

三指发射极 InGaP/ GaAs HBT 的研制 *

杨 威[†] 刘训春 朱 旻 王润梅 申华军

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 异质结双极型晶体管(HBT)是 MMIC 领域中最具有竞争力的三端器件之一. 本文提出了一种三指发射极 HBT 的设计. 通过与同一版上两指发射极 HBT 比较, 证实了该设计的工艺宽容度高、可靠性和一致性好、成品率高, 并且仍然具有两指发射极 HBT 良好的击穿、直流和高频特性.

关键词: 异质结双极型晶体管; 三指发射极; 自对准

EEACC: 2560F; 2550E; 2550R

中图分类号: TN385 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)09-1604-04

1 引言

近年来, 无线和光纤通信系统取得了飞速的发展, 信息传输量急剧增加, 这就对通信速度、通信质量的要求越来越高. 因此需要利用通信容量大的微波、毫米波技术来发展通信技术, 大幅度地提高系统的传输容量和传输速率^[1~3]. 化合物半导体器件以及相关电路因其在高频段的良好性能越来越受到人们的青睐. 异质结双极型晶体管(HBT)由于具有功率密度高、增益高、相位噪声低、线性度好、单电源工作、芯片面积小和性能价格比高等特点, 是 MMIC 领域中最具有竞争力的三端器件之一^[4,5].

众所周知, HBT 的 BC 结电容 C_{bc} 是限制 HBT 工作频率和器件的主要因素之一, 而 HBT 的热可靠性问题是影响 HBT 可靠性的关键. 由于这些原因, 前人已有许多不同的 HBT 设计来降低 C_{bc} 和提高可靠性, 例如采用 laterally etched undercut (LEU) 和自对准技术的 U 型发射极 HBT^[6], 它在频率上和功率上都有优异的表现. 为了进一步优化 HBT 器件结构设计, 我们设计了一种三指发射极 HBT. 通过与同一版上两指发射极 HBT 比较, 证明三指发射极 HBT 工艺宽容度高、可靠性和一致性好、成品率高, 并且仍然具有两指发射极 HBT 良好的击穿、直流和高频特性.

2 外延结构设计

此次实验采用的外延片是由中国科学院上海微系统与信息技术研究所提供的. 外延层是在半绝缘

(100) 面 GaAs 衬底上用 MBE 技术生长的. Si 和 Be 分别作为 n 型和 p 型掺杂剂. 具体的材料结构如表 1 所示.

表 1 外延层材料结构
Table 1 Material structures of the epi-layer

Layer No.	Composition / x	Thickness / nm	Doping / cm^{-3}	Dopant
10	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.6	$>1 \times 10^{19}$	Si
9	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.6~0	$>1 \times 10^{19}$	Si
8	GaAs		5×10^{18}	Si
7	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$	0.5	3×10^{17}	Si
6	GaAs		Undoped	
5	GaAs		4×10^{19}	Be
4	GaAs		Undoped	
3	GaAs		1×10^{16}	Si
2	GaAs		2×10^{16}	Si
1	GaAs		5×10^{18}	Si

SI GaAs substrate

其中, 第 10 和第 9 层为盖帽层, 它们的作用是使得发射极金属与外延层获得良好的欧姆接触和缓解盖帽层与发射极层之间由于晶格不匹配带来的应力. 外延层用 MBE 技术生长, 基区采用 Be 为 p 型掺杂剂. 由于 Be 的扩散系数比较大, 高温生长时 Be 很容易扩散到发射区并补偿掉一部分 n 型杂质, 从而导致电流增益下降. 因此我们在基区两侧增加了非掺杂 GaAs 层作为缓冲层. 如果集电极材料掺杂较低, 则 BC 结击穿电压比较高, 会影响器件的截止频率, 进而影响到电路的工作速度; 如果集电极材料掺杂较高, 器件的截止频率会比较高, 但 BC 结击穿电压偏小, 这会降低器件的工作范围. 综上考虑, 我

* 中国科学院知识创新工程资助项目 (批准号: KGX2-101)

[†] 通信作者. Email: weiyang@mail.ustc.edu

们采用了如表 1 中所示的两层集电极材料结构。

3 器件设计

我们设计的新结构三指发射极 HBT 和二指发射极 HBT 的版图如图 1 所示。

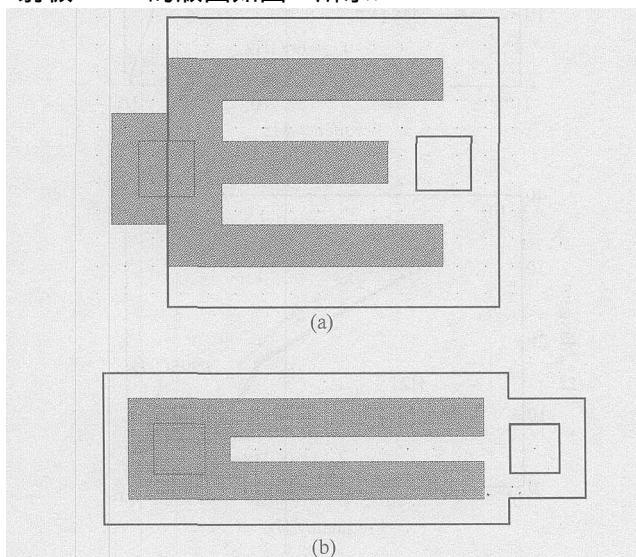


图 1 三指发射极和两指发射极版图(图中阴影区为发射极,小方框为一次布线引出孔) (a) 三指发射极; (b) 两指发射极
Fig.1 Layout of three-emitter finger (a) and two-emitter finger HBT (b) The shadow is emitter and square is via for first metal.

三指 HBT 的三个发射极指长分别为 10, 8 和 $10\mu\text{m}$, 指宽和指间距都是 $1.5\mu\text{m}$ 。两指 HBT 的指长为 $14\mu\text{m}$, 指宽 $1.5\mu\text{m}$, 指间距 $1\mu\text{m}$ 。计算表明, 三指发射极的周长面积比 (P_e/A_e) 约为 1.79, 而两指发射极的周长面积比为 1.72。二者的 BC 结面积与发射极周长比也很接近, 分别为 1.96 和 1.85。

根据发射极尺寸效应 (emitter size effect), 发射极周长/面积比会显著影响电流增益。BC 结面积与发射极周长比则可以反映在同样发射极电流密度下 BC 结电容的大小。可以看出, 两种结构 HBT 的周长面积比和 BC 结面积与发射极周长比都很相近, 因此从理论上分析这两种结构 HBT 的直流和高频性能应该是相近的, 实验结果也证明了这一点。但是, 三指发射极 HBT 的成品率、一致性和可靠性明显高于两指发射极 HBT。

4 实验结果和讨论

图 2 是三指发射极和两指发射极 HBT 的照片。

实验中发现, 以发射极金属为掩模进行发射极

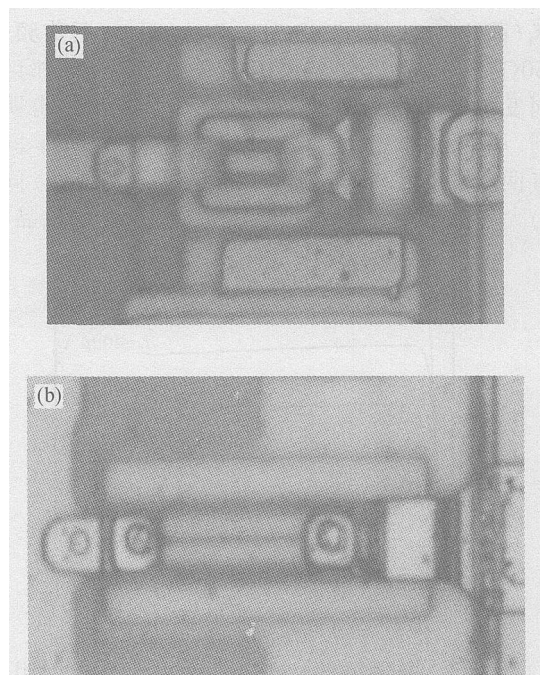


图 2 三指发射极和两指发射极 HBT 的照片 (a) 三指发射极新结构 HBT; (b) 两指发射极 HBT

Fig. 2 Photo of three emitter finger HBT (a) and two emitter finger HBT (b)

腐蚀后, 在两指 HBT 发射极金属出现大面积漂移区域, 相同发射极面积的三指 HBT 却极少发生漂移。流片完成后我们对器件成品率进行了测试, 三指和两指 HBT 的成品率分别为 0.85 和 0.98。值得注意的是, 所有能够正常工作的三指 HBT 的一致性都非常好。若观察共射直流电流放大系数 β , 取样本值为 50, 三指 HBT 的 β 平均值为 18.3, 样本标准差为 0.33, 两指 HBT 的 β 平均值为 17.6, 样本标准差为 0.86。

以上结果说明, 新的发射极设计的确大大提高了工艺宽容度和成品率。三指 HBT 成品率高和一致性好的原因可能是因为:

(1) 在进行湿法腐蚀时, 需要摇晃容器。三指 HBT 由于侧面长度较短, 相比两指 HBT 受到水流冲击的力量大大减小, 因此较少发生漂移。

(2) 三指 HBT 调宽了指间距, 缩短了指长。这样有利于腐蚀液交换, 腐蚀时间比较好把握。不会出现指间腐蚀干净外面已经腐蚀过头, 或外面腐蚀干净指间却没有完全腐蚀的情况。

图 3 是三指 HBT 的 $F-V$ 测试结果, 从图中可以看出, V_{offset} (残余电压) 仅为 0.085V。而传统 HBT 的 V_{offset} 一般都要大于 0.1V; V_{nee} (膝点电压) 也比较低, 为 0.5V。HBT 中 BE, BC 结特性主要由材料结构决定。由图 4, 5 也可看出, 三指 HBT 与两指 HBT 的结特性相同。由图 6 可以看出, 三指 HBT 的 f_t

(截止频率) 高达 95 GHz 以上, $f_{\max}$ (振荡频率) 为 60 GHz. 这个结果与采用同一外延片, 相邻区域相同发射极面积的两指 HBT 的 f_t 和 $f_{\max}$ 没有明显差别. 从上面列出的结果可以看出, 三指 HBT 同样具有两指 HBT 优异的直流特性和高频特性. 同时因为大大降低了工艺的难度, 提高了最终的成品率.

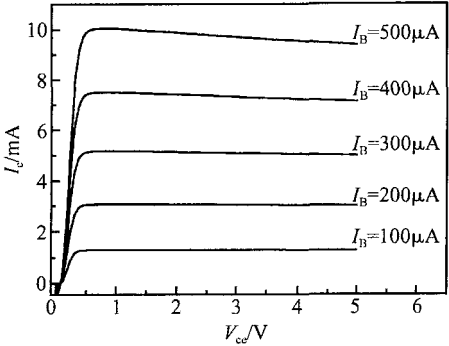


图 3 三指 HBT 的 I_C - V 特性曲线

Fig. 3 I_C - V characteristic of three emitter finger HBT

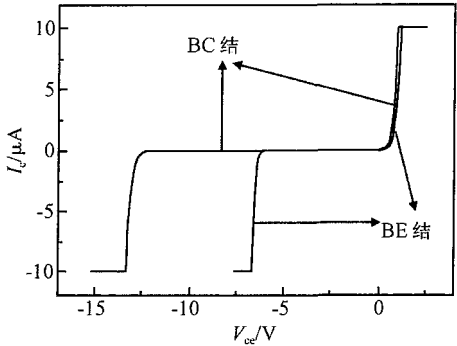


图 4 三指 HBT 的 BE, BC 结特性

Fig. 4 I_C - V characteristic of base-emitter junction and base-collector junction in three emitter finger HBT

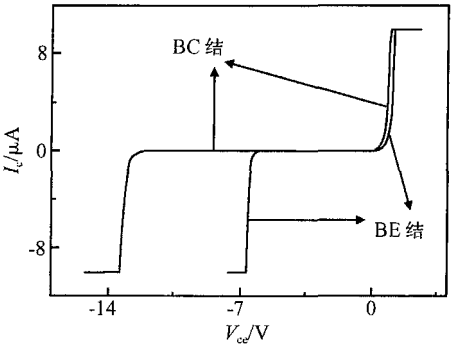


图 5 两指 HBT 的 BE, BC 结特性

Fig. 5 I_C - V characteristic of base-emitter junction and base-collector junction in two emitter finger HBT

需要指出的是, 因外延条件的限制, 以上结果是在采用 Be 掺杂基区外延片上得到的. 如果使用如

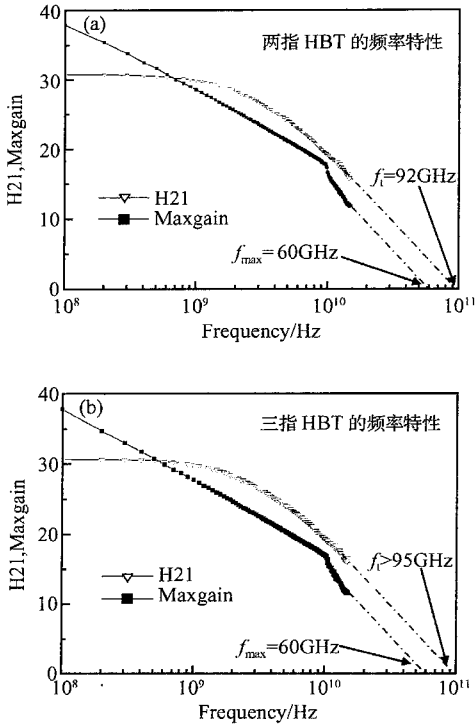


图 6 三指 HBT 和两指 HBT 的频率特性

Fig. 6 High frequency performance of three emitter finger HBT (a) and two emitter finger HBT (b)

白大夫等人^[6]采用的 KOPIN 公司 C 掺杂基区的外延片, 基区电阻会显著降低, 又可避免 Be 扩散导致的基区展宽效应, 将能够进一步提高 HBT 的高频性能.

5 结 论

本文报道了一种新结构 HBT, 它采用三指发射极, 并且调宽了指间距. 与我们在同一版上设计的两指发射极 HBT 相比, 它的工艺宽容度大、可靠性好、一致性好、成品率高, 而且仍然具有两指发射极 HBT 良好的击穿、直流和高频特性. 因此, 我们认为这种新结构 HBT 有着良好的应用前景.

致谢 作者特别感谢王素琴高级工程师、汪宁工程师、刘洪民副研究员、武锦工程师、梁晓新工程师、马晓琳等在工艺以及测试上给予的热情帮助.

参考文献

[1] Murata K, Otsuji T, Se N E, et al. 70 Gbit/s decision IC modules using InAlAs/ InGaAs/ InP HEMTs. IEICE Trans Electron, 2000, E83-C(7) : 1166
[2] Kauffmann N, Blayac S, Abboun M, et al. InP HBT driver circuit optimization for high-speed ETDM transmission. IEEE J Solid-State Circuits, 2001, 36(4) : 639

- [3] Blayac S, Riet M, Benchimol J L, et al. InP HBT self-aligned technology for 40 Gbit/s ICs: fabrication and CAD geometric model. 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 1999: 483
- [4] Liu W. The handbook of *F-V* heterojunction bipolar transistor. John Wiley & Sons, 1998
- [5] Qian Yongxue, Liu Xunchun, Wang Runmei, et al. Self-aligned GaInP/ GaAs HBT device. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(5): 513 (in Chinese) [钱永学, 刘训春, 王润梅, 等. 自对准 GaInP/ GaAs HBT 器件. 半导体学报, 2002, 23(5): 513]
- [6] Bai Dafu, Liu Xunchun, Wang Runmei, et al. Super performance InGaP/ GaAs HBT with novel structure. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(7): 757 (in Chinese) [白大夫, 刘训春, 王润梅, 等. 高性能新结构 InGaP/ GaAs 异质结双极型晶体管. 半导体学报, 2004, 25(7): 757]

Fabrication of a New Layout InGaP/ GaAs HBT^{*}

Yang Wei[†], Liu Xunchun, Zhu Min, Wang Runmei, and Shen Huajun

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The HBT is one of the most important devices in microwave and millimeter wave fields due to its outstanding performance and high reliability. A novel layout HBT that employs a three-finger emitter is demonstrated. Compared to an HBT with a two-finger emitter, this device has good process tolerance, high yield, and good uniformity. Furthermore, it has superior DC and high-frequency characteristics.

Key words: HBT; three-finger emitter; self-aligned

EEACC: 2560F; 2550H; 2550R

Article ID: 0253-4177(2006)09-1604-04

^{*} Project supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KGX2-101)

[†] Corresponding author. Email: weiyang@mail.ustc.edu