

# 高功率附加效率的 InGaP/ GaAs 功率 HBT<sup>\*</sup>

郑丽萍 袁志鹏 樊宇伟 孙海锋 狄浩成 王素琴 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子学研究所, 北京 100029)

**摘要:** 采用发射极-基极金属自对准工艺,成功研制出了 InGaP/ GaAs 功率 HBT. 发射极尺寸为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$  的功率器件的截止频率和最高振荡频率分别为 55 GHz 和 35 GHz. 在片 load-pull 测试表明:当工作频率为 1 GHz 时,器件工作在 AB 类,该功率管最大输出功率为 23.5 dBm,最大功率附加效率达 60%,  $P_{1\text{dB}}$  的输出功率为 21 dBm,对应增益为 16 dB,工作电压为 3.5 V.

**关键词:** 功率附加效率; InGaP/ GaAs; 功率 HBT

**EEACC:** 2560Z

**中图分类号:** TN322<sup>+</sup>.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)01-0092-04

## 1 引言

近年来, HBT 以其固有的:如单电源工作、高效率、高功率密度、高线性度等优点,受到越来越多的重视<sup>[1~3]</sup>. 目前, HBT 已广泛用于各种高频模拟和数字电路中. 移动通信业的快速发展带动了相关产业的发展,使得 GaAs HBT 以其优越的高频功率性能被广泛用于移动通信系统的射频功率放大器中. 全球著名的手机功放供货商 RFMD 公司就采用了 GaAs HBT 作为其产品的功率器件<sup>[4]</sup>.

近年来,由于国家加大投入, HBT 的研究工作获得了很大的进展. 在功率应用上, 严北平等研制出了 S 波段的 AlGaAs/ GaAs 功率异质结晶体管, 获得了 300 mW 的峰值输出功率及 41% 的最大功率附加效率<sup>[5]</sup>. 钱锋等人研制出了 X 波段的 AlGaAs/ GaAs 功率异质结晶体管, 峰值输出功率达到 5 W<sup>[6]</sup>. 但 AlGaAs 材料本身存在一些固有缺点, 如 AlGaAs 与 GaAs 的选择性腐蚀比低, 器件的成品率得不到保证; 对于目前常用的 npn 型器件, AlGaAs/ GaAs 的能带偏移大部分在导带上, 价带偏移小, 因此注入效率较低; AlGaAs 中的 Al 在材料生长时易与 O 结合形

成深能级陷阱, 引起了可靠性问题. 因而开始考虑以 InGaP 替代 AlGaAs 作为发射极材料. InGaP 与 GaAs 间可实现良好的选择性腐蚀, 提高了器件的成品率; 因为 BE 结有更小的导带不连续和更大的价带不连续, 注入效率更高; 而且, InGaP/ GaAs 界面的复合中心密度比 AlGaAs/ GaAs 低, 因此基区电流小, 电流增益大. 由于以上优点, InGaP/ GaAs HBT 逐渐取代 AlGaAs/ GaAs HBT, 成为目前 GaAs HBT 的主流产品<sup>[7,8]</sup>.

本文采用 BE 金属自对准工艺, 设计和制作了 InGaP/ GaAs 功率异质结双极晶体管. 通过对材料外延结构和器件几何尺寸的优化, 获得了微波功率性能良好的器件.

## 2 功率器件的设计和制作

发射极尺寸为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$  的功率器件所用的材料为 Kopin 公司提供的采用 MOCVD 技术生长的 100 mm GaAs 晶片. 对于功率应用的器件, 集电区厚度的选择必须在高击穿电压和高频率性能上作折中考虑, 这里选用集电区厚度为 700 nm 的外延材料. 表 1 为 InGaP/ GaAs 功率 HBT 材料的外延层结

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号:2002CB311902), 国家自然科学基金(批准号:60146001), 科学院知识创新工程重要方向资助项目  
郑丽萍 女, 1975 年出生, 博士研究生, 主要从事 HBT 器件和电路的研究.

2003-12-29 收到, 2004-03-18 定稿

构. 盖帽层中  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的作用主要是为了形成良好的欧姆接触.

表 1 InGaP/ GaAs 功率 HBT 的外延层结构  
Table 1 Structure of InGaP/ GaAs power HBT

Layer name	Material	Doping / $\text{cm}^{-3}$	Thickness / nm
Cap layer	$\text{n}^+ - \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} (x = 0.6)$	$> 1 \times 10^{19}$	50
Cap layer	$\text{n}^+ - \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} (x = 0.6 \sim 0)$	$> 1 \times 10^{19}$	50
Cap layer	$\text{n}^+ - \text{GaAs}$	$5 \times 10^{18}$	120
Emitter layer	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P} (x = 0.5)$	$3 \times 10^{17}$	50
Base layer	$\text{p}^+ - \text{GaAs}$	$4 \times 10^{19}$	60
Collector	$\text{n}^- - \text{GaAs}$	$3 \times 10^{16}$	700
Subcollector	$\text{n}^+ - \text{GaAs}$	$5 \times 10^{18}$	500

图 1 是所研制的发射极面积为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$  的功率器件的显微照片. 每个发射极指的间距为  $40\mu\text{m}$ , 间距太小容易引发器件热失效, 太大则使器件的尺寸变大, 增加制作成本. 为了改善器件的高频特性, 采用了低寄生的空气桥互连. 在版图设计中, 尽可能使器件对称分布, 这样确保流到每个发射极指的电流基本相同, 避免了因电流分布不均匀而引起的电流增益塌陷.

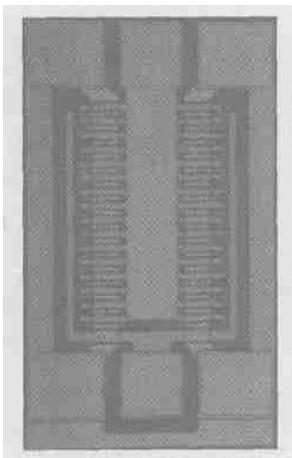


图 1 制作的功率器件的显微照片 发射极面积为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$ .

Fig. 1 Microscope photograph of the power HBT with the emitter size of  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$

为了减小基极电阻和 BE 结电容, 提高器件的高频特性, 采用了 BE 金属自对准工艺<sup>[9]</sup>. 器件制作的主要工艺流程如下: 蒸发发射极金属 Ti/ Pt/ Au; 以发射极金属为掩膜, 湿法腐蚀盖帽层及 InGaP 至基区表面; 蒸发基极接触金属 Ti/ Pt/ Au, 剥离后形成发射极金属和基极金属自对准; 光刻集电区, 并湿法腐蚀到集电极; 光刻有源区, 湿法腐蚀实现器件隔离;

电子束蒸发集电极接触金属 AuGeNi/ Ag/ Au, 在  $\text{N}_2$  气氛中合金化形成欧姆接触; PECVD 淀积钝化介质, 最后蒸发互连金属 Ti/ Au 以连接三个不同的电极. 正面工艺完成后, 对晶片进行减薄, 综合考虑低热阻和微波损耗两方面因素, 选择减薄厚度为  $100\mu\text{m}$ .

### 3 功率器件性能

功率器件的直流参数由 HP4155 半导体参数分析仪测得. 图 2 是尺寸为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$  的功率器件的共发射极  $I_c - V_{ce}$  特性. 图中  $I_b = 40\mu\text{A}/\text{step}$ , 直流增益为 38, 偏移电压为  $300\text{mV}$ , 膝点电压  $0.7\text{V}$ . 器件的  $\text{BV}_{\text{ceo}}$  为  $12\text{V}$ . 该功率器件是面向高功率附加效率和低偏置电压的移动通信系统, 低的膝点电压是获得低功耗及高功率附加效率的保证.

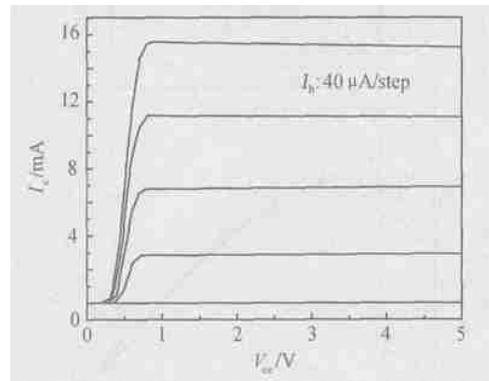


图 2 功率器件的共发射极  $I_c - V_{ce}$  输出特性 发射极尺寸为  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$ .

Fig. 2 Common emitter  $I_c - V_{ce}$  of the power HBT with the emitter size of  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$

图 3 给出该功率器件的高频测试结果. 由 HP8510C 矢量网络分析仪与共面波导微波探针在片测得的. 器件的偏置电压  $V_{ce} = 2\text{V}$ , 偏置电流  $I_c = 210\text{mA}$  时, 由测得的  $S$  参数推算出相应的直流增益  $H_{21}$  及最大可资用 (稳定) 功率增益 ( $G_{\text{max}}$ ), 然后根据  $-20\text{dB}/\text{oct}$  的斜率倒推得到器件的截止频率  $f_t$  及最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  分别为  $55$  和  $35\text{GHz}$ . 当频率为  $1\text{GHz}$  时, 最大可资用功率增益  $G_{\text{max}}$  为  $30$ . 对于相同几何尺寸的单指器件, 截止频率  $f_t$  及最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  分别为  $62$  和  $58\text{GHz}$ , 如图 4 所示. 与单指器件的频率特性相比, 多指功率器件的  $f_t$  变化不大, 但  $f_{\text{max}}$  下降很快, 这主要是由于并联后寄生参量增大的缘故. 因此, 对于功率应用的器件, 提高单指器件的最高振

荡频率对改善功率管的微波功率性能最为关键.

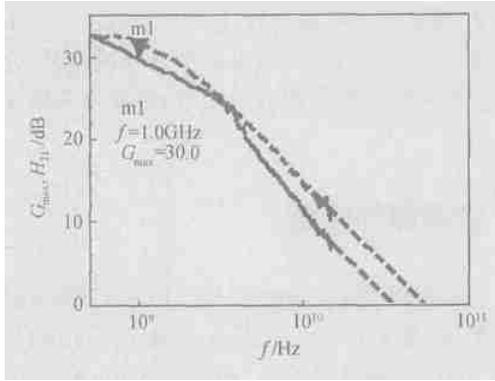


图 3 功率器件电流增益 ( $H_{21}$ )、最大可用或稳定增益 ( $G_{max}$ ) 随频率的变化曲线  $V_{ce} = 2V, I_c = 210mA$ . 实线为  $G_{max}$ , 虚线为  $H_{21}$ .

Fig. 3 Variation of current gain ( $H_{21}$ ) and maximum available or stable gain ( $G_{max}$ ) with frequency of power HBT Solid line is  $G_{max}$ , dot line is  $H_{21}$ .

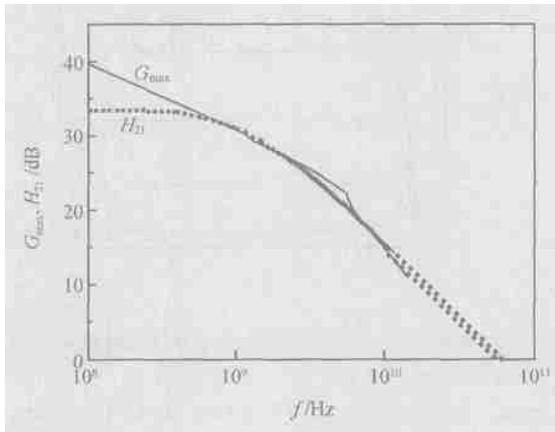


图 4 单指器件电流增益 ( $H_{21}$ )、最大可用或稳定增益 ( $G_{max}$ ) 随频率的变化曲线  $V_{ce} = 2V, I_c = 18mA$ . 实线为  $G_{max}$ , 虚线为  $H_{21}$ .

Fig. 4 Variation of current gain ( $H_{21}$ ) and maximum available or stable gain ( $G_{max}$ ) with frequency of single finger HBT Solid line is  $G_{max}$ , dot line is  $H_{21}$ .

器件的微波功率特性由香港科技大学 load-pull 在片测试系统测得,如图 5 所示. 该图给出了测试频率为 1GHz 时,器件的输出功率 ( $P_{out}$ )、功率附加效率(PAE)及功率增益 ( $G_p$ ) 随输入功率 ( $P_{in}$ ) 的变化曲线,器件的工作电压  $V_{ce} = 3.5V$ ,工作在 AB 类. 从图中可以看到,器件的最大输出功率为 23.5dBm,峰值功率附加效率达到了 60%,相应的功率增益为 12dB. 1dB 压缩点的输出功率  $P_{1dB}$  为 21dBm,相应的

PAE > 50%,功率增益为 16dB. 器件展现出了良好的微波功率特性.

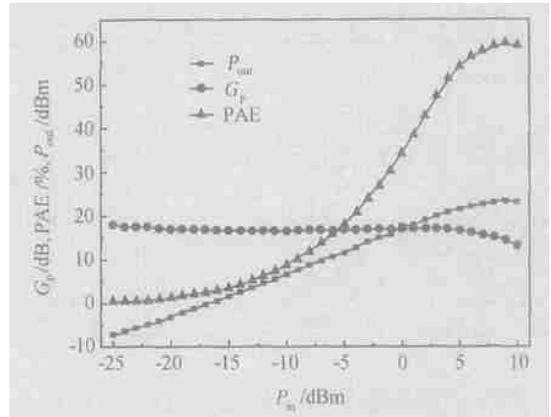


图 5 器件的连续波输出功率、功率附加效率、功率增益随输入功率的变化曲线

Fig. 5 Measured CW output power, PAE, power gain ( $G_p$ ) of a  $(3\mu m \times 15\mu m) \times 16$  HBT with  $V_{ce}$  of 3.5V

### 4 结论

利用 BE 金属自对准、空气桥互连以及背面减薄等工艺,成功设计和研制出了 L 波段 InGaP/ GaAs 功率 HBT. 器件的最大输出功率为 23.5dBm,最大功率附加效率达到了 60%;  $P_{1dB}$  输出功率为 21dBm,相应的 PAE > 50%,功率增益为 16dB. 这是国内首次研制成功功率附加效率高达 60% 的 InGaP/ GaAs 功率异质结双极晶体管.

### 参考文献

[ 1 ] Liu W. Handbook of heterojunction bipolar transistor. John Wiley&Sons,1998

[ 2 ] Ali F, Gupta A. Higgins A. Advances in GaAs HBT power amplifiers for cellular phones and military applications. IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium,1996: 61

[ 3 ] Hayama N, Kim C W, Takahashi H, et al. High-efficiency, small-chip AlGaAs/ GaAs power HBTs for low-voltage digital cellular phones. IEEE MIT-S Digest, 1997:1307

[ 4 ] Art G, Mike F, Larry K, et al. Transfer and qualification of a layout-compatible second source HBT technology for mobile phone applications. GaAs Mantech,1999

[ 5 ] Yan B P, Zhang H M, Dai X Y. S-band AlGaAs/ GaAs power heterojunction bipolar transistors with 0.3W output power. Chinese Journal of Semiconductors,2001,22(3): 250 (in Chinese) [ 严北平, 张鹤鸣, 戴显英. S 波段 0.3W HBT 功率管. 半导体学报,2001,

- 22(3) :350]
- [ 6 ] Qian F, Chen X J. X-band power heterojunction bipolar transistor. Research & Progress of SEE, 2003, 23(1) :45 (in Chinese) [ 钱锋, 陈效建. X 波段功率异质结双极晶体管. 固体电子学研究与进展, 2003, 23(1) :45 ]
- [ 7 ] Ueda O, Kawana A. Current status of reliability of InGaP/ GaAs HBTs. Solid State Electron, 1997, 41 :1605
- [ 8 ] Takahashi T, Sasa S, Kawano A, et al. High reliability InGaP/ GaAs HBT fabricated by self-aligned process. Proc IEMD, 1994 :191
- [ 9 ] Zheng L P, Liu X Y, Yuan Z P, et al. Passivation ledge fabrication and its effect on the performance of self-aligned InGaP/ GaAs HBT with difference emitter sizes. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(3) :312 (in Chinese) [ 郑丽萍, 刘新宇, 袁志鹏, 等. 钝化边的制作及其对不同尺寸自对准 InGaP/ GaAs HBT 性能的影响. 半导体学报, 2004, 25(3) :312 ]

## High Power-Added Efficiency In GaP/ GaAs Power HBT \*

Zheng Liping, Yuan Zhipeng, Fan Yuwei, Sun Haifeng, Di Haocheng,  
Wang Suqin, Liu Xinyu, and Wu Dexin

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

**Abstract :** A power HBT with emitter size of  $(3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}) \times 16$  is fabricated using base-emitter metal self-aligning process. The  $f_i$  and  $f_{\text{max}}$  of the power HBT are 55 and 35 GHz, respectively. When the power HBT operates in class AB at a collector bias of 3.5V, a maximum 23.5dBm output power with 60% peak power-added efficiency and 21dBm compress output power with 16dB power gain are achieved.

**Key words :** power-added efficiency; InGaP/ GaAs; power HBT

**EEACC :** 2560Z

**Article ID :** 0253-4177(2005)01-0092-04

\*Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB31190), National Natural Science Foundation of China (No. 60146001), and the CAS Pilot Project of the National Knowledge Innovation Program (KIP)

Zheng Liping female, was born in 1975, PhD candidate. Her research fields are in HBT devices and circuits.

Received 29 December 2003, revised manuscript received 18 March 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics