

减小发射极宽度提高 InGaP/GaAs HBT 的性能*

石瑞英¹ 孙海峰² 刘训春² 袁志鹏² 罗明雄² 汪 宁²

(1 四川大学物理系, 成都 610064)

(2 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 在发射极宽度为 $3\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ InGaP/GaAs HBT 工艺的基础上, 研究了发射极宽度为 $2\mu\text{m}$ 时发射极与基极之间的自对准工艺, 用简单方法制备出了发射极宽度为 $2\mu\text{m}$ 的 InGaP/GaAs HBT. 发射极面积为 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 时器件的截止频率高达 81GHz , 且集电极电流密度为 $7 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 时仍没有出现明显的自热效应. 它的高频和直流特性均比发射极宽度为 $3\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ InGaP/GaAs HBT 的有了显著提高, 并对器件性能提高的原因进行了分析.

关键词: 自对准工艺; 减小发射极宽度; 提高 InGaP/GaAs HBT 的性能

EEACC: 1350F; 2560J

中图分类号: TN 385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)08-0991-04

1 引言

随着光纤通信和无线通信的飞速发展, 对其系统中应用的关键部件——异质结双极晶体管(HBT)的性能提出了越来越高的要求^[1]. InGaP/GaAs HBT 由于高可靠性及相对成熟的工艺, 已经成为无线通信系统及 $10\sim 40\text{Gbit/s}$ 光纤通信系统的首选器件. 在选定了器件的材料和结构后, 可以从工艺方面入手去提高其性能^[2], 使其达到器件性能的理论值.

减小发射极的宽度可以达到降低发射极电容和 B-C 结电容, 提高器件截止频率的目的, 而发射极面积的减小又可以提高 HBT 产生自热效应的电流密度, 因此减小发射极宽度和缩小发射极面积对提高器件的特性至关重要. 但是发射极尺寸的减小会增加器件制备的难度, 因此必须对其工艺进行研究.

基于上述分析, 本文对 $2\mu\text{m}$ 自对准发射极的制备工艺进行了研究, 并且制备出了发射极宽度为 $2\mu\text{m}$ 的 InGaP/GaAs HBT. 测试结果表明, 它的直流和高频特性均得到了显著提高.

2 $2\mu\text{m}$ 宽发射极 InGaP/GaAs HBT 自对准工艺

自对准发射极 HBT 具有可缩小发射极与基极之间的间距, 降低基区串联电阻提高 HBT 的频率特性等优点, 目前已成为 HBT 制备中普遍采用的非常关键的技术之一. 用于自对准的方法主要有: (1) 选择性重新生长发射极^[3]; (2) 把发射极设计成双 InGaP 结构^[4]; (3) 利用“侧墙工艺”^[5]; (4) 利用基区金属桥^[6]; (5) 把发射极金属做成 T 形^[7], (6) 利用 GaAs 的侧向腐蚀特性^[8] 等几种方法. 比较而言, 前五种方法制备工艺复杂, 设备要求高, 而第六种方法制备工艺较为简单, 但不能用于亚微米发射极的制备. 制备亚微米发射极时需要用电子束曝光和等离子刻蚀技术. 电子束曝光费用高, 制备时间长, 而等离子刻蚀对器件的表面又具有一定的损伤作用, 所以一般情况下, 在电路中大多数应用发射极宽度为 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$ 的 HBT 器件.

由于我们制备的是 $2\mu\text{m}$ 宽的发射极, 因此, 可以选择利用 GaAs 的侧向腐蚀特性来达到自对准的

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号: G200006830403)

石瑞英 女, 副教授, 目前主要从事化合物半导体器件和微波单片集成电路等方面的研究.

2003-07-05 收到, 2003-12-28 定稿

©2004 中国电子学会

目的。在利用这种方法制备自对准发射极时，如果发射极的宽度在 $3\mu\text{m}$ 以上时，器件的制备较为容易，而对于 $2\mu\text{m}$ 线宽的器件，制备就较为困难。GaAs 的侧向腐蚀与晶向有关，它的一个方向为正梯形而与之垂直的方向则为倒梯形，如图 1 所示。由于设计中器件采用的是四面自对准形式，所以四面的基极金属均必须保证不能与发射极金属及发射区相连，否则，将无法制备出器件，因此必须严格控制其侧向腐蚀的宽度。如果腐蚀时间过短，对于腐蚀图形为正梯形的方向，基区金属将与发射区相联；如果腐蚀时间过长，倒梯形方向的侧向腐蚀将过多，对于 $2\mu\text{m}$ 宽的发射极，有可能把发射区全部腐蚀掉，这两种情况均将致使器件无法工作。所以在制备器件时必须严格控制腐蚀速度和腐蚀时间。

在制备器件时，首先清洗表面，然后涂胶、光刻；蒸发钛(Ti)、铂(Pt)、金(Au)作为发射极金属；剥离；以发射极金属为掩模，用柠檬酸加过氧化氢腐蚀 InGaAs 和 GaAs 帽层；利用 NH_4OH 系腐蚀液对 GaAs 与 InGaAs 和 InGaP 之间的选择性腐蚀作用来腐蚀 GaAs，使 GaAs 能够内切，以形成基极与发射极间的自对准；为了稳定工艺，在柠檬酸系及氨水系腐蚀液腐蚀时，均采用 27°C 恒温。用 $\text{HCl} : \text{H}_3\text{PO}_4 = 1 : 1$ 在 50°C 的恒温下腐蚀 InGaP，露出基区；光刻，蒸发基区，形成发射极—基区金属的自对准。

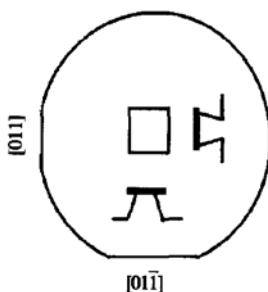


图 1 GaAs 侧向腐蚀与晶向的关系示意图

Fig. 1 Etched patterns in two different direction

3 材料结构及器件制备

实验中所用材料是从美国 Kopin 公司购买的，它是在半绝缘(100)面 GaAs 衬底上用 MOCVD 法生长的，Si 和 C 分别用于 n 型和 p 型掺杂，其材料外延结构是：首先在半绝缘 GaAs 衬底上生长一层 500nm 厚，掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs 为亚收集区；然后再生长一层 500nm 厚，掺杂浓度为 $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs 为收集区；收集区上面为 60nm 厚，掺杂浓度为 $4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 p 型 GaAs 基区；基区上为 InGaP 发射区，它的厚度为 50nm ，掺杂浓度为 $3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ；最上面为欧姆接触用的帽层，帽层有三层，依次为 120nm 厚，掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs， 50nm 厚，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ，In 的含量由 0 渐变到 0.6，最上面一层是 50nm 厚，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 。

$\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs 为收集区；收集区上面为 60nm 厚，掺杂浓度为 $4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 p 型 GaAs 基区；基区上为 InGaP 发射区，它的厚度为 50nm ，掺杂浓度为 $3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ；最上面为欧姆接触用的帽层，帽层有三层，依次为 120nm 厚，掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs， 50nm 厚，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ，In 的含量由 0 渐变到 0.6，最上面一层是 50nm 厚，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 。

在制备器件时，首先形成发射极—基区金属的自对准；然后基区版曝光、显影，以胶为掩膜腐蚀基区到亚集电区；隔离版光刻，以胶为掩膜腐蚀到衬底形成隔离区；蒸发集电极金属；用 SiO_2 和 Si_3N_4 双层介质作为钝化层；在钝化层上用聚酰亚胺平面化工艺；制备空气桥；蒸发布线金属完成整个器件的制备。

4 结果及讨论

4.1 器件的直流特性

我们用 HP4155 测量了所制备的 InGaP/GaAs HBT 的直流特性。对同样发射极长度，不同发射极宽度器件的特性进行了分析比较。发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ InGaP/GaAs HBT 的输出特性曲线如图 2(a)~(c) 所示。比较图 2(a)~(c) 可以看出，它们的补偿电压 (V_{offset}) 基本相同。大量的测式结果表明我们所制备的 InGaP/GaAs HBT 的补偿电压均在 $140\sim 150\text{mV}$ 范围内。从图中还可以看出同样电流密度下，发射极宽度大的 HBT 其饱和压降也较大。这是因为器件的饱和压降与它的集电极电流有关，集电极电流越大它的饱和压降也就越大。而在同样的电流密度下，发射极宽的器件它的集电极电流也较大，因此它的饱和压降也就较大。

从图 2(a) 和 (b) 我们可以算出发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的 InGaP/GaAs HBT 的直流电流增益分别为 97, 77 和 55。发射极宽度减小时其直流电流增益减小的原因是因为对于小发射极面积器件，它的周长与面积的比值较大，电流集边效应较为严重。虽然较小的发射极宽度会使器件的直流电流增益下降，但是只要它的直流电流增益大于 40，对大多数器件的应用已经足够。

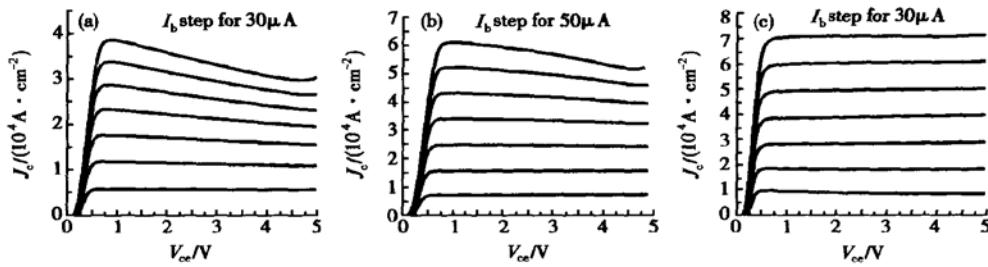


图 2 InGaP/GaAs HBT 的输出特性曲线 (a) $S_e = 4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (b) $S_e = 3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (c) $S_e = 2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$
Fig. 2 DC characteristics of InGaP/GaAs HBT (a) $S_e = 4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (b) $S_e = 3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (c) $S_e = 2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$

从图 2 中可以看出,对于发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的器件,在集电极电流密度为 $2.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时,集电极电流随着 C-E 两端电压的增加而减小,自热效应发生。发射极面积为 $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的器件,发生自热效应的电流密度为 $4.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$,而对于发射极面积为 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的器件在集电极电流密度为 $7.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时仍没有发生自热效应。减小发射极面积后,发生自热效应的电流密度显著提高。我们认为这主要是由于发射极面积的减小使发射结产生的热量减少,同时器件的散热也更加容易,因此器件发生自热效应的电流密度提高。

4.2 器件的高频特性

我们用 HP8510C 测量了所制备的 InGaP/GaAs HBT 的高频特性。在 $V_{be} = 1.45\text{V}$, $V_{ce} = 1.5\text{V}$ 条件下,发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 及 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的 InGaP/GaAs HBT 截止频率的测量结果如图 3(a)~(c) 所示。器件的截止频率由外推

法得到。发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 及 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 器件截止频率的测量值分别为 62, 69 和 81GHz。

由上面的测试结果可以看出,减小发射极宽度可以使器件的截止频率显著提高。发射极宽度减小后,相应的发射极面积减小。HBT 的发射结电容 C_{je} 减小;另一方面,发射极宽度的减小也使集电结电容 C_{jc} 减小。由电子发射区、收集区渡越时间及 HBT 的截止频率 f_T 的计算公式^[9]:

$$\tau_e = \frac{kT}{qI_c}(C_{je} + C_{jc}) \quad (1)$$

$$\tau_c = (R_c + R_e)C_{jc} \quad (2)$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi(\tau_e + \tau_b + \tau_{sc} + \tau_c)} \quad (3)$$

可知, C_{je} 和 C_{jc} 的减小,使得与它们相关的 τ_e 和 τ_c 也相应地减小。而 HBT 的截止频率 f_T 又与电子发射区渡越时间及收集区的渡越时间息息相关。因此,发射极宽度的减小可以使器件的频率特性得以提高。

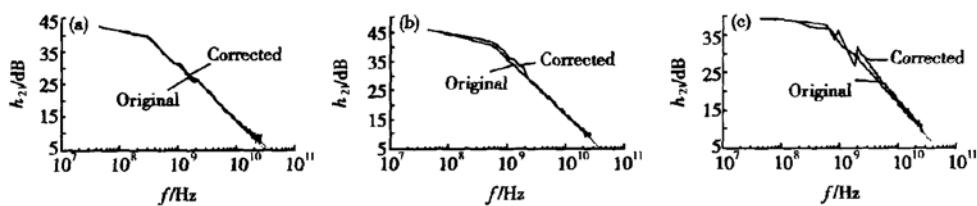


图 3 测量的 InGaP/GaAs HBT 的高频特性 (a) $S_e = 4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (b) $S_e = 3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (c) $S_e = 2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$
Fig. 3 Measured results of InGaP/GaAs HBT cutoff frequency at $V_{be} = 1.4\text{V}$, $V_{ce} = 1.5\text{V}$

用文献[10]所述的方法提取器件的模型参数,并用公式^[9]

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi r_b C_{jc}}} \quad (4)$$

计算器件的最大振荡频率 f_{max} 的值,由此可以得到发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 器件的最大振荡频率分别为 62, 78 和 112GHz。从计算结果可以看出,当发射极宽度减小

时, 器件的最大振荡频率提高。这一方面是因为发射极宽度的减小使器件的截止频率提高, 另一方面是由于发射极宽度的减小也使器件的 B-C 结电容 C_{je} 减小, 而截止频率的提高和 B-C 结电容减小均使器件的最大振荡频率得以提高。

5 结论

本文用非常简单的方法制备出了发射极宽度为 $2\mu\text{m}$ 的自对准 InGaP/GaAs HBT 器件。测试结果表明, 小发射极宽度 HBT 的直流和高频特性均得到了显著提高。器件发生自热效应的电流密度由发射极面积为 $4\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 时的 $2.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 提高到发射极面积为 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的 $7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 以上, 器件的截止频率也由 62GHz 提高到 81GHz, 最大振荡频率由 62GHz 提高到 112GHz。

参考文献

- [1] Shi Ruiying, Liu Xunchun. Improve transmit data bit rate and characteristic of optical modulator driver circuit by cascode HBT. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(5): 534(in Chinese) [石瑞英, 刘训春. 用新的电路形式提高 HBT 光调制器驱动电路的传输速率及性能. 半导体学报, 2003, 24(5): 534]
- [2] Shi Ruiying, Liu Xunchun. Progress of heterojunction bipolar transistor structure. Semiconductor Technology, 2002, 27(6): 69(in Chinese) [石瑞英, 刘训春. HBT 结构新进展. 半导体技术, 2002, 27(6): 69]
- [3] Park S H, Chin T P, Liu Q Z, et al. Submicron self-aligned HBT's by selective emitter regrowth. IEEE Electron Device Lett, 1998, 19(4): 118
- [4] Fresina M T, Hartmann Q J, Stillman G E. Selective self-aligned emitter ledge formation for heterojunction bipolar transistors. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(12): 555
- [5] Feygenson A, Temkin H, Tsang W T. Self aligned InGaAs/InP heterostructure bipolar transistors. Electron Lett, 1991, 27(13): 1116
- [6] Nagata K, Nakajima O, Nittono T, et al. A new self-alignment technology using bridged base electrode for small-scaled Al-GaAs/GaAs HBT's. IEEE Trans Electron Devices, 1992, 39(8): 1786
- [7] Shi Huafen, Zhang Haiying, Liu Xunchun, et al. A novel high-yield InP-based T-shaped nanometer-gate fabrication technology. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(4): 411(in Chinese) [石华芬, 张海英, 刘训春, 等. 一种新的高成品率 InP 基 T 型纳米栅制作方法. 半导体学报, 2003, 24(4): 411]
- [8] Qian Yongxue, Liu Xunchun, Wang Runmei, et al. Self-aligned GaInP/GaAs HBT. 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]
- [9] Liu W. Handbook of III-V compound semiconductor. A Wiley-Interscience Publication, 1998: 722
- [10] Shi Ruiying, Liu Xunchun, Qian Yongxue, et al. Gao.49 In0.51-P/GaAs HBT small-signal model extraction using a improved genetic algorithm. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(9): 957(in Chinese) [石瑞英, 刘训春, 钱永学, 等. 用改进的遗传算法从 S 参数中提取 HBT 交流小信号等效电路模型参数. 半导体学报, 2002, 23(9): 957]

Improved Performance of InGaP/GaAs HBT with Small-Scaled Emitter*

Shi Ruiying¹, Sun Haifeng², Liu Xunchun², Yuan Zhipeng², Luo Mingxiong² and Wang Ning²

(1 Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

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

Abstract: A method to fabricate self-aligned InGaP/GaAs HBT with small-scaled emitter is introduced. With this method, self-aligned InGaP/GaAs HBTs having good performance are fabricated. The emitter size is $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, and the cut-off frequency reaches 81GHz. Moreover, the self-heating effect is not obviously observed at a collector current density of $7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$. Compared to device with large-scaled emitter, the device characteristics are improved. The possible reasons are discussed.

Key words: self-aligned; small-scaled emitter; improved device characteristics

EEACC: 1350F; 2560J

Article ID: 0253-4177(2004)08-0991-04

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G200006830403)

Shi Ruiying female, associate professor. Her research interests are compound semiconductor device and MMICs.