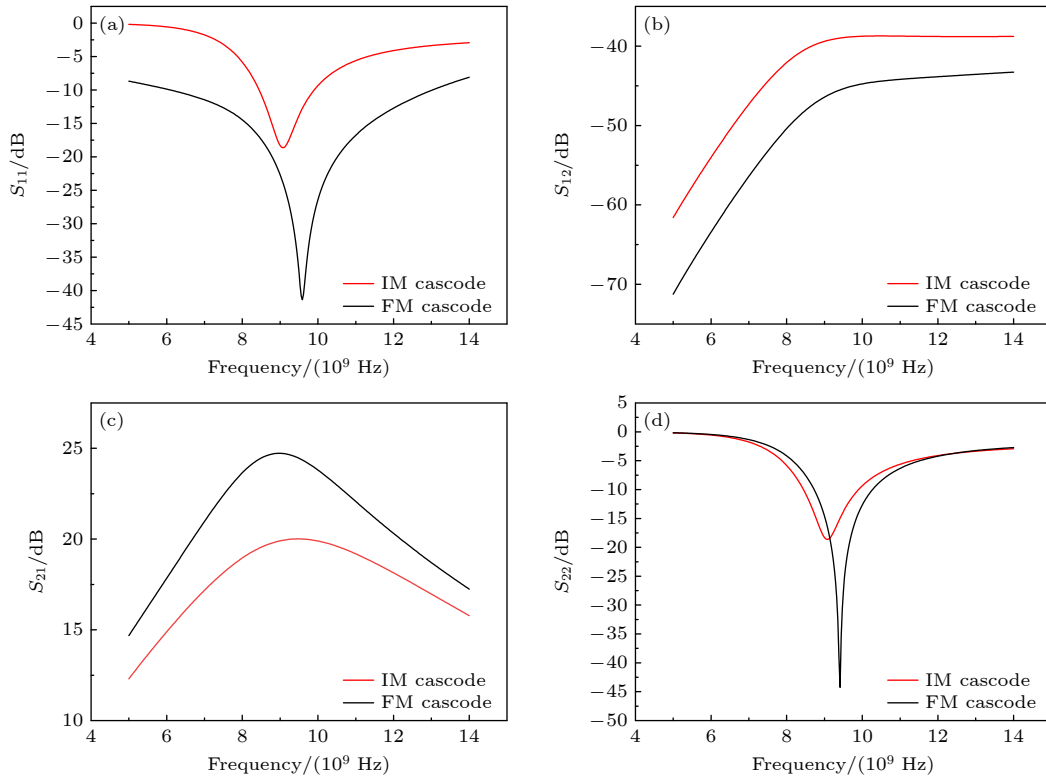


图 19 中心频率为 9.5 GHz 的 I-F 结构以及 F-F 结构的 LNA 电路 S 参数图对比 (a) S_{11} ; (b) S_{12} ; (c) S_{21} ; (d) S_{22}

Fig. 19. Comparison of S -parameter plots of LNA circuits with I-F structure and F-F structure at a center frequency of 9.5 GHz: (a) S_{11} ; (b) S_{12} ; (c) S_{21} ; (d) S_{22} .

噪声系数同样也是 LNA 的重要指标, 如图 20 所示, 采用 I-F 结构以及 F-F 结构的 LNA 的 NF 对比图. 整体来说, 在工作频段, I-F LNA 较于 F-F LNA 有较大的 NF. 在中心频率 9.5 GHz 处, F-F LNA 的 NF 为 1.385 dB, I-F LNA 的 NF 为 2.9 dB, 均低于 3 dB. 随着频率不断的增大, NF 都在不断增加, I-F LNA 的增大速率明显更大, 不过在 LNA 工作频段内没有影响电路的性能.

整体来看, 虽然在 RF LNA 中采取 IM 结构会对电路的一些指标造成一定的影响, 但是 130 nm 工艺可以保证 LNA 电路工作在合格的指标区间. 表 1 为 IM 结构与 FM 结构的 LNA 电路的核心参数, 包括增益 S_{21} 、噪声系数 NF 以及 1dB 压缩点 P1dB, 进一步证明可以将 IM 结构应用于 RF LNA 电路以缓解 SiGe HBT 对 SET 的敏感度, 并保证了 RF LNA 的工作性能.

4.3 LNA 的 SET 混合仿真

在 TCAD 上通过混合模拟仿真的方式搭建如图 2 的 LNA 电路, 分别测量 F-F 模式与 I-F 模式下以 Cascode 为核心配置的 LNA 电路进行 SET 实验时, 瞬态电流与时间的关系. 如图 21 所示,

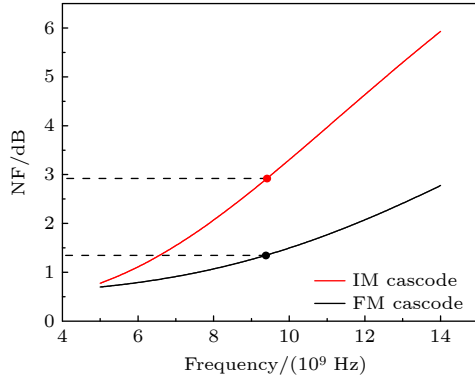


图 20 I-F 结构以及 F-F 结构的 LNA 电路 NF 对比图

Fig. 20. NF comparison of LNA circuits with I-F structure as well as F-F structure.

表 1 LNA 核心参数

Table 1. LNA core parameters.

LNA核心参数	I-F Cascode	F-F Cascode
f_0/GHz	9.5	9.5
S_{21}/dB	20	23
NF/dB	2.9	1.4
P1dB/dBm	-18	-22

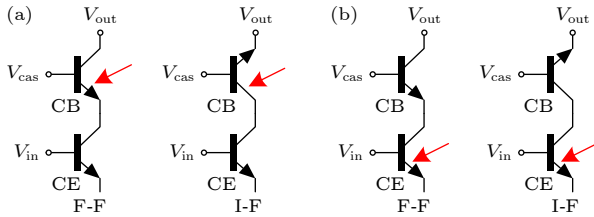


图 21 F-F LNA 以及 I-F LNA 电路中对 CB 与 CE 的晶体管进行重离子入射示意图 (a) 重离子入射 CB; (b) 重离子入射 CE

Fig. 21. Schematic of heavy-ion incidence on the transistors of CB and CE in F-F LNA as well as I-F LNA circuits: (a) Heavy ion incident CB; (b) heavy ion incident CE.

实验分别对采用 FM 结构以及 IM 结构的 LNA 电路中的 CB 与 CE 的晶体管进行重离子入射. 由于同样能量的离子入射 CB, CE 晶体管, CB 处晶体管产生的 SET 电流小于 CE 处晶体管产生的 SET 电流^[23], 所以为了达到更好的观测效果, 对于 CB 以及 CE 晶体管, 实验分别使用 LET 值为 $50 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 与 LET 值为 $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 的入射能量.

如图 22 和图 23 所示, 当离子分别入射 CB, CE 晶体管敏感区域时, 由于晶体管并联, 输出匹配网络相同, 所以输出的瞬态电流波形具有相似的形态^[24], 同时相较于 FM 结构, I-F 模式下的瞬态电峰值和电流持续时间均有不同程度的下降.

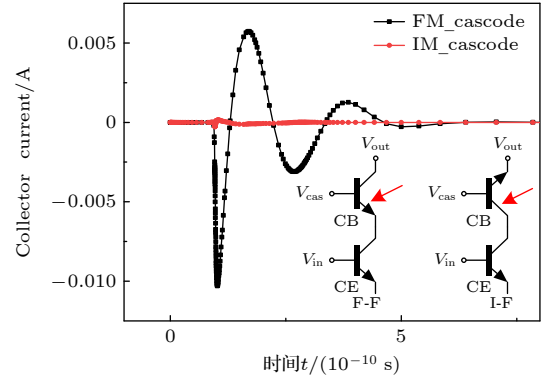


图 22 CB 在离子入射条件下 F-F 和 I-F 共源共栅配置的 SET 模拟结果

Fig. 22. CB SET simulation results for F-F and I-F common source and common gate configurations under ion incidence conditions.

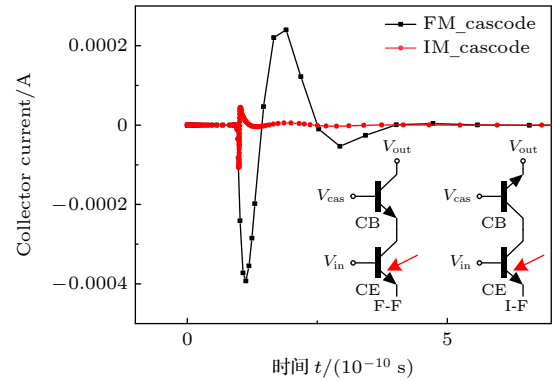


图 23 CE 在离子入射条件下 F-F 和 I-F 共源共栅配置的 SET 模拟结果

Fig. 23. CE SET simulation results for F-F and I-F common source and common gate configurations under ion incidence conditions.

实验结果证明, 入射 CB 晶体管时, I-F 模式的电路的瞬态电流较 F-F 模式减小 97.5%; 电流持续时间明显地缩短. 这是因为 CB 晶体管作为 IM-SiGe HBT, 这些注入的载流子将流过其衬底-集电极, 同时集电极-衬底处产生的扩散电流被集电极-电路端口处更好地隔离^[25], 这有助于降低电路端口处的输出瞬态峰值. 然而, 当 CB 晶体管处于正向模式时, 大多数注入的载流子可以从其发射极传递到集电极, 因此, SET 输出峰值比采用 IM 结构的情况下大得多.

入射 CE 晶体管时, I-F 模式的电路的瞬态电流较 F-F 模式减小 66%; 电流持续时间明显地缩短; 由于在入射 CE 晶体管情况下, 当 CB 晶体管为 FM 模式时, 大部分注入的载流子会正常通过其发射极流过集电极, 而 CB 晶体管处于 IM 模式较

于 FM 模式, 由 CE 晶体管产生的大部分过剩电子-空穴对会舍弃发射极进入 CB 晶体管的衬底-集电极, 这有助于降低 CE 晶体管集电极处输出 SET 的瞬态峰值. 因此, 采用 IM 结构会降低 SET 瞬态峰值和电流持续时间, 理论与实验结果相符.

对比实验结果也可以看到, 对于 I-F 结构的 LNA 电路, 重离子分别入射 CB, CE 两个晶体管, 都可以在不同程度上缓解 SiGe LNA 电路对于 SET 的敏感度. 同时, 由于本文实验为了使采用的 IM 结构更小程度地影响 LNA 电路性能, 选取了 CB 晶体管反模, CE 晶体管正模的 I-F 结构, 所以该 IM 结构的 LNA 电路可以更好地抵抗外部对于 CB 晶体管的重离子入射.

5 结 论

本文使用 Sentaurus TCAD 仿真工具构建了 $0.13\ \mu\text{m}$ SiGe HBT 二维模型, 以 SiGe HBT 器件模型为基础, 搭建了 X 波段 LNA 电路, 对 LNA 电路进行 SET 实验, 探究入射离子的 LET 值、角度对 LNA 电路端口的影响以及晶体管之间的相互作用, 对得到的结果进行对比分析; 在仿真中对 LNA 电路中 CB 晶体管进行入射实验, 电路中的其他器件 (CE 晶体管) 也会产生瞬态电流, 并对得到的结果进行分析.

同时本文使用 IM 结构来探究以 SiGe HBT Cascode 为核心配置的 LNA 电路的单粒子效应. 测量其相关参数, 验证其在 IM 结构下会减少电路性能退化程度的硬性指标. 在 ADS 上分别建立 F-F LNA 以及 I-F LNA, 对比两者性能, 并在 Sentaurus TCAD 平台分别对 F-F LNA 以及 I-F LNA 电路进行模拟混合仿真的 SET 实验, 分析结果得到: $130\ \text{nm}$ 工艺下, 与标准的 LNA 相比, 采用 IM 结构的 LNA 依旧表现出良好的射频性能, 并大幅降低了 SiGe 工艺 LNA 电路对于 SET 的敏感程度, 达到预期的效果.

参考文献

- [1] Xin Q M, Liu Y Q, Jia S M 2011 *Semicond. Technol.* **36** 672 (in Chinese) [辛启明, 刘英坤, 贾素梅 2011 *半导体技术* **36** 672]
- [2] Meyerson B S 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 797

- [3] Man L 2019 *Chin. New Telecommun.* **21** 222 (in Chinese) [马良 2019 *中国新通信* **21** 222]
- [4] Xie M X, Gu N N 2008 *Microelectronics* **38** 34 (in Chinese) [谢孟贤, 古妮娜 2008 *微电子学* **38** 34]
- [5] Çakıkan C, Kalyoncu I, Yazıcı M, Gurbuz Y 2018 *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* **66** 1419
- [6] Bao K, Zhou J, Shen Y 2017 *Solid State Electron. Res. Prog.* **37** 239 (in Chinese) [包宽, 周俊, 沈亚 2017 *固体电子学研究进展* **37** 239]
- [7] Li P, Guo H X, Guo Q, Wen L, Cui J W, Wang X, Zhang J X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 118502 (in Chinese) [李培, 郭红霞, 郭旗, 文林, 崔江维, 王信, 张晋新 2015 *物理学报* **64** 118502]
- [8] Appaswamy A 2009 *Ph. D. Dissertation* (Georgia: Georgia Institute of Technology)
- [9] Sheng L, Yong-Bin K, Fabrizio L 2011 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **12** 68
- [10] Jung S, Lourenco N E, Song I, Oakley M A, England T D, Arora R, Cressler J D 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3193
- [11] Al Seragi E M, Dash S, Muthuseenu K, Cressler J D, Barnaby H J, Khachatryan A, Buchner S P, McMorro D, Zeinolabedinzadeh S 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **69** 2154
- [12] Li P, He C H, Guo H X, Zhang J X, Li Y, Wei J 2019 *Microelectron. Reliab.* **103** 113499
- [13] Zhang J X, Guo Q, Guo H X, Lu W, He C H, Wang X, Wen L 2018 *Microelectron. Reliab.* **84** 105
- [14] Jin D Y, Wu L, Zhang W R, Na W C, Yang S M, Jia X X, Yang Y Q 2022 *J. Beijing Univ. Technol.* **48** 1280
- [15] Zhang J X, Guo H X, Pan X Y, Guo Q, Zhang F Q, Feng J, Wang X, Wei Y, Wu X X 2018 *Chin. Phys. B* **27** 108501
- [16] Zhang J X, Wang X, Guo H X, Feng J, Lü L, Li P, Yan Y Y, Wu X X, Wang H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 058502 (in Chinese) [张晋新, 王信, 郭红霞, 冯娟, 吕玲, 李培, 闫允一, 吴宪祥, 王辉 2022 *物理学报* **71** 058502]
- [17] Lourenco N E, Zeinolabedinzadeh S, Ildefonso A, Fleetwood Z E, Coen C T, Song I, Cressler J D 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 273
- [18] Chen W, Pouget V, Barnaby H J, Cressler J D, Niu G, Fouillat P, Lewis D 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2081
- [19] Zeinolabedinzadeh S, Ying H, Fleetwood Z E, Roche N J H, Khachatryan A, McMorro D, Cressler J D 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 125
- [20] Lourenco N E, Phillips S D, England T D, Cardoso A S, Fleetwood Z E, Moen K A, Cressler J D 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4175
- [21] Phillips S D, Moen K A, Lourenco N E, Cressler J D 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 2682
- [22] Li P, He C H, Guo H X, Zhang J X, Wei J N, Liu M H 2022 *J. Terahertz Sci. Electron. Inf. Technol.* **20** 523 (in Chinese) [李培, 贺朝会, 郭红霞, 张晋新, 魏佳男, 刘默寒 2022 *太赫兹科学与电子信息学报* **20** 523]
- [23] Najafizadeh L, Phillips S D, Moen K A, Diestelhorst R M, Bellini M, Saha P K, Marshall P W 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3469
- [24] Ildefonso A, Coen C T, Fleetwood Z E, Tzintzarov G N, Wachter M T, Khachatryan A, Cressler J D 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 239
- [25] Song I, Raghunathan U S, Lourenco N E, Fleetwood Z E, Oakley M A, Jung S, Cressler J D 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 1099

Numerical simulation of single-particle transients in low-noise amplifiers based on silicon-germanium heterojunction bipolar transistors and inverse-mode structures

Huang Xin-Yu¹⁾ Zhang Jin-Xin^{1)†} Wang Xin²⁾ Lü Ling¹⁾ Guo Hong-Xia²⁾³⁾
Feng Juan¹⁾ Yan Yun-Yi¹⁾ Wang Hui¹⁾ Qi Jun-Xiang¹⁾

1) (*School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

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

(Received 29 February 2024; revised manuscript received 19 April 2024)

Abstract

In this work, TCAD simulation modeling is carried out for silicon-germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe HBT), and an X-band low noise amplifier (LNA) circuit is built based on the SiGe HBT device model to carry out the hybrid simulation of single-particle transient (SET). The rule of SET pulse varying with LET value and incident angle of ions is studied, and the results show that with the increase of incident LET value, the amplitude of SET pulse at the LNA port increases, and the oscillation time is prolonged; with the increase of incident angle of ions, the amplitude of SET pulse at the LNA port first increases and then decreases, and the oscillation time decreases. With the development of the characterization process, the cutoff frequency (f_T) and the maximum oscillation frequency (f_{MAX}) of SiGe HBT device with IM structure, are measured considering the use of inverse-mode (IM) common emitter and common-base structures (Cascode) to reduce the sensitivity of the LNAs to single-particle effects. This work calibrates the devices of the TCAD platform as well as the devices of the ADS platform, establishes F-F LNAs as well as I-F LNAs on the ADS, respectively, and verifies the relevant RF performances of the LNA circuits by using the IM-structured SiGe HBTs as the core devices. The SET experiments are performed on the Sentaurus TCAD platform for the F-F LNA circuit and I-F LNA circuit for ions incident on two positions: common base transistor and common emitter transistor, respectively. It is concluded that the LNA with IM structure still shows good RF performance compared with the standard LNA at 130 nm. The transient current duration of the LNA circuit with IM Cascode structure is significantly reduced, and the peak value is reduced by 66% or more, which significantly reduces the sensitivity of the SiGe LNA circuit to SET.

Keywords: silicon-germanium heterojunction bipolar transistor, single particle effect, inverse mode, hybrid simulation

PACS: 61.80.Az, 85.30.-z

DOI: [10.7498/aps.73.20240307](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240307)

† Corresponding author. E-mail: jxzhang@xidian.edu.cn

基于锗硅异质结双极晶体管的低噪声放大器及其反模结构的单粒子瞬态数值仿真研究

黄馨雨 张晋新 王信 吕玲 郭红霞 冯娟 闫允一 王辉 戚钧翔

Numerical simulation of single-particle transients in low-noise amplifiers based on silicon-germanium heterojunction bipolar transistors and inverse-mode structures

Huang Xin-Yu Zhang Jin-Xin Wang Xin Lü Ling Guo Hong-Xia Feng Juan Yan Yun-Yi Wang Hui
Qi Jun-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 126103 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240307

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240307>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维数值仿真研究锗硅异质结双极晶体管总剂量效应

Three-dimensional simulation of total ionizing dose effect on SiGe heterojunction bipolar transistor

物理学报. 2022, 71(5): 058502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211795>

SiGe BiCMOS低噪声放大器激光单粒子效应研究

Investigation of laser-induced single event effect on SiGe BiCMOS low noise amplifiers

物理学报. 2024, 73(4): 044301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231451>

全耗尽绝缘体上硅氧化钪基铁电场效应晶体管存储单元单粒子效应计算机模拟研究

Numerical simulation of single-event effects in fully-depleted silicon-on-insulator HfO₂-based ferroelectric field-effect transistor memory cell

物理学报. 2022, 71(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211655>

N阱电阻的单粒子效应仿真

Simulation research on single event effect of N-well resistor

物理学报. 2023, 72(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20220125>

纳米体硅鳍形场效应晶体管单粒子瞬态中的源漏导通现象

Effect of source-drain conduction in single-event transient on nanoscaled bulk fin field effect transistor

物理学报. 2020, 69(8): 086101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191896>

HfO₂基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits

物理学报. 2020, 69(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200123>