

# 四元系 AlGaInP 为发射极 异质结双极晶体管研究\*

程知群 孙晓玮 束伟民 张兴宏 顾伟东 夏冠群

(中国科学院上海冶金研究所一室 上海 200050)

**摘要** 本文对 AlGaInP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)进行了研究,设计并制备了 AlGaInP 为发射极的叉指结构 HBT 器件. 研究结果表明, AlGaInP/GaAs HBT 具有较高的电流增益和较好的温度特性. 同时,由于对 AlGaInP 和 GaAs 腐蚀选择性大,因而工艺简单、重复性好.

EEACC: 2520D, 2560J

## 1 引言

异质结双极晶体管(HBT)以其优越的高频高速性能在空间技术、精密制导、智能武器及雷达、通讯等军事技术领域有着广泛的应用前景. HBT 成为微波单片集成电路(MMIC)及各种先进微波应用系统的关键器件. 目前,实验上已制备了截止频率( $f_t$ )和最大振荡频率( $f_{max}$ )超过 150GHz 的 HBT;理论上已发展了多种用于分析和设计的器件模型;HBT 的材料生长技术和工艺制备技术较为成熟. 因此,探索新型的 HBT 材料来提高器件的性能成为研究者非常感兴趣的问题. AlGaAs/GaAs HBT 具有极好的器件性能已广泛应用于高速电路和微波模拟电路中. 但这种材料有其不足之处. 主要是在导带多子带隙不连续,降低了发射效率. 虽然在发射极外延—缓变层可以降低这种不连续,但这又增加了 E/B 结的电荷复合<sup>[1]</sup>. 为了克服 AlGaAs/GaAs HBT 的上述缺点,本文对四元系 AlGaInP 为发射极的异质结双极晶体管进行了研究,结果表明 AlGaInP/GaAs HBT 较 AlGaAs/GaAs HBT 有更大的电流增益和更好的高温特性,且工艺制备简单,是一种很有应用前景的微波功率器件.

## 2 器件制备

Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>0.52-x</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT 材料是用采用金属有机物汽相外延(MOVPE)生长获得. HBT 器件结构见表 1,在衬底上外延 500nm 厚 GaAs 亚集电区,掺杂浓度  $n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,其上是 400nm 厚 GaAs 集电区,掺杂浓度  $n = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; 掺 C 基区 GaAs 厚 80nm,浓度  $n = 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ; 基区上是 20nm 的缓变层浓度  $n = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,发射极是厚 250nm Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.22</sub>In<sub>0.48</sub>P,浓度  $n = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,紧接着是 20nm 的缓变层,浓度  $n = 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,再

\* 国家“95”攻关项目

程知群 男, 1964 年出生, 博士, 现从事微波单片集成电路的研究  
1998-09-10 收到, 1998-02-03 定稿

上是 50nm Ga<sub>0.52</sub>In<sub>0.48</sub>P, 浓度  $n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 最后是 100nm GaAs 盖层, 浓度  $n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

表 1 Al<sub>x</sub>Ga<sub>0.52-x</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT 材料的层结构

厚度/nm	层	(x)	(y)	类型	掺杂浓度/cm <sup>-3</sup>
100	GaAs			N	$5.0 \times 10^{18}$
50	Ga(x)InP	0.52		N	$2.0 \times 10^{18}$
20	Grade			N	$8.0 \times 10^{17}$
250	Al(x)Ga(y)InP	0.3	0.22	N	$7.0 \times 10^{17}$
20	Grade			N	$5.0 \times 10^{17}$
80	GaAs-C			P	$5.0 \times 10^{19}$
400	GaAs			N	$1.0 \times 10^{17}$
500	GaAs			N	$5.0 \times 10^{18}$

HBT 器件的制备采用双台面型结构, 如图 1 所示 首先蒸 AuGeNi/Au, 再在 400 °C 下合金 30s 形成欧姆接触发射极电极; 发射极台面采用湿法选择腐蚀形成, 用 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> :

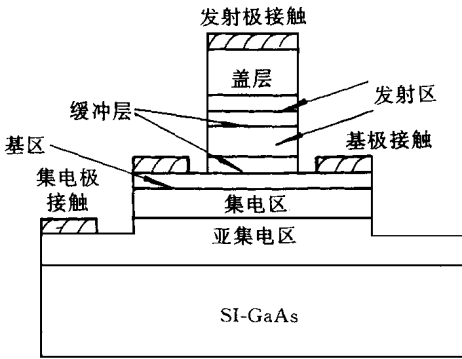


图 1 HBT 器件结构示意图

H<sub>2</sub>O = 3 : 1 : 50 腐蚀掉盖层 GaAs, 再换用 1HCl

1H<sub>2</sub>O 继续腐蚀直至基极 GaAs, 形成发射极台

面 蒸 Cr/Au 并合金形成基极欧姆接触电极 用

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 3 : 1 : 50 腐蚀基区及集

电区至亚集电区, 形成基极台面 集电极电极的

形成与发射极相同 由于对 Al<sub>x</sub>Ga<sub>0.52-x</sub>In<sub>0.48</sub>P 与

GaAs 腐蚀都有很高的选择性<sup>[3-5]</sup>. 因此, 在发射

极台面腐蚀时, 不会出现基区过腐蚀问题, 使工

艺更为简单, 提高了工艺可重复性 设计制备的

叉指结构 HBT 器件, 有四个发射指, 每指面积为

$3 \times 30 \mu\text{m}^2$ . 基区方块电阻为  $194 \Omega/\square$ .

### 3 结果与分析

N-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.22</sub>In<sub>0.48</sub>P/P-GaAs E/B 结的 I-V 特性由图 2 给出, 其正向电流开启电压为 0.5V, 反向偏置击穿电压为 17V. 低的正向电流开启电压说明该结构体系的导带峰势垒较低 用 HP4145B 半导体参数测试仪测得共

发射极晶体管直流输出特性如图 3 所示, 图中工作点处,  $V_{CE} = 3.5V$ ,  $I_C = 8.53mA$ ,  $h_{fe} = 56.9$ . 从图可知: 最大直流电流增益  $h_{fe}$  达 56.9, 比文献 [11] 报道的  $h_{fe} = 40$  大得多. 图 4 给出了电流增益  $\beta$  随发射极电流密度的变化曲线; 在低发射极电流密度时,  $\beta$  值小, 该现象说明由于缺陷的存在, E/B 结有明显的空间电荷复合; 当发射极电流密度较大时, 电流增益  $\beta$  值大, 因为这时注入

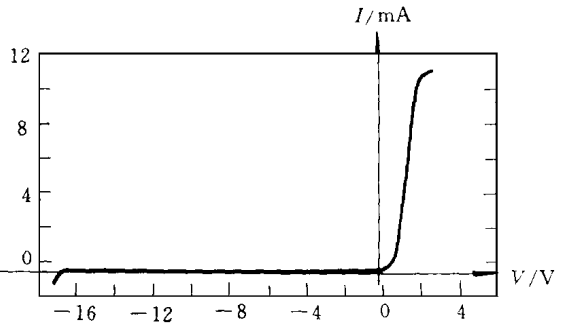


图 2 异质结 E/B 的 I-V 特性

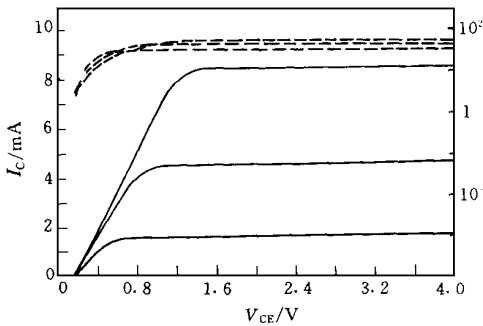


图 3 晶体管直流转移特性

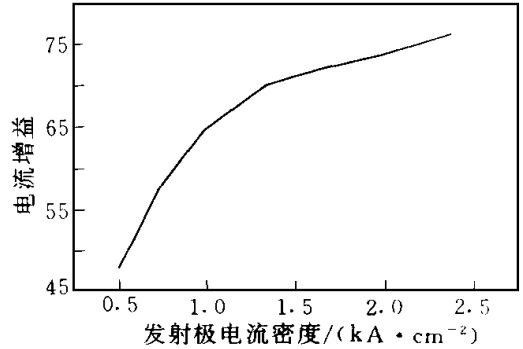


图 4 电流增益与发射极电流密度变化曲线

电流大, 相比之下缺陷电流可忽略不计. 为了避免管子损坏, 电流密度未加很大; 如果进一步增大电流密度, 电流增益会更大. 表 2 对几种材料结构 HBT 的电流增益作了对比.

表 2 几种材料结构 HBT 的电流增益比较

结构	发射极面积/cm <sup>2</sup>	发射极电流密度/(A · cm <sup>-2</sup> )	$\beta$	文献
GaInP/GaAs	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^3$	30.0	[12]
GaInP/GaAs	$3.6 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^3$	50.0	[13]
GaInP/GaAs	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10$	36.0	[13]
AlGaAs/GaAs	$2.5 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10$	45.0	[14]
AlGaInP/GaAs	$3.6 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^3$	76.4	本文

由表可知, 本文设计制备的叉指结构 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.22</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT 电流增益较大. 由于 AlGaInP 具有较大的有效带隙, 同时它与 GaAs 晶格匹配  $\Delta E_v$  较大, 有效地抑制了基区反向注入电流, 提高了电流增益.

对 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.22</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT 进行高温实验表明, 温度从室温上升到 673K, 电流增益仅下降 10%, 而且  $I_c$  随  $V_{ce}$  变化缓慢, 具有很好的线性. Al<sub>x</sub>Ga<sub>0.52-x</sub>In<sub>0.48</sub>P 在所有与 GaAs 晶格匹配的 III-V 族化合物中具有最大的有效带隙, 随 Al 组分  $x$  的增大有效带隙从 0.95eV 增大到 2.32eV. 因此, AlGaInP/GaAs HBT 具有优良的高温特性. 另一方面, 在 HBT 的 P 型基区掺杂中, 一般采用 Be, Mg, Zn 元素为掺杂剂. 由于这些杂质扩散系数大, 在生长发射区时容易发生基区杂质向发射区外扩的问题<sup>[6,7]</sup>.

尽管可以在发射区基区间设置隔离层, 但仍不能保证异质结与 PN 的精确吻合. 对重掺杂 (杂质密度大于  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) 基区 HBT, 工作在高温和高功率下, 上述杂质扩散更为严重, 导致 HBT 晶体管热和电性能不稳定. 在 Al<sub>x</sub>Ga<sub>0.52-x</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT 中, 采用扩散系数小的 C 元素为 P 型基区掺杂剂可有效地克服杂质扩散问题, 从而大大提高了器件的热电稳定性.

#### 4 结论

本文成功地设计和制备了叉指结构 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.22</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs HBT, 获得器件的电流增

益达 76.4, 器件有较好的高温特性  $A\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$  HBT 的成功制备为 HBT 进一步提高频率和功率特性开辟了新的领域

### 参 考 文 献

- [ 1 ] I.D. Robertson, MM IC DESIGN, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1995
- [ 2 ] M. O. Watanade and Y. Ohba, Appl Phys Lett, 1987, **50**(14): 906
- [ 3 ] J. R. Lothian, J. M. Kuo, F. Ren *et al*, J. Electron. Mater., 1992, **21**(4): 441.
- [ 4 ] J. R. Lothian, J. M. Kuo, W. S. Hobson *et al*, J. Vac. Sci. Technol. B, 1992, **10**(3): 1061.
- [ 5 ] T. R. Stewart and D. P. Bour, J. Electrochem. Soc., 1992, **130**(4): 1212
- [ 6 ] T. De Lyon, H. C. Casey *et al*, in 1987 Device Research Conf Abstract IV, A-7.
- [ 7 ] W. T. Moore, C. T. Minter *et al*, in Proc 4th Canadian Semiconductor Conf (Ottawa), 1988
- [ 8 ] Q. M. Zhang, G. L. Tan *et al*, IEEE Trans Electron Devices, 1992, **39**: 2430
- [ 9 ] T. De Lyon, H. C. Casey *et al*, IEEE Trans Electron Devices, 1988, **35**: 1389
- [ 10 ] M. E. Hafizi, C. R. Crowell *et al*, IEEE Trans Electron Devices, 1990, **37**: 1779
- [ 11 ] Yue-Fei Yang, Chung-Chi Hsu, Hai-Jiang Ou *et al*, IEEE Trans Electron Devices, 1997, **44**: 2122
- [ 12 ] M. J. Mondry *et al*, IEEE Electron Device Lett, 1985, **EDL-6**: 175
- [ 13 ] William Liu *et al*, IEEE Electron Device Lett, 1992, **13**: 510
- [ 14 ] William Liu, Electron Lett, 1991, **27**: 2115

## Heterojunction Bipolar Transistor With Quarternary AlGaInP Alloy Emitter

Cheng Zhiquan, Sun Xiaowei, Shu Weimin, Zhang Xinghong, Gu Weidong, Xia Guanqun

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Received 10 September 1998, revised manuscript received 3 February 1999

**Abstract** This paper investigates the design and fabrication of AlGaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor with cross-finger construction. The results show that the device in our investigation have high current gain and good temperature performance. The fabrication process of AlGaInP/GaAs HBTs is simple and repeatable due to well selective etching characteristic on the interface between AlGaInP and GaAs materials.

EEACC: 2520D, 2560J