

# 自对准 GaInP/GaAs HBT 器件\*

钱永学 刘训春 王润梅 石瑞英

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

**摘要:** 利用发射极金属掩蔽进行内切腐蚀的方法研制成自对准 InGaP/GaAs 异质结双极晶体管 (HBT), 其特征频率( $f_t$ ) 达到 54GHz, 最高振荡频率( $f_{max}$ ) 达到 71GHz, 并且, 这种方法工艺简单, 成品率高。文中还对该结果进行了分析, 提出了进一步提高频率特性的方法。

**关键词:** 异质结双极晶体管; 镍锢磷/镍砷; T 形发射极; 侧向内切

PACC: 7340J EEACC: 2560F; 2550E; 2550R

中图分类号: TN 325<sup>+</sup>. 3 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2002)05-0513-04

## 1 引言

随着通信、空间技术的发展, 越来越需要能工作在更高频率的器件。由于 GaAs HBT 比硅晶体管有更好的射频特性, 同时, GaAs HBT 具有很好的线性度和较高的功率附加效率, 能在单电源下工作, 并且 GaAs HBT 对光刻的精度要求不高, 降低了制作成本, 因而具有巨大的商业价值。例如, 门阵列、数模转换器、波分复用芯片电路以及通信中的射频电路等均可采用 HBT 进行设计。

目前, HBT 器件应用最广、市场最大的领域是民用通信。例如, 在 10Gbit/s 的光纤驱动器、手机中的功率放大器等电路中就大量采用 HBT 器件, 这些电路要求器件的特征频率能达到 40GHz 以上。本文的目的就是要研究一种工艺简单、成品率高、击穿特性好的 HBT 器件, 使之能满足上述通信电路的要求。

在 HBT 的制造过程中采用自对准方法可以减小集电结电容及基区串联电阻, 因而可以提高 HBT 的射频特性。通常有以下几种方法能形成自对准: (1) 把发射极金属做成 T 形结构<sup>[1]</sup>; (2) 采用假的倒梯形发射极<sup>[2]</sup>; (3) 利用侧墙工艺<sup>[3]</sup>; (4) 采用侧向腐

蚀<sup>[4]</sup>。本文采用了在发射极金属掩蔽下腐蚀发射极的侧向内切腐蚀方法。与前几种制作方法相比, 这种方法不需要增加工艺来制作 T 形发射极金属或侧墙, 只需要选择一定的腐蚀方法即可, 因而可以减少工艺的复杂性。此外, 在发射极与基极的自对准工艺中, 容易产生发射极与基极金属不能完全断开而造成发射极与基极短路的现象, 从而影响了成品率。而本文所采用的自对准结构能够使发射极金属与基极金属完全断开, 不会出现爬坡现象, 因而成品率高。

## 2 材料结构

器件所用的材料是采用 MOCVD 方法生长的, 如图 1 所示。在 GaAs 衬底上依次外延生长 n<sup>+</sup> GaAs 亚集电极层、低 n 掺杂 GaAs 集电极层、p<sup>+</sup> GaAs 基区层、n 掺杂 InGaP 发射极层、n<sup>+</sup> GaAs 层、渐变 InGaAs 帽层、n<sup>+</sup> InGaAs 帽层。发射极帽层采用 n<sup>+</sup> InGaAs 材料是因为能与 In 含量较高的 In-GaAs 材料形成良好欧姆接触的金属很多, 如 W/WSi<sup>[1]</sup>、Ti/W、Pt/Ti/Pt/Au、Ti/Pt/Au、Au/Ge/Ni/Ag/Au。渐变 InGaAs 帽层及 n 掺杂 GaAs 层的引入主要是为了缓解 n<sup>+</sup> InGaAs 帽层与 InGaP 层间的应力。发射极采用 InGaP 材料, 这是因为 In-

\* 国家重大基础研究(No. G2000006830403) 及中国科学院重大方向性(No. KGX2-101) 资助项目

钱永学 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 主要从事 HBT 器件及电路的研究。

刘训春 男, 1943 年出生, 研究员, 博士生导师, 长期从事化合物半导体器件及电路的研究。

2001-09-04 收到, 2001-11-16 定稿

©2002 中国电子学会

GaP 的稳定性比较好<sup>[5]</sup>, 且可以实现 InGaP 与 GaAs 的高选择比腐蚀. 集电极为 700nm 低掺杂的 GaAs 层, 这样可以较大幅度地提高集电结击穿电压, 因而器件的击穿特性好. 发射区、集电区为 Si 掺杂, 基区采用 C 掺杂<sup>[6]</sup>.

$n^+$	In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	30nm
Graded-	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$x: 0.5 \rightarrow 0$
$n^+$	GaAs	$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	100nm
$n$	InGaP	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	80nm
$p^+$	GaAs	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	60nm
$n$	GaAs	$3.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	700nm
$n^+$	GaAs	$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	500nm
Insulated GaAs substrate			

图 1 InGaP/GaAs HBT 材料结构图

Fig. 1 Structure of InGaP/GaAs HBT material

### 3 T形发射极及器件制作

采用普通接触曝光、金属剥离及台面腐蚀隔离等技术来制作发射结自对准 HBT. 发射极、基极、集电极金属分别为 Ti/Pt/Au、Pt/Ti/Pt/Au、Au-GeNi/Ag/Au. 其中, 发射极、基极均为非合金欧姆接触. 直接利用发射极金属作掩蔽腐蚀形成发射极, 这其中采用了侧向内切腐蚀. 图 2 为利用侧向内切腐蚀所得到的 T 形发射极, 该图为过腐蚀图形, 这是为了突出侧向内切腐蚀现象. 如果需要更小的侧向腐蚀, 可以控制腐蚀时间. 然后, 在 40℃下利用 HCl : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>(1 : 3) 腐蚀 InGaP, 这样, 基区金属可

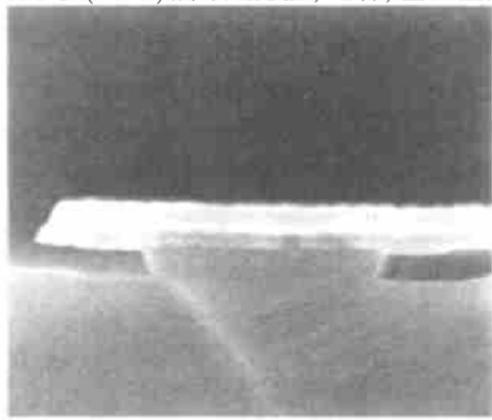


图 2 发射极的侧向内切腐蚀 发射极宽度为  $1.5 \mu\text{m}$ , 侧向腐蚀宽度为  $0.6 \mu\text{m}$ .

Fig. 2 Profile of lateral-cut The width of emitter is  $1.5 \mu\text{m}$ , and the width of lateral-cut is  $0.6 \mu\text{m}$ .

以与发射极金属形成自对准, 因而减小了基区串联电阻及集电结电容. 经过集电区和隔离岛腐蚀后, 光刻出集电极图形, 蒸发 AuGeNi/Ag/Au<sup>[7]</sup>, 剥离后合金. 整个器件制作过程中, 需要保证器件的清洁, 否则, 在腐蚀发射极 InGaP 层时发射极周围会出现乳白色小岛, 这会对随后的基区腐蚀产生不良影响. 器件采用聚酰亚胺在 240℃下钝化 30min, 然后, 利用空气桥把各电极引出. 整个器件的剖面图如图 3 所示.

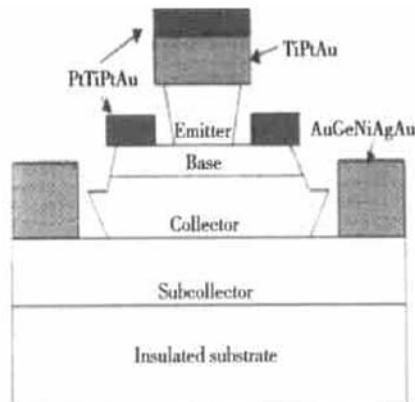


图 3 InGaP/GaAs HBT 剖面图

Fig. 3 Profile of InGaP/GaAs HBT

### 4 试验结果及讨论

所测试器件发射极面积为  $2.5 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , 发射结开启电压为 1.15V, 反向击穿电压为 10V, 集电结反向击穿电压为 18V, 直流放大倍数( $\beta$ )为 41, 残余电压( $V_{os}$ )为 0.15V, 发射极与集电极击穿电压( $BV_{ceo}$ )为 11.5V. 其直流  $I-V$  特性曲线如图 4 所示.

图 5 为用 HP-8510C 测得的 HBT 射频特性曲线(器件发射极面积为:  $2.5 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , 测试条件为:  $J_e = 2.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ,  $V_{ce} = 1.8 \text{ V}$ ). 实际测量的  $f_t$  为 54GHz, 利用文献[8]提供的公式计算得到  $f_{max}$  为 71GHz.

图 6 为利用文献[8]提供的公式并采用本文的参数所计算的曲线, 其中  $t_e$ 、 $t_b$ 、 $t_{sc}$ 、 $t_c$  分别为发射极、基极、集电结空间耗尽层、集电极传输时间. 从图中可以看出,  $t_{sc}$  随  $J_e$  增加而增加,  $t_c$ 、 $t_e$  均随  $J_e$  增加而减小, 在较高工作电流密度下,  $t_b$ 、 $t_{sc}$  对器件的高频特性影响较大, 而  $t_b$  主要与基区厚度、基区电子运动速度有关,  $t_{sc}$  主要与集电极耗尽层厚度、集电极饱和

速度有关,因而设计结构时应选用具有高电子迁移率的基区材料,具有高饱和速度的集电极材料,在可能的情况下尽量减小基区宽度,同时,在保证发射极

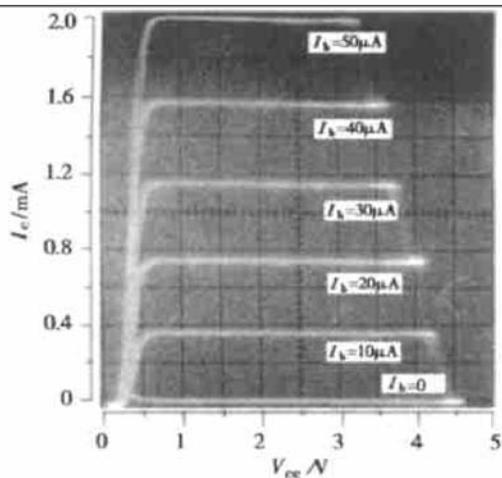


图4 InGaP/GaAs HBT  $I-V$  特性曲线

Fig. 4  $I-V$  characteristics of InGaP/GaAs HBT

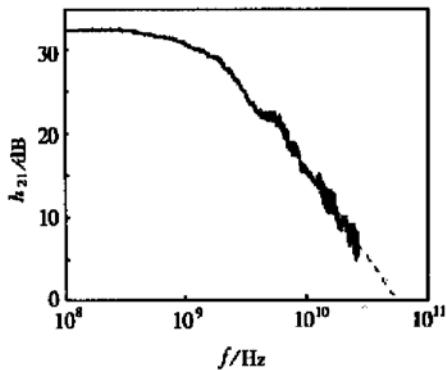


图5 利用 HP 8510C 测得的 HBT 射频特性曲线

Fig. 5 RF characteristics of InGaP/GaAs HBT measured by HP8510C

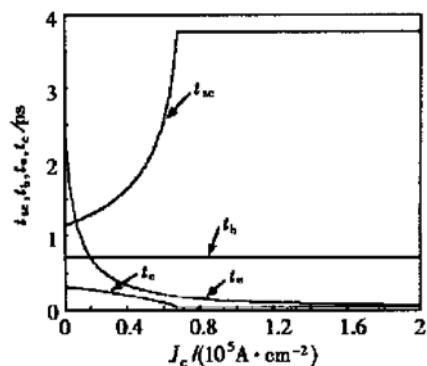


图6 各时间常数随电流密度( $J_c$ )的变化曲线

Fig. 6 Relationships between  $J_c$  and transmitting times

-集电极击穿电压要求的情况下,可适当减小集电区宽度以限制集电极耗尽层宽度。

如果对器件的击穿特性要求不太高,可将集电区宽度减小到 250nm,经模拟,在  $J_c = 1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ,  $V_{ce} = 2.0 \text{ V}$  时,  $f_t$  为 98GHz, 此时  $f_{\max} = 108 \text{ GHz}$ .

## 5 自对准与非自对准 HBT 的比较

由于采用自对准工艺,减小了发射极-基极间距及外基区面积,因而减小了集电结电容、基区串联电阻,从而提高了器件的高频特性.通过对本文所采用的结构进行模拟<sup>[8]</sup>,

$$t_{ec} = t_e + t_b + t_{sc} + t_c \quad (1)$$

$$f_t = \frac{1}{2\pi t_{ec}} \quad (2)$$

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{f_t}{2\pi R_b C_{je}}} \quad (3)$$

其中  $t_{ec}$  为总传输时间;  $R_b$  为基区电阻;  $C_{je}$  为集电极电容.

假设非自对准的基区电极与发射极间距为 1μm,而对于本文所采用的自对准结构器件这一间距只有 0.3μm.两种结果的比较如表 1 所示.其中  $f_{\max}$  为  $f_t$  取最大值时的最大振荡频率,由表中可以看出,在同时取最大特征频率的情况下,自对准 HBT 的  $f_{\max}$  比非自对准 HBT 的  $f_{\max}$  大得多.通过模拟,这两种结构的器件在更小尺寸下的射频特性差别会更明显.

表1 自对准 HBT 与非自对准 HBT 高频特性的比较

Table 1 Difference between self-aligned HBT and non-self-aligned HBT

器件类型	$f_t$ (最大值)/GHz	$f_{\max}$ /GHz
自对准 HBT	54	71
非自对准 HBT	51	45

## 6 总结

本文报道了一种发射结自对准的 HBT 器件,该器件工艺简单、成品率高、击穿特性好.与非自对准的 HBT 器件相比,用这种方法所作的器件由于减小了发射极-基极间距和外基区面积,从而减小了集电极电容及基极电阻,因而  $f_t$ 、 $f_{\max}$  均有所提高.本文还通过计算,提出了进一步提高自对准 HBT

频率特性的主要途径,即减小基区宽度和采用 In-GaAs 等具有更高迁移率的基区材料可以减小  $t_b$ ,选择具有高饱和速度的集电极材料,并将集电极厚度减小到一定程度可以减小  $t_{sc}$ .

## 参考文献

- [ 1 ] Masuda H, Ouchi K. High performance InP/InGaAs HBTs for 40Gb/s optical transmission ICs. IEICE Trans Electron, 1999, E82-c(3): 419
- [ 2 ] Ishibashi T. IEEE Electron Device Lett, 1987, 8(5): 194
- [ 3 ] Yosuke Ueda, Nobuyuki Hayama. Submicron-square emitter AlGaAs/GaAs HBT's with AlGaAs hetero-guarding. IEEE Electron Device Lett, 1994, 15(2): 66
- [ 4 ] Fresina M T. Selective self-aligned emitter ledge formation for heterojunction bipolar transistor. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(12): 555
- [ 5 ] Takahashi T, Sasa S. High-reliability InGaP/GaAs HBTs fabricated by self-aligned process. IEDM 1994 Tech Dig, San Francisco, 1994: 187
- [ 6 ] Yamada F M, Oki A K. Reliability analysis of microwave GaAs/AlGaAs HBTs with beryllium and carbon doped base. 1992 IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, Albuquerque, 1992: 739
- [ 7 ] Chen Jun, Liu Xunchun. In/AuGeNi/Ag/Au metallization Ohmic contacts on n-type GaAs. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(9): 811
- [ 8 ] Liu W. The Handbook of III-V Heterojunction Bipolar Transistor. 1998: 767

## Self-Aligned GaInP/GaAs HBT Device\*

Qian Yongxue, Liu Xunchun, Wang Runmei and Shi Ruiying

(Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A method to fabricate self-aligned GaInP/GaAs HBT devices is presented. With this method,  $f_T$  and  $f_{max}$  of the device can reach 54GHz and 71GHz respectively. This process is simple compared with other methods. The theoretical analysis about how to improve the RF characteristics of these devices is also described.

**Key words:** HBT; GaInP/GaAs; T-emitter; lateral-cut

PACC: 7340J      EEACC: 2560F; 2550E; 2550R

Article ID: 0253-4177(2002)05-0513-04

\* Project supported by National Key Basic Research Plan of China(No. G2000006830403) and Key Program of The Chinese Academy of Sciences (No. KGX2-I01)

Qian Yongxue male, was born in 1978. He is now a graduate student. His researching interest is in HBT devices and circuits.

Liu Xunchun male, was born in 1943. He is a professor and a tutor of PhD candidate. His research interest is in compound semiconductor devices and circuits.