

# 锗硅异质结双极型晶体管 RF 雪崩 效应 Mextram 模型研究

刘 静, 郑少华, 刘 茵

(西安理工大学电子工程系, 陕西西安 710048)

**摘 要:** 传统 Mextram 模型基于雪崩倍增电流源  $I_{avl}$  来描述锗硅异质结双极晶体管的雪崩倍增效应, 忽略了射频条件下因雪崩倍增相位延迟以及载流子传输时间延迟带来的集电结电感延迟问题. 对锗硅异质结双极晶体管的雪崩倍增效应进行了研究, 解释了导致器件集电结中出现电感延迟的物理机制. 提出采用击穿电感和电阻分别表征器件的(Radio Frequency, RF)电感延迟特性和雪崩倍增载流子的贡献, 建立考虑 RF 雪崩倍增效应的电感击穿等效电路模型, 并嵌入到 Mextram 505.00 模型中. 基于 S 参数来描述改进模型的验证结果, 与传统模型相比, 改进模型在应用频率小于 35 GHz 条件下, 显著改善了锗硅异质结双极晶体管的增益和输出阻抗的精度, 且不会对器件模型的直流特性拟合精度产生负面影响. 同时从改进模型的电子击穿电感  $L_{jen}$ 、电子击穿电阻  $R_{jen}$ 、输出曲线、增益参数和输出阻抗中提取等效电路模型的敏感参数  $A_{em}$  和  $V_g$ . 结果表明, 基于 RF 电感击穿等效电路的 Mextram 505.00 改进模型可以更精确地预测射频条件下雪崩倍增效应发生时锗硅异质结双极晶体管的器件性能.

**关键词:** HBT; Mextram 模型; 参数提取; RF 雪崩倍增效应; 碰撞电离

**基金项目:** 陕西省重点研发计划(No.2022GY-016)

**中图分类号:** TN431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)06-1493-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20211066

## Research on Mextram Model of Germanium Silicon Heterojunction Bipolar Transistor with RF Avalanche Effect

LIU Jing, ZHENG Shao-hua, LIU Yin

(Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** The avalanche current source  $I_{avl}$  is used to model the avalanche multiplication effect in the traditional SiGe HBT Mextram model, which ignores the base-collector junction inductance delay characteristics due to avalanche multiplication phase delay and carrier transit-time delay under RF (Radio Frequency) conditions. The avalanche multiplication effect is studied and its physical mechanism leading to the inductance delay of SiGe HBT is explained. The breakdown inductance and breakdown resistance are proposed to characterize the contribution of RF inductance delay and avalanche multiplication carriers respectively. The RF avalanche multiplication effect inductive breakdown equivalent circuit is established and it is embedded in Mextram 505.00 model. The S-parameters are used to describe the verification process of the improved model. Compared to the traditional model of the device, the accuracy of the device gain and the output impedance of the improved model is greatly improved in the range of 1~35 GHz. The DC characteristics of the device will not be sacrificed. Meanwhile, the sensitive parameters  $A_{em}$  and  $V_g$  are extracted from the electronic breakdown inductance  $L_{jen}$ , electronic breakdown resistance  $R_{jen}$ , output curve, gain parameter and device output impedance of the improved model. The results show that the improved model with RF inductive breakdown equivalent circuit can predict accurately the performance of SiGe HBT with avalanche multiplication effect under RF conditions.

**Key words:** heterojunction bipolar transistor; Mextram model; parameter extraction; RF avalanche multiplication effect; impact ionization

**Foundation Item(s):** Key Research & Development Project in Shaanxi Province of China (No.2022GY-016)

### 1 引言

硅锗异质结双极型晶体管(Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor, SiGe HBT)基于发射结处 Si/SiGe 异质结结构,很好地实现了增益和频率之间的折中,相比于硅双极晶体管(Si BJT),具有高速、高频、高增益等优异性能<sup>[1-5]</sup>,并且能够与标准 CMOS 技术兼容,具有低成本、高成品率、高集成度和优异的低温性能等优点<sup>[6,7]</sup>,在毫米波、射频(Radio Frequency, RF)和一些极端环境中展现出广泛的应用前景<sup>[8-11]</sup>. 相关 SiGe 工艺或者 SiGe BiCMOS 工艺的高频电路应用中,高精度的器件等效电路模型才能满足电路应用的优化设计需求,提高电路设计精度和产品的良率<sup>[12,13]</sup>.

Mextram 模型可以相对准确地表征各种工艺下的晶体管结构且对于 SiGe 工艺具有非常广泛的应用,因此它可以描述不同工艺下的 SiGe HBT 器件特性<sup>[14]</sup>. 文献资料表明, SiGe HBT 中衬底效应、三阶交调失真,以及噪声特性是现阶段 Mextram 模型相关研究的主要关注点<sup>[15]</sup>.

SiGe HBT 集电结附近因其较低的外延层掺杂浓度很容易发生碰撞电离效应. 随着集电结反向偏置电压的增大,该碰撞电离会加剧集电结附近的雪崩倍增效应. 在微波、射频应用条件下,集电结附近的雪崩倍增效应引起的雪崩倍增相位延迟和载流子传输时间延迟,会导致集电极交流电流滞后其交流电压. 传统的 Mextram 505.00 模型基于雪崩倍增电流源  $I_{avl}$  来表征直流(Direct Current, DC)情况下的雪崩倍增效应<sup>[16]</sup>,它忽略了射频条件下 SiGe HBT 集电结中因为雪崩倍增载流子带来的电感延迟问题. 射频条件下 SiGe HBT 集电极交流电流滞后其交流电压的问题,必须在 Mextram 模型中进行精确的表述,才能满足基于 SiGe HBT 的相关射频电路应用的需求. 本文对 SiGe HBT 器件集电区的雪崩倍增机理进行研究,采用射频条件下的电感击穿等效电路模型表征集电结中由雪崩倍增载流子引起的电感延迟特性,并嵌入到 Mextram 505.00 模型中. 基于 S 参数来描述改进模型的验证结果,结果表明,改进模型能够更好地描述 SiGe HBT 在射频应用情况下雪崩倍增效应增强时集电极的延迟性能.

### 2 SiGe HBT 集电区 RF 雪崩倍增机制

SiGe HBT 中当反向偏置的集电结偏置电压增大时,集电结附近的电荷区中会发生碰撞电离效应,图 1 给出了射频条件器件内部集电结附近载流子的雪崩倍增示意图. SiGe HBT 工作在大信号条件下,集电结的反向偏置电压较高时,集电结空间电荷区中靠近冶金结一侧较窄的区域(0~ $X_A$ )是强电场的雪崩倍增区,空间电荷区中除雪崩倍增区外的区域( $X_A$ ~ $W_D$ )为载流

子的漂移区. 碰撞电离作用下在倍增区产生大量载流子,新产生的空穴被强电场迅速扫进基区,电子在空间电荷区内被强电场扫进集电区. 当施加射频信号时,主要是有两种延迟因素会导致在该区域内 RF 电流滞后其电压:其一为载流子倍增电流达到稳定状态所需时间带来的相位延迟;其二为雪崩倍增产生的载流子渡越空间电荷区所需时间带来的延迟<sup>[17]</sup>. 射频条件下,高电场雪崩倍增区域中电子空穴的产生率不仅仅是电场的函数,而且还是载流子浓度的函数. 当电场超过峰值后,电子空穴产生率继续增大直到电场低于临界值为止,此时电子空穴产生率跟不上电压的变化将发生雪崩倍增相位延迟. 新产生的电子空穴在强电场作用下以饱和速度穿过空间电荷区会带来传输时间延迟问题.

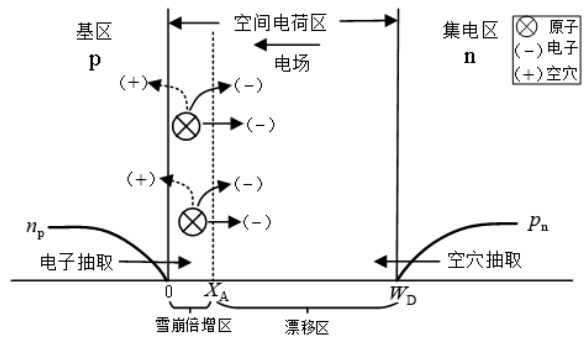


图1 射频条件下 SiGe HBT 集电结附近载流子雪崩倍增示意图

射频条件下,建立电感击穿等效电路模型描述 SiGe HBT 集电结空间电荷区中由雪崩倍增相位延迟以及载流子渡越时间延迟带来的电流和电压不一致的问题. 电感是一种可以产生交流电流滞后交流电压的元件<sup>[18,19]</sup>,集电极电压改变,载流子的产生率发生变化,进一步影响电感. 图 2 为本文提出的电感击穿等效电路模型.

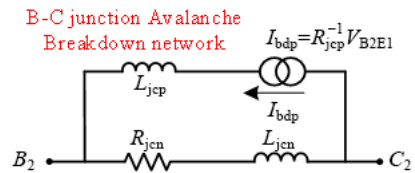


图2 电感击穿等效电路模型

该等效电路模型中的  $B_2$  和  $C_2$  端子为 Mextram 模型中的本征节点;基于 4 个参数  $L_{jcn}$ ,  $L_{jcp}$ ,  $R_{jcn}$ ,  $R_{jcp}$  来描述集电结电感延迟问题,二者的物理含义分别为电子和空穴的击穿电感和击穿电阻. 电感主要来源于集电结空间电荷区电子和空穴的输运过程,该区域内载流子以饱和速度移动,所以传输电流大小强烈依赖载流子浓度,且成正比关系.

对于击穿区域<sup>[20]</sup>, Read 方程有

$$\frac{\partial I_n}{\partial t} = \frac{2I_n}{\tau_g} \left( \int_0^{x_g} \alpha_n dx - 1 \right) \quad (1)$$

其中,  $\tau_g$  电子渡越漂移区的时间;  $x_g$  雪崩倍增区的宽度;  $\alpha_n$  载流子的电离率;  $I_n$  雪崩倍增区的总电子流, 雪崩倍增效应增强时其值变为  $I_{bdn}$ . 同理  $I_{bdp}$  为雪崩倍增效应增强时的总空穴流  $I_p$ .  $Y_{ng}$  为雪崩倍增区的导纳, 其表达式<sup>[21]</sup>为

$$Y_{ng} = \left( \frac{x_g \cdot E}{I_n} \right)^{-1} = \frac{1}{R_{jcn} + j\omega L_{jcn}} \quad (2)$$

其中,  $L_{jcn}$  和  $R_{jcn}$  分别为电子击穿电感和电阻, 其表达式<sup>[22]</sup>分别为

$$L_{jcn} = \frac{\tau_g}{2 \cdot \alpha'_n I_n} \quad (3)$$

$$R_{jcn} = \frac{1}{M \alpha'_n I_n} \quad (4)$$

其中,  $\tau_g$  电子渡越漂移区的时间;  $M$  为碰撞电离系数;  $\alpha'_n = (A \cdot \exp(-B/E))'$ ,  $A$  和  $B$  为常数,  $E = V_g/x_g$ ,  $V_g$  为雪崩倍增区的电压,  $x_g$  雪崩倍增区的宽度<sup>[23,24]</sup>, 其表达式为

$$x_g = \frac{e_0 e_{si} A_{cm}}{C_{jc}} \quad (5)$$

其中,  $A_{cm}$  表示雪崩倍增区的面积. 射频条件下电子在集电极端口以及空穴在基极端口产生载流子的贡献分别用  $R_{jcn}$  和  $I_{bdp}$  来表征, 采用大信号电流源  $I_{bdp}$  可以与传统 Mextram 505.00 模型中的直流雪崩倍增电流源  $I_{avl}$  相兼容. 传统的 Mextram 505.00 模型仅对直流条件下集电结的雪崩倍增击穿效应进行了表征, 改进的大信号模型同时考虑了大信号驱动下的 RF 电感延迟效应. 因此, 图 2 所示的改进模型可以全面地揭示 SiGe HBT 的 RF 非线性击穿特性.

### 3 改进的具有电感击穿等效电路模型的 Mextram 505.00 模型

为了进一步表征射频条件下 SiGe HBT 器件集电结附近载流子的倍增效应, 图 3 给出了改进后的 Mextram 505.00 模型. 由图可以看出在 Mextram 505.00 节点端子  $B_2$  和  $C_2$  间嵌入了本文新提出的射频条件下的电感击穿等效电路模型, 以此来表征射频条件下集电结的雪崩倍增效应对器件特性的影响.

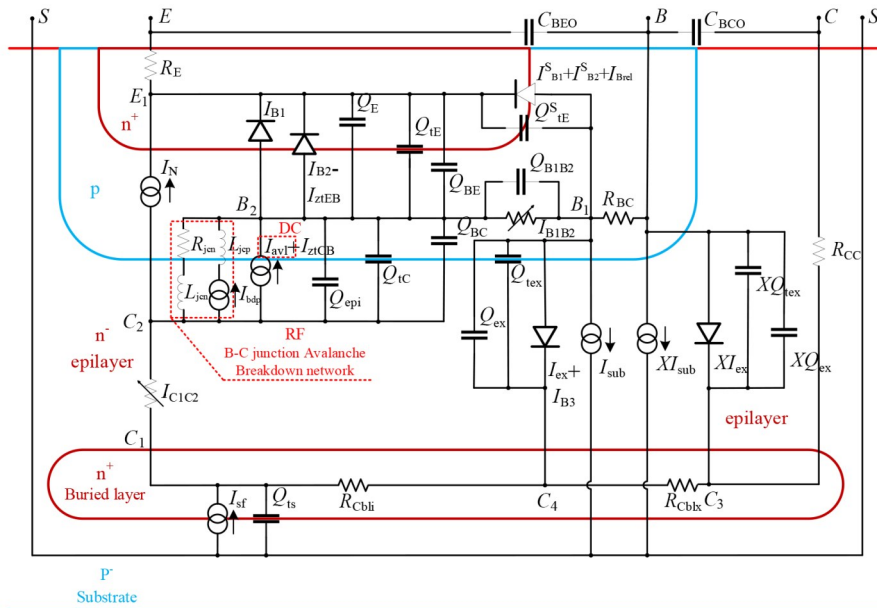


图 3 射频条件下嵌入电感击穿等效模型的 Mextram 505.00

基于 S 参数对改进模型进行验证, 当 RF 电感击穿等效电路网络嵌入到 Mextram 505.00 模型后, 通过在多个偏置点拟合 S 参数并提取敏感参数来验证改进模型的准确性. 器件在基极开路情况下的击穿电压 ( $BV_{CE0}$ ) 在 3 V 左右, 在下面两种条件下对器件进行测试: 第一种条件  $V_{BE}$  为 900 mV 且  $V_{CE}$  为 4 V, 通过线性扫描 1~35 GHz 频率范围来测量 SiGe HBT 的 S 参数, 获得 35 个测试点; 第二种条件  $V_{BE}$  为 0.6~1.1 V 且  $V_{CE}$  为 4 V, 在

15 GHz 频率点下测量 SiGe HBT 的 S 参数, 获得 21 个测试点. 基于这两种测试条件对射频条件下集电结的雪崩倍增效应进行表征.

### 4 结果分析与验证

基于发射极-基极自对准双多晶硅工艺 SiGe HBT 对模型进行验证, SiGe HBT 器件结构如图 4 所示. 该结构采用浅沟槽 STI 进行隔离. 在主集电区中经过选择

性离子注入(SIC注入)形成N<sup>+</sup>掺杂的集电区. 采用自对准工艺刻蚀出基区窗口, 然后在窗口内外延SiGe层并淀积发射极多晶硅, 实现了基区与外基区, 基区与发射区的自对准, 降低了器件的寄生参数. 基于上述SiGe HBT器件, 从S参数、输出特性以及击穿电感和击穿电阻三个方面来验证改进后模型的精度.

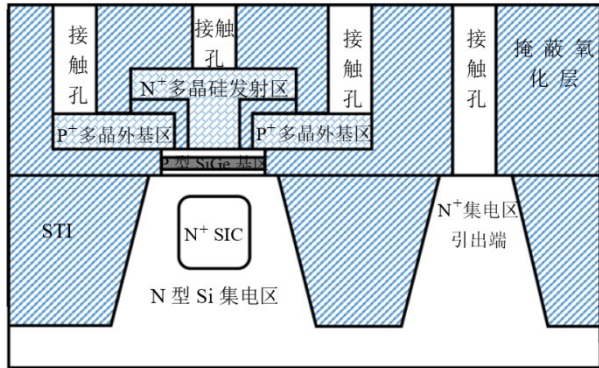


图4 双多晶硅结构SiGe HBT

### 4.1 模型验证——S参数

高电场雪崩倍增区域中载流子的产生速率不仅是电场的函数, 而且还是载流子浓度的函数. 由于载流子的产生速率与电压不一致, 当电场超过峰值后, 载流子的产生速率继续增大, 直到电场低于临界值. 也就是说, 虽然集电极电压已超过最大值, 但由于碰撞电离仍然存在, 载流子浓度将继续增大, 这会导致雪崩倍增相位延迟. 此后雪崩倍增产生的电子在电场作用下进入漂移区, 漂移区内存在强电场电子以饱和速度穿过该区域并产生传输时间延迟. 基于射频条件下的电感击穿等效电路模型来表述上述两种延迟带来的影响, 并通过S参数对改进后的模型进行验证<sup>[25]</sup>.

基于SiGe HBT的射频电路设计中, 雪崩倍增相位延迟效应带来的问题主要体现为输出阻抗 $S_{22}$ 不匹配. 本文首先基于 $S_{22}$ 参数对修正后的Mextram 505.00模型精度进行验证. 在频率范围小于35 GHz条件下, 设置发射结偏压 $V_{BE}$ 为900 mV集电结偏压 $V_{CE}$ 为4 V, 图5给出了Mextram模型改进前后输出阻抗参数 $S_{22}$ 实部的对比曲线. 从图5中可以看到, 改进模型的精度显著提高. 这进一步验证了改进模型中基于电感击穿等效电路的模型可以更加精确地表征SiGe HBT中集电结附近的延迟问题. 基于RMS相对误差系数来表示测量曲线和拟合曲线间的误差, 式(6)给出了RMS的计算方法, 其中sim为仿真数据, meas为测量数据.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \text{sim}_i - \text{meas}_i \right)^2 \right]}{N}} \quad (6)$$

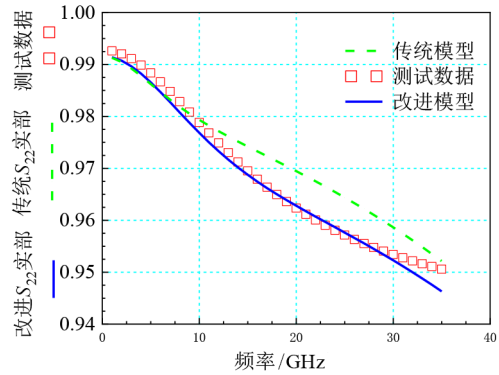


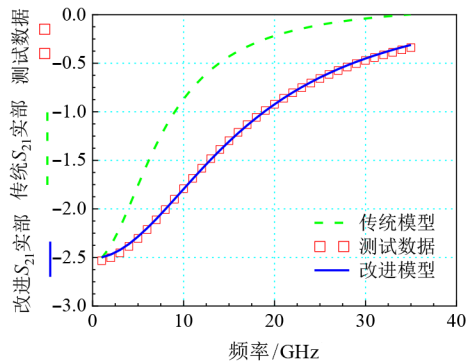
图5 模型改进前后输出阻抗参数 $S_{22}$ 实部的精度对比

在1~35 GHz范围内,  $S_{22}$ 参数实部的RMS误差如表1所示.

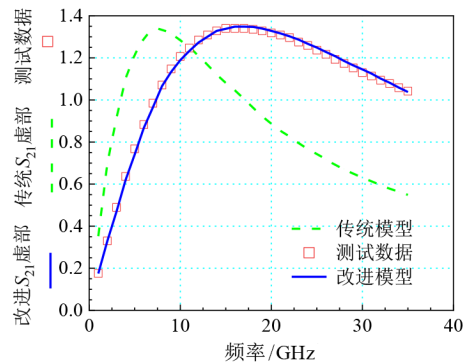
表1  $S_{22}$ 实部的RMS误差

模型参数	RMS
传统模型 $S_{22}$ 实部	495.5%
改进模型 $S_{22}$ 实部	167.7%

$S_{21}$ 为SiGe HBT的增益参数, 图6(a)和图6(b)分别给出了频率在1~35 GHz范围内( $V_{BE}$ 为900 mV,  $V_{CE}$ 为4 V), 射频条件下电感击穿等效电路模型引入前后SiGe HBT器件中 $S_{21}$ 实部和虚部的对比. 从图6中可以



(a)  $S_{21}$ 实部



(b)  $S_{21}$ 虚部

图6 模型改进前后 $S_{21}$ 实部和虚部的精度对比

看到模型改进后  $S_{21}$  的实部和虚部的精度均有了大幅提高. 在 1~35 GHz 范围内, 表 2 给出了  $S_{21}$  实部和虚部的 RMS 结果.

表 2  $S_{21}$  的 RMS 结果

模型参数	RMS
传统模型 $S_{21}$ 实部	70.58%
传统模型 $S_{21}$ 虚部	35.34%
改进模型 $S_{21}$ 实部	2.876%
改进模型 $S_{21}$ 虚部	1.732 3%

### 4.2 模型验证——直流特性

Mextram 505.00 模型中引入射频条件下的电感击穿等效电路模型后, 可以基于 SiGe HBT 的输出特性来实现对模型改进前后直流特性的验证. 图 7 为  $V_{BE}$  取值不同时 (850 mV, 910 mV, 935 mV, 960 mV, 985 mV) SiGe HBT 的输出曲线. 由图 7 可知在上述不同偏压条件下 SiGe HBT 输出电流  $I_C$  的拟合精度较高. 因此, 嵌入电感击穿等效电路模型的 Mextram 505.00 在表征 SiGe HBT 的直流特性时仍然具有较高的精确.

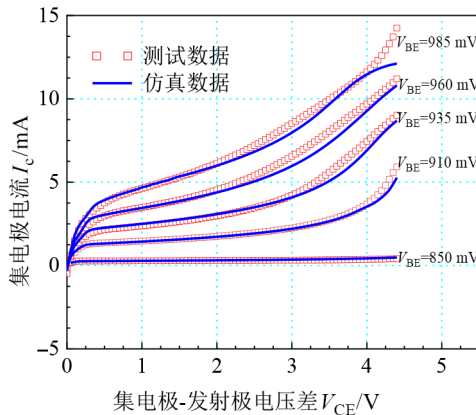


图 7 SiGe HBT 输出特性曲线

### 4.3 模型验证——电子击穿电感 $L_{jcn}$ 和电阻 $R_{jcn}$

改进模型中的电子击穿电感  $L_{jcn}$  和电阻  $R_{jcn}$  的值由式(3)和式(4)确定. 击穿电感和击穿电阻随电压  $V_{CB}$  的变化关系曲线分别如图 8 和图 9 所示. 由图可以看出, 击穿电感和击穿电阻的测试结果和仿真结果均有较好的一致性, 且都随着集电结偏压  $V_{CB}$  的增大而减小. 由式(3)和式(4)可知, 当碰撞电离率增大时, 电子击穿电感和击穿电阻均减小, 因此 SiGe HBT 集电结偏压增大时, 碰撞电离率增大, 电子击穿电感和击穿电阻均减小. 图 8 和图 9 的测试条件:  $V_{BE}$  为 0.6~1.1 V,  $V_{CE}$  为 4 V, 频率大小为 15 GHz. 表 3 给出了击穿电感和击穿电阻的 RMS 误差结果.

为了表征射频条件下集电结的雪崩击穿特性, 在

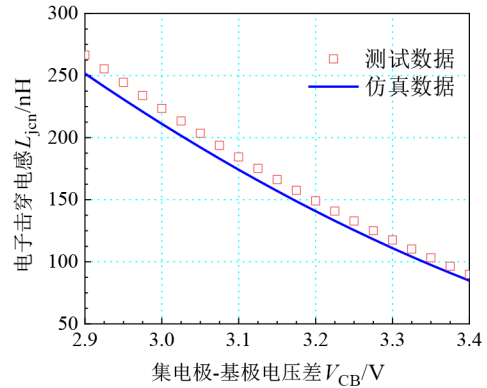


图 8 改进模型中  $L_{jcn}$  测试数据和仿真数据对比

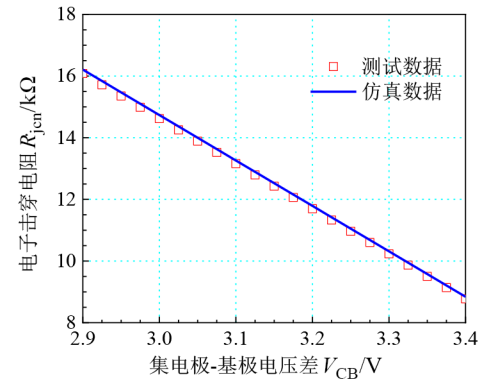


图 9 改进模型中  $R_{jcn}$  测试数据和仿真数据对比

表 3 电子击穿电感  $L_{jcn}$  和电阻  $R_{jcn}$  的 RMS 值

改进模型	RMS
$L_{jcn}-V_{CB}$	5.558%
$R_{jcn}-V_{CB}$	779.2%

Mextram 505.00 模型中设定 RF 常数参数 RFAVL 来表示射频条件下 SiGe HBT 集电结的碰撞电离效应. 根据式(1)~(5), 从改进模型中提取敏感参数雪崩倍增区的电压  $V_g$  和面积  $A_{em}$ . 首先确定初值(表 4), 在此基础上从 SiGe HBT 的 S 参数、输出特性以及击穿电感和击穿电阻等特性曲线进行拟合, 提取结果如表 5 所示.

表 4 初值设定

参数	初值
RFAVL	1.0
$A_{em}/\mu\text{m}^2$	1.0
$V_g/V$	3.0

表 5 参数提取结果

参数	初值
$A_{em}/\mu\text{m}^2$	1.026
$V_g/V$	2.925

从表 5 中可以看出, 拟合得到的碰撞电离区域的面积略大于给定的参数初值, 这主要由捕获载流子的缺

陷导致. 产生的载流子数量取决于碰撞电离区域的面积, 因此需要更大的碰撞电离区域的面积来补偿由于缺陷所减小的载流子.

当 SWAVL=1 时, 传统 Mextram 505.00 采用电流源  $I_{avl}$  表示直流条件下集电结附近的雪崩倍增电流. 为了更好地表征施加 DC 信号和 RF 信号时集电结的雪崩倍增效应, 改进模型中设置常数参数 SWAVL 和 RFAVL 来控制 DC 电流源  $I_{avl}$  和 RF 电感击穿等效电路网络是否被激活. 新提出的 RF 电感击穿等效电路网络不仅适用于 Mextram 模型, 也可以应用到 VBIC 和 HICUM 等工业标准紧凑模型中. 当施加 RF 信号时, 本文提出的具有电感击穿等效电路网络的改进模型可以准确地描述击穿区域中射频条件下的电感延迟特性.

## 5 总结

基于 Mextram 505.00 模型对射频条件下 SiGe HBT 集电区附近的雪崩倍增机理进行研究, 采用射频条件下的电感击穿等效电路模型来表述 SiGe HBT 集电结附近的电感延迟特性. 在改进模型中基于击穿电感 ( $L_{jcn}, L_{jcp}$ ) 和击穿电阻 ( $R_{jcn}, R_{jcp}$ ) 来表征集电结附近射频条件下的电感延迟和雪崩倍增载流子的贡献. 在 1~35 GHz 频率范围内, 改进模型显著改善了 SiGe HBT 的增益和输出阻抗的精度, 且不会对器件模型的直流特性拟合精度产生负面影响. 同时从改进模型的电子击穿电感  $L_{jcn}$ 、电子击穿电阻  $R_{jcn}$ 、输出曲线、增益参数和输出阻抗中提取等效电路的敏感参数  $A_{em}$  和  $V_g$ . 结果表明, 射频条件下基于电感击穿等效电路的 Mextram 505.00 改进模型可以更精确地表征 RF 情况下集电区附近碰撞电离增强时硅锗异质结双极晶体管的特性.

## 参考文献

- [1] SCHRÖTER M, ROSENBAUM T, CHEVALIER P, et al. SiGe HBT technology: Future trends and TCAD-based roadmap[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6): 1068-1086.
- [2] QAYYUM J A, ALBRECHT J D, ULUSOY A C. A compact V-band upconversion mixer with -1.4-dBm OP1dB in SiGe HBT technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(4): 276-278.
- [3] ÇALIŞKAN C, KALYONCU I, YAZICI M, et al. Ultra-low noise amplifier for X-band SiGe BiCMOS phased array applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(9): 1507-1511.
- [4] DEL RIO D, GURUTZEAGA I, BERIAIN A, et al. A compact, wideband, and temperature robust 67 - 90 GHz SiGe power amplifier with 30% PAE[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(5): 351-353.
- [5] JU I, CRESSLER J D. A highly efficient X-band inverse class-F SiGe HBT cascode power amplifier with harmonic-tuned Wilkinson power combiner[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 65(11): 1609-1613.
- [6] 宋建军, 杨超, 朱贺, 等. SOI SiGe HBT 结构设计及频率特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(11): 118501.  
SONG J J, YANG C, ZHU H, et al. Structure design and frequency characteristics of SOI SiGe HBT[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 118501. (in Chinese)
- [7] BÄRWOLF F, FURSENKO O, ZAUMSEIL P, et al. Dynamic SIMS, spectroscopic ellipsometry and X-ray diffraction analysis of SiGe HBTs with Ge grading[J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(1): 014005.
- [8] 徐小波, 张林, 王晓艳, 等. Si 和 SiGe 三极管 Early 效应模型及在电路仿真器中的应用综述[J]. 电子学报, 2016, 44(7): 1763-1771.  
XU X B, ZHANG L, WANG X Y, et al. Review on early effect model of Si and SiGe transistors and applications to circuit simulators[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(7): 1763-1771. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y X, LIANG W F, SAKALAS P, et al. 12-mW 97-GHz low-power downconversion mixer with 0.7-V supply voltage[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(4): 279-281.
- [10] ZHANG J X, GUO H X, PAN X Y, 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.
- [11] ILDEFONSO A, TZINTZAROV G N, NERGUI D, et al. Comparison of single-event transients in SiGe HBTs on bulk and thick-film SOI[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(1): 71-80.
- [12] ÓHANNIDH B, COYNE E, LANE B, et al. A Tunable bipolar: Investigation of effects and a MEXTRAM based VerilogA model adaptation of field effect electrode influenced high voltage sige HBTs[C]//2017 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). Miami: IEEE, 2017: 90-93.
- [13] LEE C I, LIN W C, LIN Y T. A new method to determine avalanche multiplication factor using vector network analyzer for p-n junctions[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(9): 646-648.
- [14] VYAS P B, PIMPARKAR N, TU R, et al. Reliability-

- conscious MOSFET compact modeling with focus on the defect-screening effect of hot-carrier injection[C]//2021 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). Monterey: IEEE, 2021: 1-4.
- [15] ZHANG H Y, NIU G F, WILLEMSSEN M B, et al. Improved compact modeling of SiGe HBT linearity with MEXTRAM[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(6): 2597-2603.
- [16] NIU G F, LI Y A, DING X W, et al. RF linearity of SiGe HBT: Physics, compact modeling using mextram 505 and X-parameter based measurements[C]//2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). Chengdu: IEEE, 2021: 1-3.
- [17] SOTSKOV D I, KUZNETSOV A G, ELESIN V V, et al. SOI CMOS, SiGe BiCMOS, GaAs HBT and GaAs PHEMT technologies characterization for radiation-tolerant microwave applications[C]//2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Kazan: IEEE, 2021: 1-4.
- [18] COEN C T, FROUNCHI M, LOURENCO N E, et al. A 60-GHz SiGe radiometer calibration switch utilizing a coupled avalanche noise source[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(4): 417-420.
- [19] LEE C I, PAN D S. Theory for high Q p-n junction avalanche inductors[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(1): 013501.
- [20] ELTA M E, HADDAD G I. Mixed tunneling and avalanche mechanisms in p-n junctions and their effects on microwave transit-time devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1978, 25(6): 694-702.
- [21] 刘静, 刘茵. 一种基于 Mextram 模型 RF 雪崩效应建模方法: CN111881635A[P]. 2020-11-03.  
LIU J, LIU Y. RF avalanche Effect Modeling Method Based on Mextram Model: CN111881635A[P]. 2020-11-03. (in Chinese).
- [22] LEE C I, LIN Y T, SU B R, et al. SiGe HBT large-signal table-based model with the avalanche breakdown effect considered[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(1): 75-82.
- [23] LEE C I, LIN Y T, LIN W C. Investigation of time-domain locus of SiGe HBTs in the avalanche region by using the X-parameter measurement under large-signal drive [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(5): 464-466.
- [24] NIU G, CRESSLER J D, GOGINENI U, et al. Collector-base junction avalanche multiplication effects in advanced UHV/CVD SiGe HBTs[J]. IEEE Electron Device Letters, 1998, 19(8): 288-290.
- [25] WEN J H, WEI J X, SONG Q, et al. Design and simulation of strained Si/SiGe HBT architecture with uniaxially-stressed collector[C]//2021 International Symposium on Devices, Circuits and Systems (ISDCS). Higashihiroshima: IEEE, 2021: 1-4.

#### 作者简介



刘 静 女, 1982 年生, 安徽临泉人. 西安理工大学副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为新型半导体器件及其应用.  
E-mail: jingliu@xaut.edu.cn



郑少华 男, 1994 年生, 陕西咸阳人. 西安理工大学硕士研究生. 主要研究方向为新型半导体器件建模及应用.