

过腐蚀自对准离子注入法制备 SiGe HBT*

姚 飞 成步文 薛春来 王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 用过腐蚀自对准离子注入工艺制备 SiGe/Si 异质结双极型晶体管, 过腐蚀湿法腐蚀的横向钻蚀, 为自对准离子注入提供了技术保障. 对外基区的离子注入既减小了外基区的串联电阻, 又有利于欧姆接触的制备, 提高了器件的工艺成品率.

关键词: 过腐蚀; 自对准; 离子注入; SiGe HBT

EEACC: 2550; 2560J

中图分类号: TN32 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0117-04

1 引言

早在 20 世纪 50 年代中期, Kroemer^[1] 就提出采用宽禁带材料作发射区的 HBT 技术能大幅提高晶体管的频率性能. 1986 年前后, IBM 的 Meyerson 等人^[2] 发明了 UHV/CVD 技术用以制造高性能的 SiGe 异质结器件. 1987 年, IBM 的 Iyer^[3] 制造了第一只有器件性能的 SiGe HBT. 此后 SiGe 技术异军突起, 发展迅速. 在 npn Si 双极晶体管的基区引入 Ge 元素, 形成的 SiGe 合金相对于发射区和收集区产生带隙收缩, 正是这种带隙的不连续性产生了异质结构, 使 SiGe HBT 具有异质结结构“高性能”的特点, 同时 SiGe 工艺与现有的 Si 工艺相兼容, 又具有 Si 基器件“低成本”的特点^[4]. 如今 SiGe 技术以其优异的性能推动着无线(第三代移动通信)和有线(SONET/SDH/千兆以太网)通信系统飞速发展.

2 工艺

目前 SiGe HBT 主要制备工艺有四种: (1) 双台面工艺^[5,6] (包括非钝化的双台面工艺(NPD)和钝化的双台面工艺(NP)); (2) 差分 HBT 工艺^[7~9];

(3) 选择外延工艺^[10~12]; (4) 选择与非选择外延结合的工艺^[13]. 其中, 台面的 SiGe HBT 工艺相对简单, 很适合做研究. 我们正是采用双台面的工艺制备 SiGe HBT. 此外, 还结合了自对准工艺方法, 其优势在于, 它可以减少光刻步骤, 简化工艺流程, 也为很多其他研究小组所采用, 但具体细节各不相同. 北京工业大学的邹德恕等人^[14] 和清华大学的刘志农等人^[15] 以及德国的 Schuppen 等人^[16] 曾报道他们的 SiGe HBT 的自对准工作. 北京工业大学报道的离子注入自对准, 是用 SiO₂ 做掩膜, 硼离子透过此 SiO₂ 层注入到 SiGe 层, 使基区峰值浓度刚好在表面. 此方法的不足之处在于 SiO₂ 厚度有限, 侧壁很难形成有效的掩蔽, 硼离子很容易注入到发射区形成同质结. 清华大学的做法是采用侧墙(sidewall)自对准工艺, 实现起来较为复杂, 代价也相对较高. Schuppen 提出的双台面工艺是用发射极电极做自对准, 金属电极的存在导致不能实现离子注入. 本文提出的过腐蚀自对准离子注入工艺, 其原理十分简单, 工艺步骤方便可行, 其效果是减小基区串联电阻, 同时增加基区欧姆接触区厚度, 保证充分合金.

主要工艺步骤如下:

(1) 首先用自主研发的超高真空低压化学气相沉积设备(UHV/CVD), 在高掺杂的衬底上一次外延

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312010), 国家重点基础研究发展规划(批准号:TG2000036603)资助项目

姚 飞 女, 1979 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为 SiGe HBT 高频电路及其与 Si 基探测器的集成. Email: sindy-yf@red.semi.ac.cn

成步文 男, 1967 年出生, 副研究员, 主要研究方向为 SiGe HBT 及其与 Si 基探测器的集成.

王启明 男, 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为半导体光子集成和 Si 基光电子学.

2004-10-16 收到, 2004-11-28 定稿

生长 Si 集电区、本征的 SiGe 下隔离区、SiGe 基区、SiGe 上隔离区、Si 发射区以及 Si 帽层,其具体结构和浓度掺杂如图 1 所示.

n^+ -Si	100nm	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	帽层
n-Si	100nm	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	发射区
	i-SiGe	9nm	
p^+ -SiGe	30nm	$2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	基区
	i-SiGe	6nm	
n-Si	400nm	$1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	收集区
n^+ Si	$400 \mu\text{m}$	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	衬底

图 1 外延材料结构

Fig. 1 Epitaxy-layers with parameters

(2) 生长 220nm 厚的 SiO_2 , 光刻发射区, 带胶剥离 CrAu.

(3) 利用金属做掩蔽腐蚀 SiO_2 , 控制腐蚀时间, 使其横向钻蚀一定的距离, 以保证在后续注入过程金属能做到完全掩蔽, 从而避免硼离子注入到发射区形成同质结. 测量金属的宽度为 $6 \mu\text{m}$.

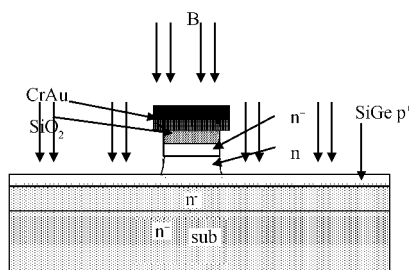


图 2 过腐蚀自对准工艺示意图

Fig. 2 Over-etching self-aligned ion implantation doping process

(4) 用 $\text{KOH} : \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 : \text{丙醇} : \text{水} = 30\text{g} : 1.2\text{g} : 30\text{ml} : 120\text{ml}$ 的溶液腐蚀 Si 发射区. 经实验验证此腐蚀液到达 SiGe 层腐蚀自停止, 腐蚀效果均匀.

(5) 外基区离子注入, 注入能量为 30keV, 浓度为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$.

(6) 腐蚀 SiO_2 , CrAu 金属层自动脱落. 测量发射极台面宽度为 $5.5 \mu\text{m}$, 可见过腐蚀过程中横向腐蚀约 $0.25 \mu\text{m}$, 满足屏蔽要求.

(7) 光刻基区台面, 干法刻蚀至 n^+ 衬底, n^+ 衬底作为器件收集极的接触材料.

(8) 最后, 大面积地淀积 SiON , 退火激活注入的 B 元素, 制作电极并合金.

此工艺和普通双台面工艺相比, 使用了完全相同的光刻版, 没有增加光刻步骤和光刻难度, 实现起来较为简单.

3 测试结果

3.1 结特性

图 3 是 BE 和 BC 结的正反向特性. 可看出 BC 结的反向击穿电压大于 10V, BE 结的反向击穿电压为 6V 左右, 反向特性均良好. 但 BE 结正向开启电压大于 1V, 而 BC 结正向开启大于 2V, 这与正常的开启电压 (0.6~0.7V) 差距比较大. 分析原因, 可能是由于 E 区和 C 区掺杂浓度太低 ($\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 没有形成很好的欧姆接触. 因为 C 集电极接触材料是高掺杂的衬底, C 接触区没有进行隔离, 可以直接测量两个 C 极间的 $I-V$ 特性以判断金属与半导体的接触程度, C 极间的 $I-V$ 特性见图 4. 显然, 衬底和金属之间存在肖特基势垒, 未形成欧姆接触. 同时, 衬底和发射极帽层的掺杂浓度相近, 所以可以推断发射极与金属也未形成良好的欧姆接触. 这正是 BE 结和 BC 结正向开启电压高的原因. 提高 C 区电极接触区和 E 区帽层的掺杂浓度将有利于改善结的开启电压特性.

3.2 输出特性

图 5 示出了 SiGe/Si HBT 的输出特性, 由于 BE 结异质结的作用, 尽管发射区掺杂浓度远低于基区掺杂浓度 (仅为后者的 1/10), 器件的直流增益仍能达到 120. 和结特性相似, 输出曲线也存在一个阈值电压, 其原因仍和 E, C 结金属半导体接触处的肖特基结有关. 从图中还可以看出, 该 SiGe/Si HBT 击穿电压很高, 超过 8V, 电流也能达到 10mA 的量级. 同时可以观察到器件的自热效应, 这正是 HBT 的特有效应之一.

3.3 外基区电阻

过腐蚀自对准离子注入的出发点就是改善外基区电阻特性. 表 1 对注入前后外基区参数进行了比较. 高浓度注入后, 硼离子呈高斯分布, 使基区的有效厚度延伸到 200nm, 这样在合金时, 既可以适当提高合金温度和合金时间保证充分合金, 又有效避免了基区在烧结过程中的穿通. 同时, 退火后的离子激活率较高, 离子浓度达到本征基区的水平, 大大减

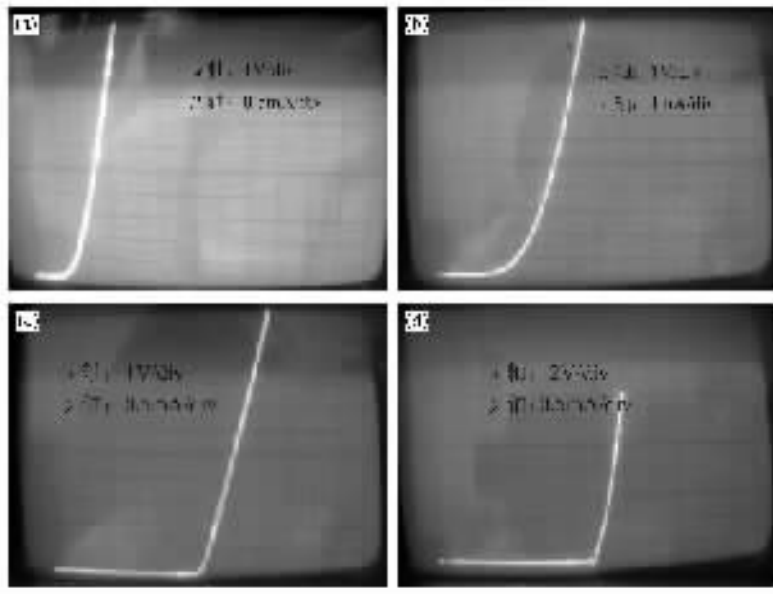


图 3 BE 结和 BC 结的结特性 (a) BE 结正向特性;(b) BC 结正向特性;(c) BE 结反向特性;(c) BC 结反向特性

Fig. 3 I - V curves of BE junction and BC junction (a) Forward characteristic of BE junction;(b) Forward characteristic of BC junction;(c) Reverse characteristic of BE junction;(d) Reverse characteristic of BC junction

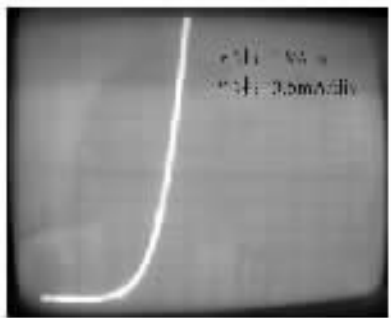


图 4 C-C 结 I - V 特性

Fig. 4 I - V characteristic of C-C junction

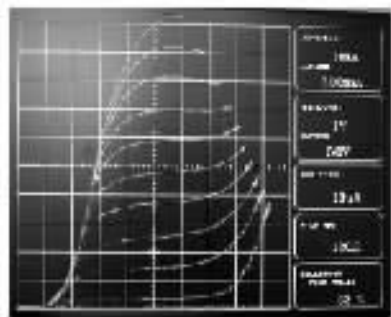


图 5 SiGe HBT 的直流输出特性

Fig. 5 Output characteristic of SiGe HBT

特性和小注入的电流增益都大有裨益。

表 1 离子注入前后外基区参数比较

Table 1 Comparison of the extend-base parameters before and after ion implantation

	激活离子浓度 / cm^{-3}	有效基区厚度 / nm	方块电阻 / $(\Omega \cdot \square^{-1})$
注入前	2×10^{19}	45	981
注入后	2×10^{19}	200	255

4 结论

用自主研制的 UHV/CVD 系统生长出了高质量的 SiGe/Si 材料,并探索出新的制备 HBT 器件的工艺——过腐蚀自对准离子注入工艺.运用此自对准工艺可方便地实现 SiGe/Si HBT 的自对准制作;用离子注入自对准工艺制作 SiGe/Si HBT 可以有效减少基区的串联电阻,这有利于减少器件噪声,改善小注入条件下的电流增益;同时离子注入后的外基区厚度扩展,可以保证充分合金,有利于制作优良的欧姆电阻.此外,该工艺并没有增加光刻步骤和光刻难度,工艺较为简单,是一种容易实现的很有价值的工艺方法.

参考文献

- [1] Kroemer H. Theory of a wide-gap emitter for transistors. Proc IRE 45,1957;1535
- [2] Meyerson B S. Low temperature silicon epitaxy by untrahigh

小了外基区的方块电阻,从表中可以看到,注入后的方块电阻仅为注入前的 1/4.同时,外基区厚度增加,更有效降低了基区的串联电阻.这对器件的噪声

- vacuum/chemical vapor depositon. *Appl Phys Lett*, 1986, 48: 797
- [3] Iyer S S, Patton G L, et al. Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy. *IEDM Tech Dig*, 1987: 874
- [4] Yao Fei, Cheng Buwen, Wang Qiming. The development of SiGe HBT and the application in RF circuits. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, 40(10): 5 (in Chinese) [姚飞, 成步文, 王启明. SiGe HBT 及高速电路的发展. *微纳电子技术*, 2003, 40(10): 5]
- [5] Patton G L, Iyer S S, Delage S L, et al. Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy. *IEEE Electron Device Lett*, 1988, 9: 165
- [6] King C A, Hoyt J L, Gronet C M, et al. Si/Si_{1-x}Ge_x heterojunction bipolar transistors produced by limited reaction processing. *IEEE Electron Device Lett*, 1989, 10(2): 52
- [7] Hame D L, Comfort J H, Cressler J D, et al. Si/SiGe epitaxial-base transistors: part I-materials, physics, and circuits. *IEEE Trans Electron Devices*, 1995, 40: 455
- [8] Hame D L, Comfort J H, Cressler J D, et al. Si/SiGe epitaxial-base transistors: part II-process integration and analog applications. *IEEE Trans Electron Devices*, 1995, 40: 469
- [9] Gotzfried R, Beisswanger F, Gerlach S, et al. RFIC's for mobile communication systems using SiGe bipolar technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46(5): 661
- [10] Sato F, Hashimoto T, Tatsumi T, et al. Sub-20ps ECL circuits with high-performance super self-aligned selectively grown SiGe base (SSSB) bipolar transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 1995, 42(3): 483
- [11] Meister T F, Schafer H, Franosch M, et al. SiGe base bipolar technology with 74GHz f_{max} and 11ps gate delay. *Electron Devices Meeting*, 1995, 10~13: 739
- [12] Washio K, Ohue E, Oda K, et al. A selective-epitaxial-growth SiGe-base HBT with SMI electrodes featuring 9.3-ps ECL-gate delay. *IEEE Trans Electron Devices*, 1999, 46(7): 1411
- [13] Schiz J F W, Lamb A C, Cristiano F, et al. Leakage current mechanisms in SiGe HBTs fabricated using selective and nonselective epitaxy. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(11): 2492
- [14] Zhou Deshu, Gao Guo, Chen Jianxin, et al. Ion implantation to self-aligned SiGe/Si HBT. *Semiconductor Technology*, 1998, 23(5): 36 (in Chinese) [邹德恕, 高国, 陈建新, 等. SiGe/Si HBT 离子注入自对准的研究. *半导体技术*, 1998, 23(5): 36]
- [15] Liu Zhinong, Xiong Xiaoyi, Huang Wentao, et al. Polysilicon emitter double mesa microwave power SiGe HBT. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9): 897
- [16] Schuppen A, Erben U, Cruhle A, et al. Enhanced SiGe heterojunction bipolar transistors with 160GHz- f_{max} . *IEDM*, 1995: 743

Over Wet-Etching Self-Aligned Ion Implantation Doping Technology on Fabricating SiGe/Si HBT*

Yao Fei, Cheng Buwen, Xue Chunlai, and Wang Qiming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A new technology of fabricating SiGe/Si HBT—over wet-etching self-aligned ion implantation doping technology is first presented. Over etching the sacrificing layer SiO₂ ensures the masking metal layer large enough to shield the following self-aligned ion implantation doping to the base area, and the self-aligned ion implantation doping lessens the non-latent resistance and extends the thickness of the base, resulting the ohm contact easier to be made.

Key words: over wet etching; self-aligned; ion implantation doping; SiGe HBT

EEACC: 2550; 2560J

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0117-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312010), the State Key Development Program of Basic Research of China(No. 2000036603)

Yao Fei female, was born in 1979, PhD candidate. Her main research area includes SiGe HBT RF circuits and the integration with Si-based optic-electronic detectors. Email: sindy-yf@red.semi.ac.cn

Cheng Buwen male, was born in 1967, associate professor. He is engaged in research on SiGe HBTs and the integration with Si-based optic-electronic detectors.

Wang Qiming male, member of CAS, researcher, tutor for PhD graduate students. He has been mainly engaged in research on the field of semiconductors and optoelectronics.

Received 16 October 2004, revised manuscript received 28 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics