

基于 MBE 的 f_{\max} 为 157 GHz 的 SiGe HBT 器件*

刘道广^{1,2,3} 郝 跃¹ 徐世六^{2,3} 李开成^{2,3} 刘玉奎^{2,3} 何开全^{2,3} 刘嵘侃^{2,3}
张 静^{2,3} 刘伦才^{2,3} 徐婉静^{2,3} 李荣强^{2,3} 陈光炳^{2,3} 徐学良^{2,3}

(1 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)

(2 中国电子科技集团电子 24 所, 重庆 400060)

(3 国家模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

摘要: 在模拟集成电路的应用中, 不仅注重器件 f_T , 而且注重晶体管最高振荡频率 (f_{\max}). 文中以 MBE 生长的 SiGe 材料为基础, 进行了提高 SiGe HBT 器件 f_{\max} 的研究, 研制出了 $f_{\max} = 157$ GHz 的 SiGe HBT 器件.

关键词: 自对准; 空气桥; SiGe 合金材料

EEACC: 2500; 2520; 2560J

中图分类号: TN323+.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)03-0528-04

1 引言

提高晶体管的截止频率 (f_T) 是集成电路制造者非常关注的问题. 在 Si 双极晶体管中, 提高 f_T 是难以克服的矛盾^[1]. SiGe 技术的发展, 在很大程度上, 提高了 SiGe 晶体管的 f_T . Si_{1-x}Ge_x 异质结晶体管, 可以通过改变 Ge 的组分 x , 在较大范围内精确调节 Si_{1-x}Ge_x 合金的禁带宽度 (E_g), 提高发射极的注入效率. 注入效率由以下公式决定:

$$\frac{I_n}{I_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \exp(-E_g/kT) \quad (1)$$

由(1)式可知: 通过调节 Si_{1-x}Ge_x 合金的禁带宽度 E_g , 可以大幅度提高注入效率, 并可提高电流放大系数 (β). 电流放大系数不完全取决于基区和发射区掺杂浓度的比值. 因此, 可以实现基区高掺杂浓度, 大幅度减少晶体管基区宽度, 有利于降低晶体管的噪声, 提高晶体管的截止频率 (f_T). 但是, 在模拟集成电路的运用中, f_{\max} 是非常重要的参数. 晶体管

的 f_{\max} 由以下公式决定:

$$f_{\max} = \frac{f_T}{\sqrt{8 C_{bc} R_b}} \quad (2)$$

由(2)式可知: f_{\max} 不仅与 f_T 有关, 而且与 C_{bc} 和 R_b 有关. R_b 和 C_{bc} 的减小, 依赖于具体的工艺. 国外采用超高真空 CVD 法^[2], 进行 SiGe 选择性外延, 用 0.2 μm 工艺, f_{\max} 可达到 180 GHz. 由于受设备条件的限制, 本文以 MBE 生长的 SiGe 材料为基础, 采用 0.5 μm 工艺, 进行了提高 SiGe HBT 器件 f_{\max} 的研究. 对不同器件结构进行的分析表明, 采用自对准结构有利于 f_{\max} 的提高, 并研制出了 $f_{\max} = 157$ GHz 的 SiGe HBT 器件.

2 器件的设计

SiGe HBT 器件的台面结构如图 1 所示. 该器件是非自对准台面 SiGe HBT. 其研制工艺是: 首先, 光刻发射区以外 n^+n^- Si, 基区以外 p^+ SiGe, PECVD SiO₂, 以及接触孔; 然后, 光刻金属引线. 由

* 国防预研基金资助项目 (批准号: 99J S09. 2. 2. DZ3401)

刘道广 男, 1964 年出生, 高级工程师, 博士研究生. 主要研究方向为超高速、超高频 SiGe HBT 器件及电路, A/D, D/A 转换器等.

郝 跃 男, 1958 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超深亚微米 VLSI 可靠性、理论与设计方法, 新型宽禁带半导体器件与关键技术, 以及系统集成 (SOC) 设计与设计方法学和 SiGe 器件等.

徐世六 男, 1956 年出生, 教授, 主要研究方向为半导体器件与电路, MEMS, SiGe HBT 器件及电路.

2004-03-22 收到, 2004-07-01 定稿

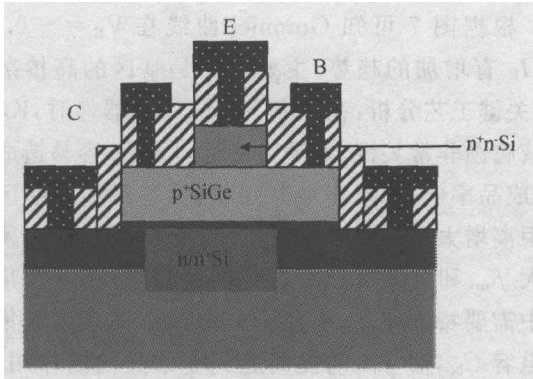


图 1 非自对准台面 SiGe HBT 结构示意图

Fig. 1 Profile of non-self-aligned mesa SiGe HBT structure

于受光刻套准偏差的限制,发射极与基极间必须保证一定的距离,因此, R_b 增大. 大的基区面积和高浓度的集电区 n^+ 层,导致 C_{bc} 电容增大,这两个因素严重影响了 f_{max} 的提高^[3,4]. 发射极与基极间自对准及空气桥工艺能大大减小 R_b 和 C_{cb} ,有利于 f_{max} 的提高,其器件结构如图 2 所示.

图 2 所示的器件结构是自对准台面 SiGe HBT,其工艺特点是采用金属掩蔽,实现发射极和基极间自对准,减小 R_b ,而空气桥技术减小 C_{bc} 电容.

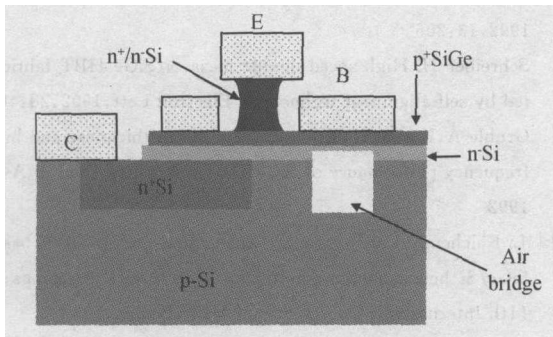


图 2 自对准台面 SiGe HBT 结构示意图

Fig. 2 Profile of self-aligned mesa SiGe HBT structure

3 SiGe HBT 器件制造工艺

采用 $0.5\mu\text{m}$ 发射极条,金属掩蔽,正胶工艺.采用 KOH 溶液和 SF_6 腐蚀 Si 和 SiGe,及采用剥离技术等关键工艺.

(1) 根据器件参数要求,用 MBE 外延法^[5,6],得到图 3 所示的外延层结构,将 Si 片进行严格的清洗和烘干.

(2) 光刻涂胶,曝光,固化,显影和金属前处理.

$n^+ \text{Si}, 1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}, 60 \text{nm}$
$n^- \text{Si}, 1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}, 30 \text{nm}$
$p^+ \text{SiGe}, 1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}, 35 \text{nm}, x = 30\%$
$n\text{Si}, 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}, 50 \text{nm}$
$p\text{-Si}$

图 3 台面 SiGe HBT 器件 MBE 结构示意图

Fig. 3 Diagram of MBE layer structure for mesa SiGe HBT

(3) 电子束蒸发 PtAuPt 金属作发射极引线,用超声剥离技术去除发射极引线以外的金属.然后,利用 PtAuPt 金属作发射极的掩蔽层,在 38°C 的温度下,用 KOH 溶液腐蚀 $n^+ n^- \text{Si}$ 层.由于 KOH 溶液腐蚀 Si 的速度大于腐蚀 SiGe 的速度,可以粗略地认为 KOH 溶液不腐蚀 SiGe,从而起到终点腐蚀控制作用.用 KOH 溶液腐蚀 $n^+ n^- \text{Si}$,露出基区 SiGe,由于 KOH 溶液腐蚀 $n^+ n^- \text{Si}$,存在侧向腐蚀,有利于基极和发射极之间自对准.然后,进行基区金属光刻.基区金属光刻的掩模版设计非常重要,基极金属掩模版一定要跨过发射极的金属条,蒸发基极金属的厚度小于 $n^+ n^- \text{Si}$ 的厚度,金属剥离后,基极和发射基之间实现了自对准,减少了基极电阻 R_b .接着用 SF_6 腐蚀 SiGe 层^[7],集电极光刻,集电极金属化, SF_6 腐蚀形成空气桥,完成晶体管的制造.台面 SiGe 晶体管的 SEM 图像如图 4 所示.

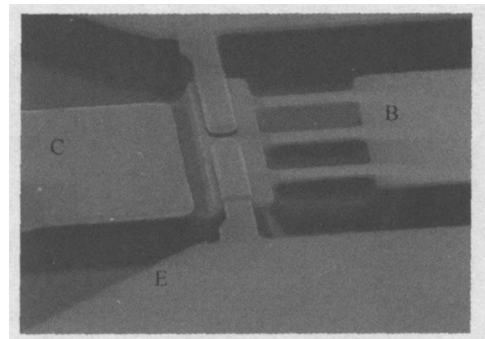


图 4 台面 SiGe HBT 器件 SEM 图像

Fig. 4 SEM microphotograph of mesa SiGe HBT

4 测试结果及分析

SiGe HBT 的特征频率很高,采用 S 参数测试系统进行裸芯片测试. S 参数测试系统示意图如图 5 所示.

对图 4 的结构进行裸芯片 S 参数测试,在 $V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 10\text{mA}$ 条件下,测试得到 $f_{max} = 157\text{GHz}$,

测试曲线如图 6 所示, SiGe HBT 的 Gummel 曲线如图 7 所示.

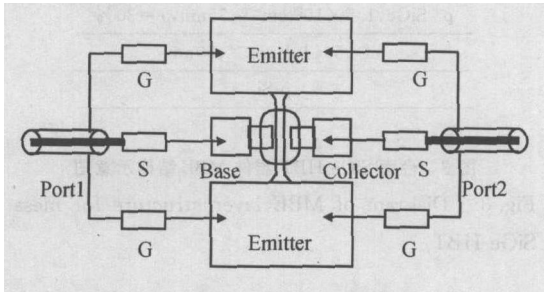


图 5 台面 SiGe HBT 参数测试示意图

Fig. 5 Diagram of measured parameter for mesa SiGe HBT

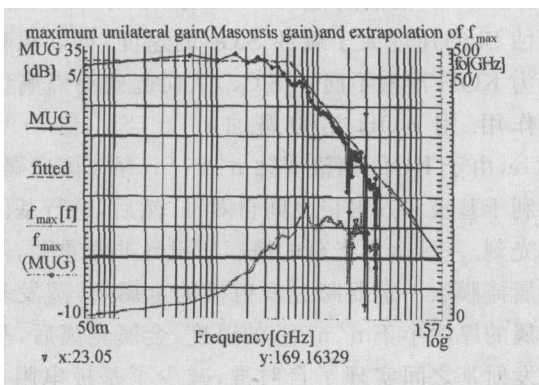


图 6 图 4 台面 SiGe HBT 的 $f_{max} = 157$ GHz 的测试结果

Fig. 6 Measured results of $f_{max} = 157$ GHz for mesa SiGe HBT in Fig. 4

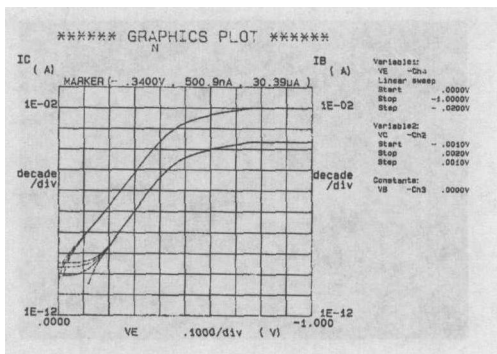


图 7 图 4 台面 SiGe HBT 的 Gummel 曲线图

Fig. 7 Gummel plot of mesa SiGe HBT in Fig. 4

根据图 7 可知 Gummel 曲线在 $V_E = -0.1V$ 时, I_b 有增加的趋势, 主要原因是基区的高掺杂所致. 关键工艺分析: 在研究 SiGe HBT 器件时, KOH 溶液腐蚀非常关键, 如果腐蚀时间太短, 容易造成短路, 成品率低; 如果腐蚀时间太长, 基区和发射区之间距离增大, R_b 增大, 使得 f_{max} 减小. 因此, 必须把增大 f_{max} 和提高成品率进行折衷处理, 在批量化生产中需要特别注意. 由于空气桥减小了基区和集电区电容 C_{bc} , 对 f_{max} 的提高起到非常关键的作用. 该研究表明: 基区与发射区自对准和空气桥技术有利于 f_{max} 的提高, 但是发射区的侧墙和空气桥的保护是一个关键问题, 对 SiGe IC 的研究至关重要.

参考文献

- [1] Li Kaicheng, Liu Daoguang, Zhang Jing, et al. Development on SiGe/ Si film heterojunction bipolar transistors. The 4th International Conference on Thin Film Physics and Applications, Shanghai, 2000
- [2] Washio K, Ohue E, Shimamoto H, et al. A 0.2 μ m 180 GHz- f_{max} 6.7-ps-ECL SOI/ HRS self-aligned SEG SiGe HBT/ CMOS technology for microwave and high-speed digital application. IEEE Trans Electron Devices, 2002, 49(2) :271
- [3] Gruhle A, Kibbel H, König U, et al. MBE grown Si/ SiGe HBTs with high f_T, f_{max} . IEEE Electron Device Lett, 1992, 13:206
- [4] Schreiber H. High-speed double mesa Si/ SiGe HBT fabricated by self-alignment technology. Electron Lett, 1992, 28:485
- [5] Gruhle A, Kibbel H, Erben U, et al. Base thickness and high frequency performance of SiGe HBTs. Dev Res Conf A-2, 1992
- [6] Li Kaicheng, Liu Daoguang, Zhang Jing, et al. MBE-based SiGe/ Si heterojunction multilayer structure. Proceedings of 11th International Conference on MBE, Beijing, 2000
- [7] Li Kaicheng, Sun Weifeng, Wang Qingping, et al. Reactive ion etching of Si_{1-x}Ge_x alloy with hydrogen bromide. Proceedings of 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 1998:792

SiGe HBT with f_{\max} of 157 GHz Based on MBE *

Liu Daoguang^{1,2,3}, Hao Yue¹, Xu Shiliu^{2,3}, Li Kaicheng^{2,3}, Liu Yukui^{2,3}, He Kaiquan^{2,3},
Liu Rongkan^{2,3}, Zhang Jing^{2,3}, Liu Luncai^{2,3}, Xu Wanjin^{2,3}, Li Rongqiang^{2,3},
Chen Guangbing^{2,3}, and Xu Xueliang^{2,3}

(1 *Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(2 *No 24 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China*)

(3 *National Laboratory of Analog Integrated Circuits, Chongqing 400060, China*)

Abstract : For analog IC applications ,not only f_T of Si transistor is concerned ,but f_{\max} of Si transistors is also concerned. In this study ,the research for improvement on SiGe HBT f_{\max} of 157 GHz has been undertaken based on MBE SiGe materials.

Key words : self-align; air bridge; SiGe material

EEACC : 2500; 2520; 2560J

Article ID : 0253-4177(2005)03-0528-04

* Project supported by National Defense Advanced Research Program(No.99JS09.2.2.DZ3401)

Liu Daoguang male ,was born in 1964 ,senior engineer ,PhD candidate. His research interest focuses on the ultra-high speed ,ultra-high frequency SiGe HBT devices and IC ,A/D and D/A converters.

Hao Yue male ,was born in 1958 ,professor ,advisor of PhD candidates. His primary research interest includes the theory and design methodology of sub-micro VLSI reliability ,the new α -type wide band semiconductors and their key technologies ,the SOC design methodology and SiGe HBT devices.

Xu Shiliu male ,was born in 1956 ,professor. His research interest focuses on the semiconductor integrated circuits ,MEMS ,SiGe HBT devices and SiGe IC.

Received 22 March 2004 ,revised manuscript received 1 July 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics