

具有高频高压大电流优值的超结集电区 SiGe HBT

金冬月¹, 王肖¹, 张万荣¹, 高光渤², 赵馨仪¹, 郭燕玲¹, 付强¹

(1. 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124; 2. 美国 International Rectifier 公司, 加利福尼亚 90245)

摘要: 为了在兼顾特征频率(f_T)和电流增益(β)的情况下有效提高器件的击穿电压(BV_{CBO}/BV_{CEO}), 利用 SILVACO TCAD 建立了 npn 型超结集电区 SiGe 异质结双极晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)的器件模型. 研究表明: 通过在集电结空间电荷区(collector-base space charge region, CB SCR)内引入 p 型超结层可有效降低“死区”内的电场强度, 使较高的电场强度转移至“死区”外较深的 CB SCR 内, 进而在几乎不增加 CB SCR 宽度的情况下抑制碰撞电离, 达到提高击穿电压、改善 f_T 和 β 的目的. 随着 p 型超结层厚度(d_p)的增加, 击穿电压 BV_{CBO} 和 BV_{CEO} 的改善也越明显. 但 d_p 值需优化, 较大的 d_p 值将引发 Kirk 效应, 大幅降低器件的 f_T 和 β . 进一步通过优化 p 型超结层的 d_p 值, 设计出一款 d_p 为 0.2 μm 且具有高频高压大电流优值($f_T \times BV_{CEO} \times \beta$)的新型超结集电区 SiGe HBT. 结果表明: 与传统 SiGe HBT 相比, 新器件的 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值改善高达 35.5%, 有效拓展了功率 SiGe HBT 的高压大电流工作范围.

关键词: SiGe 异质结双极晶体管(HBT); 超结; 击穿电压

中图分类号: TN 385

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)07-0994-07

doi: 10.11936/bjtxb2015120055

Superjunction Collector SiGe HBT With Figure of Merit of High Frequency High Voltage and High Current

JIN Dongyue¹, WANG Xiao¹, ZHANG Wanrong¹, GAO Guangbo², ZHAO Xinyi¹,
GUO Yanling¹, FU Qiang¹

(1. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. International Rectifier Corporation, California 90245, USA)

Abstract: To enhance the breakdown voltages (BV_{CBO}/BV_{CEO}) at a fixed cutoff frequency (f_T) and current gain (β), a model of npn SiGe heterojunction bipolar transistor (HBT) with superjunction collector was established by SILVACO TCAD. The research shows that the p-type superjunction layer inside the collector-base (CB) space charge region (SCR) lowers the electric field in the “dead space region”, and shifts the part of the high electric field somehow deep into the CB SCR which is located at the outside of the “dead space region”. As a result, impact ionization is suppressed, whereas the width of the CB SCR is slightly increased, and hence the breakdown voltages are improved at a minor expense of f_T and β . As the increase of the thickness of p-type superjunction layer (d_p), the breakdown voltages including BV_{CBO} and BV_{CEO} are improved more obviously. However, d_p also needs to be optimized, considering that larger d_p would lead to Kirk effect and give rise to a dramatic decrease of f_T and β . Furthermore, the value of d_p in p-type superjunction layer is optimized as 0.2 μm for a novel superjunction

收稿日期: 2015-12-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2015M580951); 北京市博士后科学基金资助项目(2015ZZ-11)

作者简介: 金冬月(1980—), 女, 副教授, 主要从事异质结器件和半导体功率器件方面的研究, E-mail: dyjin@bjut.edu.cn

collector SiGe HBT with figure of merit of high frequency high voltage and high current ($f_T \times BV_{CEO} \times \beta$). Compared with the conventional SiGe HBT, the figure of merit of $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ for the novel device is markedly improved by 35.5%, which effectively develops the high voltage and high current application of power SiGe HBT.

Key words: SiGe heterojunction bipolar transistor (HBT); superjunction; breakdown voltage

SiGe 异质结双极晶体管 (heterojunction bipolar transistors, HBTs) 在具有大电流增益、高厄尔利电压的同时,还具有优异的高频特性,现已广泛应用于移动电话、蓝牙、卫星导航、相控阵天线、汽车雷达等射频和微波电路中^[1-3]。特别是随着第 4 代 SiGe 工艺的全面提升, SiGe HBT 将在毫米波雷达、太赫兹成像和传感系统、100 Gbit/s 高速通信系统等领域发挥越来越重要的作用^[4-6]。通过不断优化 SiGe HBT 的横、纵向结构尺寸,虽可显著提升频率特性,却不可避免地导致器件击穿电压的大幅降低 ($BV_{CEO} < 6\text{ V}$, $BV_{CEO} < 2\text{ V}$)^[7-9],从而严重限制了高频系统的输出功率,影响射频系统的信噪比。

为改善器件的击穿电压,Chen^[10]早在 20 世纪 90 年代就提出复合缓冲层,即超结结构,来解决“硅极限”问题。近期陈星弼院士课题组又展开了掺杂浓度分布可变的新型超结结构研究^[11]。然而上述超结结构重点针对功率 MOSFET 进行设计,虽可借鉴到 SiGe HBT 的集电区设计中,但由于该超结结构与集电结呈垂直分布,在有效提高击穿电压的同时,将显著增大集电结空间电荷区渡越时间(τ_{scr}),进而大幅退化器件的高频特性^[12-13]。随后,一种与集电结平行的新型超结结构被提出用于设计微波功率 SiGe HBT^[14-15]。上述工作重点研究了超结结构掺杂浓度及其分布对击穿电压的影响,旨在牺牲较小特征频率(f_T)的前提下改善器件的击穿特性,并没有研究超结结构对器件电流增益(β)的影响。然而,由“约翰逊极限”^[16]可知,微波晶体管通常需要工作在较大的电流密度下,较大的电流增益还可用于折中基极电阻,进而提高器件的高频特性^[17]。因此,本文重点对同时具有高击穿电压、高特征频率和高电流增益的新型超结集电区 SiGe HBT 展开研究,通过优化设计超结层厚度,降低集电结及其附近的电场强度和电子温度,进而在几乎不扩展集电结空间电荷区宽度的情况下抑制碰撞电离,达到提高击穿电压、改善特征频率和电流增益的目的,最终设计出一款具有高频高压大电流优势($f_T \times BV_{CEO} \times \beta$)的新型超结集电区 SiGe

HBT。本文研究工作对拓展 SiGe HBT 在微波大功率领域的应用具有重要的理论意义。

1 器件建模

本文采用商业半导体仿真工具 SILVACO TCAD 的二维工艺仿真器 ATHENA 建立了 npn 型超结集电区 SiGe HBT 器件模型,如图 1 所示。该模型通过在集电结 (collector-base, CB) 空间电荷区 (space-charge region, SCR) 内引入反向掺杂的 p 型超结层,来形成新型的超结集电区结构,其中 n^- 集电区的杂质浓度 N_c 为 $1 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, p 型超结层的杂质浓度 N_p 为 $2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$,厚度 d_p 为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。超结集电区 SiGe HBT 的杂质浓度分布如图 2 所示。为便于比较,本文还建立了传统 SiGe HBT 的器件模型,除集电区外,其他的杂质浓度分布均保持一致。进一步利用二维器件仿真器 ATLAS 对器件的电学特性进行仿真,其中加入了 Selberherr 碰撞电离模型 (selb)、能量平衡传输模型 (hete)、迁移率受杂质浓度影响模型 (conmob)、迁移率受电场影响模型 (fldmob)、与浓度和温度有关的迁移率模型 (analytic)、禁带变窄模型 (bgn),同时还加入了 SRH 复合模型、俄歇复合模型 (auger) 以及依赖于杂质浓度的载流子寿命模型 (conshr)。

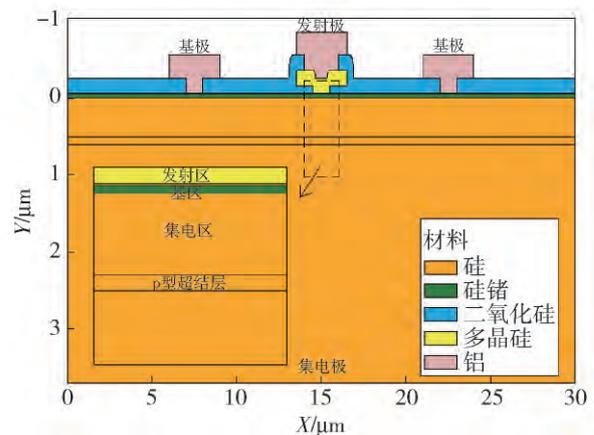


图 1 超结集电区 SiGe HBT 器件模型

Fig. 1 Device model of superjunction collector SiGe HBT

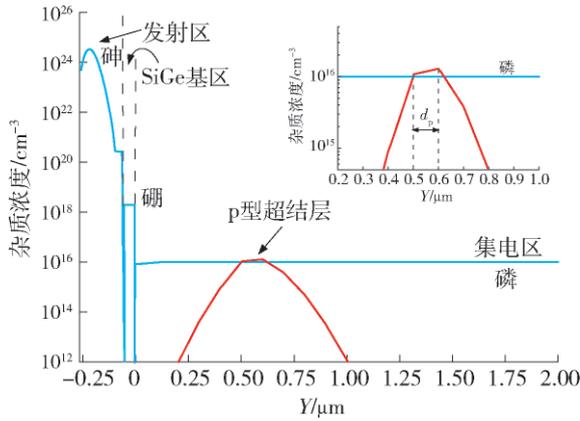


图2 超结集电区 SiGe HBT 杂质浓度分布

Fig. 2 Doping profile of superjunction collector SiGe HBT

2 模拟和分析

基于上述器件模型,本文模拟得到 npn 型超结集电区 SiGe HBT (HBT-2) 的电场强度 (E) 和电子温度 (T_n) 分布,并与传统 SiGe HBT (HBT-1) 进行了比较,如图 3 所示. 考虑非本征碰撞电离效应的影响,当电子从发射区注入到 CB SCR 边界后,将在位于集电结峰值电场和峰值电子温度之间“死区”内电场的作用下不断加速,使得 T_n 越来越高,当 T_n 所对应的电子动能达到电子电离的临界能时,就会触发碰撞电离,导致器件发生雪崩击穿^[18]. 可见,碰撞电离与“死区”内的电场分布有关,在“死区”外侧的集电区内的电场强度即使再增大,也不会对 CB SCR 内的碰撞电离产生影响. 因此,从提高器件击穿电压的角度出发,一方面需要降低“死区”内的电场强度,另一方面需要将高电场适当转移至较深的 CB SCR 内.

从图 3 可以看出,与 HBT-1 相比,HBT-2 的集电结峰值电场降低了 25.9 kV/cm,峰值电子温度降低了 678.4 K,且 HBT-2 具有更为平缓的集电区电场分布. 这是因为对于 HBT-2 来说,一方面由于 p 型超结层与靠近基区侧的 n^- 型集电区的相互耗尽,将产生与集电结电场方向相反的少子减速电场,从而降低了“死区”内的电场强度;另一方面 p 型超结层与靠近 n^+ 衬底侧的 n^- 型集电区的相互耗尽,将产生与集电结电场方向相同的少子加速电场,从而使电场强度在较深的 CB SCR 内有所升高. 进一步给出了上述 2 种器件集电极电流 (I_C) 随集电结电压 (V_{CB}) 的变化关系曲线,如图 4 所示. 可以看出,与 HBT-1 相比,HBT-2 的 BV_{CBO} 提高了 5.0 V,改善达 9.5%.

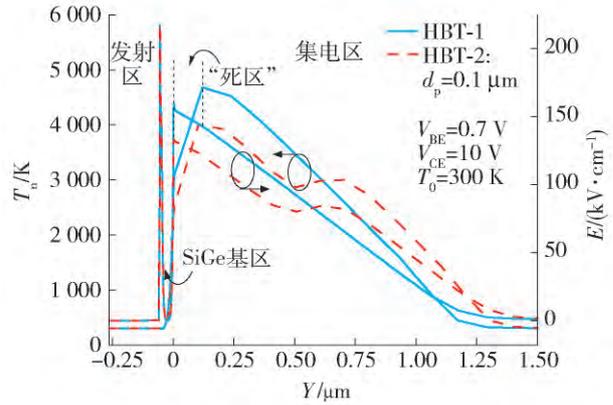


图3 2种 SiGe HBTs 电场强度 (E) 和电子温度 (T_n) 分布的比较

Fig. 3 Comparison of the distributions of electric field (E) and electron temperature (T_n) for two types of SiGe HBTs

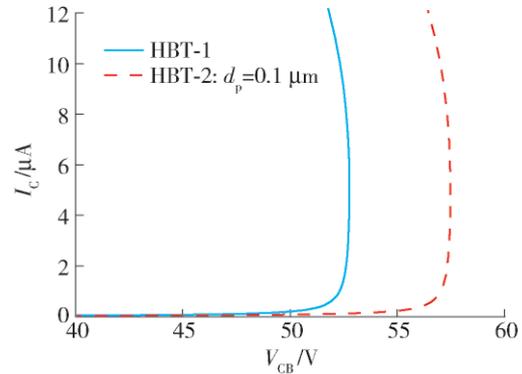


图4 2种 SiGe HBTs 集电极电流 (I_C) 随集电结电压 (V_{CB}) 的变化关系曲线

Fig. 4 Collector current (I_C) versus voltage of CB junction (V_{CB}) for two types of SiGe HBTs

根据能量平衡传输模型,电子的碰撞电离率 α_n 可表示为^[19]

$$\alpha_n = a \exp\left(\frac{-b}{E_{eff,n}}\right) \quad (1)$$

式中: a 、 b 为拟合参数; $E_{eff,n}$ 为有效电场强度.

考虑到非本征碰撞电离效应的影响, $E_{eff,n}$ 可表示为^[19]

$$E_{eff,n} = \frac{3}{2} \frac{kT_n}{qc} \quad (2)$$

式中 c 为电子饱和速度与其能量弛豫时间的乘积.

从式 (1) (2) 可以看出 α_n 与 T_n 呈 e 指数关系. 进一步给出 2 种 SiGe HBTs 电子碰撞电离率分布,如图 5 所示. 与 HBT-1 相比,随着 T_n 的降低,HBT-2 的峰值 α_n 从 154.1 cm^{-1} 减小为 36.9 cm^{-1} ,即有效

减少了单位距离内因碰撞而产生的载流子数量, 从而有利于提高器件的击穿电压 BV_{CEO} .

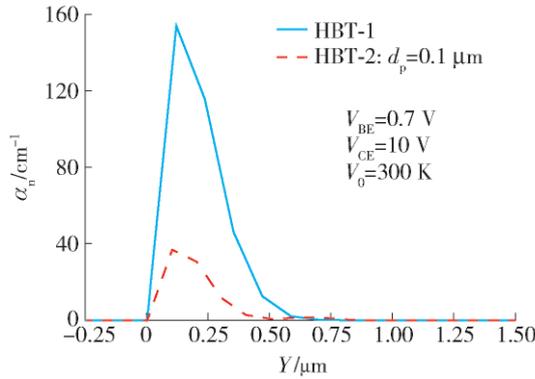


图 5 2 种 SiGe HBTs 的电子碰撞电离率 (α_n) 分布曲线

Fig. 5 Distributions of electron ionization coefficient (α_n) for two types of SiGe HBTs

图 6 给出了上述 2 种器件基极电流 (I_B) 随集电极-发射极间电压 (V_{CE}) 变化关系曲线. 可以看出, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的 BV_{CEO} 提高了 3.5 V, 改善高达 31.8%.

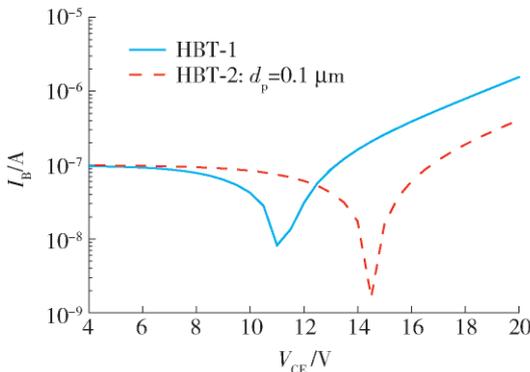


图 6 2 种 SiGe HBTs 基极电流 (I_B) 随集电极-发射极间电压 (V_{CE}) 的变化关系曲线

Fig. 6 Base current (I_B) versus voltage of collector-emitter (V_{CE}) for two types of SiGe HBTs

此外, 还给出了上述 2 种器件 f_T 和 β 随 I_C 的变化关系曲线, 如图 7 所示. 可以看出, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的峰值 f_T 仅下降了 1.8%. 这是由于 p 型超结层的引入, 使得 CB SCR 宽度仅略微增加, 相应增大了 CB SCR 的渡越时间 τ_{ser} , 进而导致器件频率特性的轻微退化. 同时, 与 HBT-1 相比, HBT-2 的峰值 β 仅下降了 3.6%, 仍保持了较高的电流处理能力.

由“约翰逊极限”^[16]可知 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值常用来表征功率晶体管的高频高压大电流特性. 本文提出的在集电区引入 p 型超结层的 HBT-2 可在牺

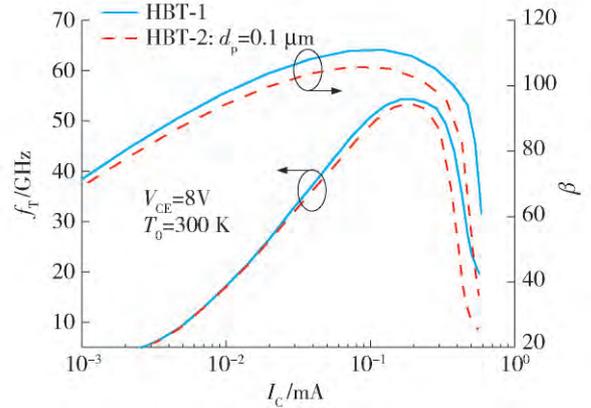


图 7 2 种 SiGe HBTs 特征频率 (f_T) 和电流增益 (β) 随集电极电流 (I_C) 的变化关系曲线

Fig. 7 Cutoff frequency (f_T) and current gain (β) versus collector current (I_C) for two types of SiGe HBTs

牲很少 f_T 和 β ($< 4.0\%$) 的情况下有效提高器件的击穿电压. 本文将进一步通过优化 p 型超结层厚度来提高器件的 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值.

图 8 给出了具有不同 p 型超结层厚度的 SiGe HBTs 在一定偏置状态下的电场分布曲线, 其中不同 p 型超结层厚度的 SiGe HBTs 的杂质浓度分布如图 9 所示. 可以看出, 随着 d_p 的增加, 靠近基区侧的集电结峰值电场逐渐降低, 而靠近 n^+ 衬底侧较深 CB SCR 内的电场分布则逐渐升高. 当 d_p 增大为 0.2 μm (HBT-3) 时, 在整个 CB SCR 内器件具有最低的峰值电场, 此时集电区电场分布趋于平缓, 有利于器件承受更高的击穿电压. 当 d_p 继续增大为 0.5 μm (HBT-4) 时, 虽然靠近基区侧的集电结电场进一步降低, 即 BV_{CBO} 进一步提高, 但器件的集电结峰值电场已经完全移至深 CB SCR 内, 这将引发 Kirk 效应^[20], 进而显著降低器件的电流增益和特征频率.

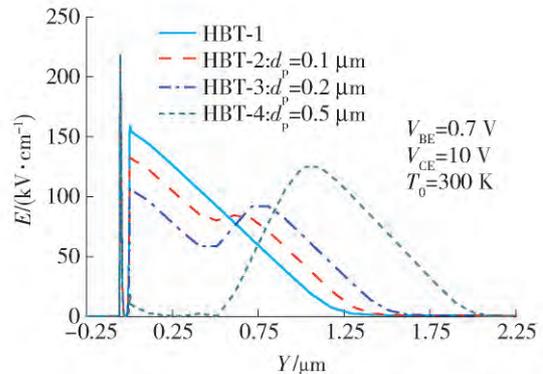


图 8 具有不同 p 型超结层厚度的 SiGe HBTs 的电场强度 (E) 分布曲线

Fig. 8 Distributions of electric field (E) for SiGe HBTs with different thickness of p-type superjunction layer

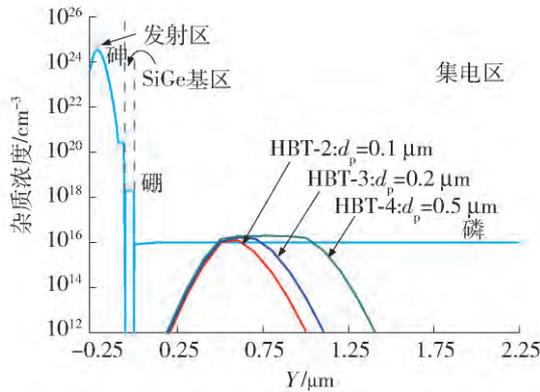


图9 具有不同p型超结层厚度的SiGe HBTs的杂质浓度分布

Fig. 9 Doping profiles for SiGe HBTs with different thickness of p-type superjunction layer

图10给出了上述4种器件 I_C 随 V_{CB} 的变化关系曲线. 可以看出随着 d_p 的增加, 器件 BV_{CBO} 的改善也越显著. 与HBT-1相比, HBT-2、HBT-3和HBT-4的 BV_{CBO} 分别提高了5.0、9.9、20.1 V, 改善分别达9.5%、18.9%、38.3%.

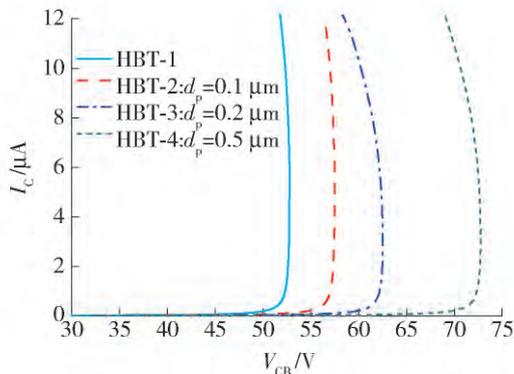


图10 4种SiGe HBTs集电极电流(I_C)随集电结电压(V_{CB})的变化关系曲线

Fig. 10 Collector current (I_C) versus voltage of CB (V_{CB}) junction for four types of SiGe HBTs

图11给出了上述4种器件在相同偏置状态下的电子温度分布曲线. 可以看出随着 d_p 的增加, 靠近基区侧的峰值电子温度逐渐降低, 而靠近 n^+ 衬底侧较深CB SCR内的电子温度则逐渐升高. 当 d_p 增大为0.2 μm时, 在整个CB SCR内器件具有最低的峰值电子温度, 此时集电区电子温度分布趋于平缓. 当 d_p 继续增大为0.5 μm时, 峰值电子温度已经完全移至深CB SCR内. 进一步给出上述4种器件的电子碰撞电离率分布曲线, 如图12所示. 随着 d_p 的增加, 位于“死区”内的 α_n 相应减小, 且当 d_p 超过

0.2 μm后, 峰值 α_n 已减小为 3.5 cm^{-1} , 再通过增大 d_p 来减小 α_n 意义不大.

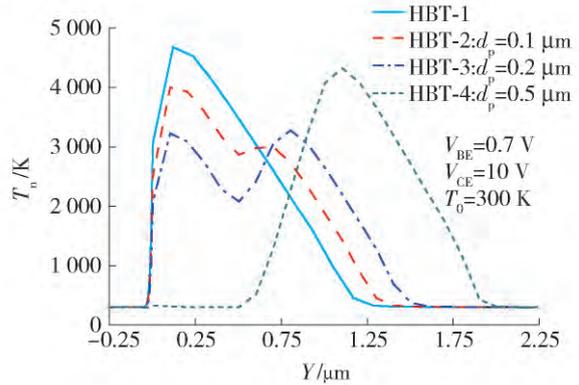


图11 4种SiGe HBTs的电子温度(T_n)分布曲线

Fig. 11 Distributions of electron temperature (T_n) for four types of SiGe HBTs

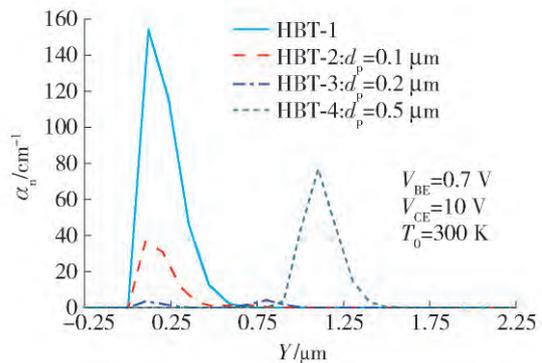


图12 4种SiGe HBTs的电子碰撞电离率(α_n)分布曲线

Fig. 12 Distributions of electron ionization coefficient (α_n) for four types of SiGe HBTs

相应地, 上述4种器件 I_B 随 V_{CE} 的变化关系曲线如图13所示. 可以看出随着 d_p 的增加, 器件 BV_{CEO} 的改善也越显著, 当 d_p 超过0.2 μm后, 由于峰值 α_n 已几乎不变, 因此器件 BV_{CEO} 的改善幅度也将达到最大. 与HBT-1相比, HBT-2、HBT-3和HBT-4的 BV_{CEO} 分别提高了3.5、7.5、7.5 V, 改善分别达31.8%、68.2%、68.2%.

此外, 还给出了上述4种器件的 f_T 和 β 随 I_C 的变化关系曲线, 分别如图14、15所示. 可以看出随着 d_p 的增加, 器件的峰值 f_T 和峰值 β 均有不同程度的下降. 当 d_p 增大为0.2 μm时, 器件在提高击穿电压的同时仍保持了较高的 f_T 和 β . 而当 d_p 继续增大为0.5 μm时, 由于引发Kirk效应, 使CB SCR大幅展宽, 从而使 f_T 和 β 大幅下降.

最后, 对上述4种器件的主要性能参数(包括 BV_{CBO} 、 BV_{CEO} 、 f_T 、 β 和 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值)进行了汇

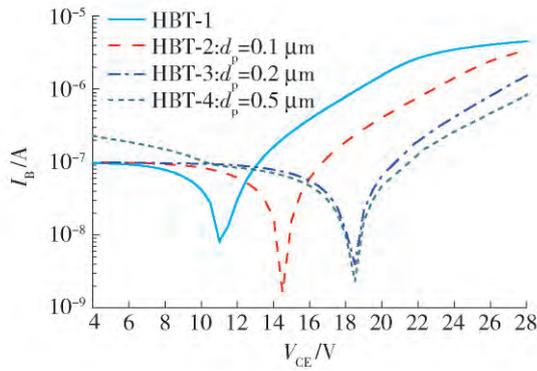


图 13 4 种 SiGe HBTs 基极电流 (I_B) 随集电极-发射极间电压 (V_{CE}) 的变化关系曲线

Fig. 13 Base current (I_B) versus voltage of collector-emitter (V_{CE}) for four types of SiGe HBTs

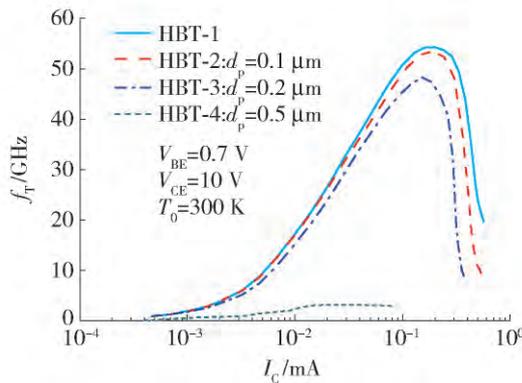


图 14 4 种 SiGe HBTs 特征频率 (f_T) 随集电极电流 (I_C) 的变化关系曲线

Fig. 14 Cutoff frequency (f_T) versus collector current (I_C) for four types of SiGe HBTs

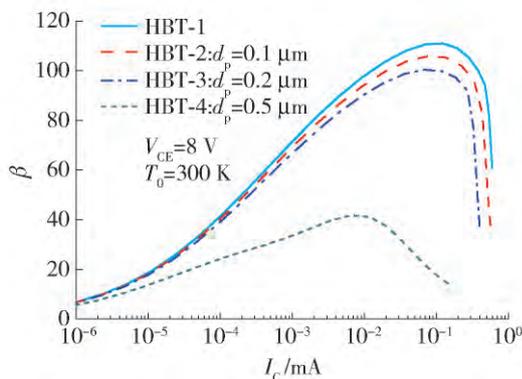


图 15 4 种 SiGe HBTs 电流增益 (β) 随集电极电流 (I_C) 的变化关系曲线

Fig. 15 Current gain (β) versus collector current (I_C) for four types of SiGe HBTs

总 如表 1 所示. 可以看出, 随着 d_p 的增加, 器件的

$f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值呈现先增大后减小的趋势. 其中, 当 d_p 增大为 $0.2 \mu\text{m}$ (HBT-3) 时, 在整个 CB SCR 内器件具有最低的峰值电场, 此时集电区电场分布趋于平缓, 峰值 α_n 已减小为 3.5 cm^{-1} , 因此器件的 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值最高, 达到 $89\,355 \text{ GHz} \cdot \text{V}$, 与 HBT-1 相比, 优值改善高达 35.5% , 这将有效拓展微波功率 SiGe HBT 的高压大电流工作范围.

表 1 4 种 SiGe HBTs 的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of the four types of SiGe HBTs

器件	HBT-1	HBT-2	HBT-3	HBT-4
$d_p/\mu\text{m}$	0	0.1	0.2	0.5
BV_{CBO}/V	52.5	57.5	62.4	72.6
BV_{CEO}/V	11.0	14.5	18.5	18.5
$f_T/\text{GHz} (V_{CE}=8 \text{ V})$	54.5	53.5	48.3	3.2
$\beta (V_{CE}=8 \text{ V})$	110	106	100	42
$f_T \times BV_{CEO} \times \beta /(\text{GHz} \cdot \text{V})$	65 945	82 230	89 355	2 486

3 结论

1) 为改善微波功率 SiGe HBT 的高频高压大电流特性, 本文通过在集电结空间电荷区 (CB SCR) 内引入 p 型超结层, 开展了一种与集电结平行的新型超结集电区结构设计研究. 研究表明, 由于引入的 p 型超结层与相邻 n^- 型集电区相互耗尽, 将在靠近基区侧的“死区”内引入少子减速电场来有效降低集电结峰值电场强度, 同时在靠近 n^+ 衬底侧较深 CB SCR 内引入少子加速电场来改善电场分布, 进而在略微增加 CB SCR 宽度的情况下抑制碰撞电离, 提高器件的击穿电压. 与传统 SiGe HBT 相比, d_p 为 $0.1 \mu\text{m}$ 的器件的 BV_{CBO} 和 BV_{CEO} 分别改善了 9.5% 和 31.8% , 且 f_T 和 β 的下降幅度很小 ($<4.0\%$).

2) 进一步通过优化 d_p 来提高器件的高频高压大电流优值 ($f_T \times BV_{CEO} \times \beta$). 结果表明, 随着 d_p 的增加, 对击穿电压的改善也越显著, 当 d_p 增大为 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 器件在整个 CB SCR 内具有最低的峰值电场, 此时集电区电场分布趋于平缓, 峰值 α_n 已减小为 3.5 cm^{-1} , 具有最高的 $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值, 达到 $89\,355 \text{ GHz} \cdot \text{V}$, 与传统 SiGe HBT 相比, 优值改善高达 35.5% .

3) 随着 d_p 的进一步增大, 集电结峰值电场将移至深 CB SCR 内, 引发 Kirk 效应, 使 CB SCR 大幅展宽, 进而显著降低器件的 f_T 和 β , $f_T \times BV_{CEO} \times \beta$ 优值将随之大幅降低.

参考文献:

- [1] PORRANZL M, WAGNER C, JAEGER H, et al. An active quasi-circulator for 77 GHz automotive FMCW radar systems in SiGe technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(5): 313-315.
- [2] SARMAH N, CHEVALIER P, PFEIFFER U R. 160-GHz power amplifier design in advanced SiGe HBT technologies with P_{sat} in excess of 10 dBm [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(2): 939-947.
- [3] ÖZTÜRK E, NEMATI M H, KAYNAK M, et al. SiGe process integrated full-360° microelectromechanical systems-based active phase shifter for W-band automotive radar [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(11): 835-841.
- [4] CARDOSO A S, OMPRAKASH A P, CHAKRABORTY P S, et al. On the cryogenic RF linearity of SiGe HBTs in a fourth-generation 90-nm SiGe BiCMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(4): 1127-1135.
- [5] PEKARIK J J, ADKISSON J, GRAY P, et al. A 90 nm SiGe BiCMOS technology for mm-wave and high-performance analog applications [C]//2014 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Coronado, CA: IEEE, 2014: 92-95.
- [6] STATNIKOV K, GRZYB J, HEINEMANN B, et al. 160-GHz to 1-THz multi-color active imaging with a lens-coupled SiGe HBT chip-set [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 63(2): 520-532.
- [7] SCHRÖTER M, WEDEL G, HEINEMANN B, et al. Physical and electrical performance limits of high-speed SiGeC HBTs—part I: vertical scaling [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(11): 3687-3696.
- [8] SCHRÖTER M, KRAUSE J, RINALDI N, et al. Physical and electrical performance limits of high-speed SiGeC HBTs—part II: lateral scaling [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(11): 3697-3706.
- [9] 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.
- [10] CHEN X B. Semiconductor power devices with alternating conductivity types high-voltage breakdown regions: US052162753 [P]. 1993-06-01 [2015-12-22]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19930601&CC=US&NR=5216275A&KC=A.
- [11] LIN Z, HUANG H M, CHEN X B. An improved superjunction structure with variation vertical doping profile [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(1): 228-231.
- [12] JIN D Y, ZHAO X Y, ZHANG W R, et al. Novel superjunction collector power SiGe HBTs with high thermal stability [C]//2014 IEEE 12th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Guilin: IEEE, 2014.
- [13] 鲁东, 金冬月, 张万荣, 等. 新型宽温区高热稳定性微波功率 SiGe 异质结双极晶体管 [J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 104401.
- LU D, JIN D Y, ZHANG W R, et al. Novel microwave power SiGe heterojunction bipolar transistor with high thermal stability over a wide temperature range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104401. (in Chinese)
- [14] YUAN J H, CRESSLER J D. Design and optimization of superjunction collectors for use in high-speed SiGe HBTs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(6): 1655-1662.
- [15] FU Q, ZHANG W R, JIN D Y, et al. Collector optimization for tradeoff between breakdown voltage and cut-off frequency in SiGe HBT [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(11): 114402.
- [16] JOHNSON E O. Physical limitations on frequency and power parameters of transistors [C]//1958 IRE International Convention Record. New York: IEEE, 1966: 27-34.
- [17] PERSSON S, FJER M, ESCOBEDO-COUSIN E, et al. Strained-silicon heterojunction bipolar transistor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, 57(6): 1243-1252.
- [18] CRESSLER J D, NIU G F. Silicon-germanium heterojunction bipolar transistors [M]. London: Artech House, 2003: 128-131.
- [19] SILVACO, Inc. ATLAS user's manual [M]. Santa Clara, CA: SILVACO, Inc, 2010: 112-113.
- [20] SZE S M, NG K K. Physics of semiconductor devices [M]. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007: 259-261.

(责任编辑 吕小红)