

C 波段 3.5W/mm, PAE > 40 % 的 InGaP/ GaAs HBT 功率管 *

申华军[†] 陈延湖 严北平 葛 霁 王显泰 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 通过优化 InGaP/ GaAs 异质结双极晶体管(HBT)的材料结构和器件结构,采用 BE 金属自对准、发射极镇流和电镀空气桥等工艺技术,研制了 C 波段 InGaP/ GaAs HBT 功率管. 其击穿电压 BV_{CBO} 大于 31V, BV_{CEO} 大于 21V; 在 5.4GHz 时连续波(CW)饱和输出功率达到 1.4W,功率密度达到 3.5W/mm,功率附加效率(PAE)大于 40%.

关键词: InGaP/ GaAs; 异质结双极晶体管; 功率管

EEACC: 2560J; 2560P

中图分类号: TN325⁺. 3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)09-1612-04

1 引言

HBT 具有功率密度高,线性度好,易于实现功率匹配和宽带匹配等优点,并可以单电源供电工作,电路设计更简化、灵活. InGaP/ GaAs HBT 功率器件和电路广泛应用于无线通信设备(如手机、蓝牙通信、WLAN、卫星转发器等)的功放电路中^[1~3]. InGaP/ GaAs HBT 与 AlGaAs/ GaAs HBT 相比,具有偏移电压更小,电流增益随温度变化更加稳定的优点;且不含有 Al 及相关缺陷,器件稳定性更好,可靠性更高;InGaP 与 GaAs 之间更容易实现选择性腐蚀,工艺重复性好,成品率高.

目前国内对 InGaP/ GaAs HBT 的研究较少,主要集中在高速和小功率应用^[4,5]. 本文通过优化材料结构参数和器件结构参数,采用国产 HBT 外延材料研制出高击穿 InGaP/ GaAs HBT 功率管,发射极面积为 $10 \times (40\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m})$ 的功率管在 9V 偏置电压 AB 类工作状态下,5.4GHz 时连续波输出功率达到 1.4W,功率密度达到 3.5W/mm,是目前国内最好的报道结果,对于开展 HBT 功率器件的实用化研究和单片电路研究具有重要意义.

2 器件材料和结构设计

2.1 器件外延材料结构参数设计

GaAs HBT 功率器件外延材料结构设计的关键是集电区外延层的优化设计,以满足高电压、大电

流工作的要求. 为了获得较高的击穿电压,集电结耗尽层的宽度 X_{dep} 要足够宽,因而需要增加集电区外延层厚度 X_C ,并降低集电区掺杂浓度 N_C . 另一方面, HBT 集电区的空间电荷渡越时间与空间电荷区厚度成正比,过厚的集电区将导致 f_T 的下降. 根据 Kirk 电流密度的关系式

$$J_{Kirk} = qN_C v_{sat}$$

可知,为了使 HBT 功率管具有较大的工作电流,集电区掺杂浓度 N_C 不能太低. 因此,功率 HBT 的集电区材料结构设计需要依据以上讨论折中优化,经过不同材料结构的实验比较,选择集电区厚度为 1000nm,掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$.

表 1 所示为 HBT 外延材料结构的优化设计结果. 基区采用 Be 掺杂 $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的高掺杂外延层,

表 1 InGaP/ GaAs HBT 的器件材料结构
Table 1 Material structure of InGaP/ GaAs HBT

Layer	x	Thickness / nm	Doping concentration / cm^{-3}
$n^+ - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$	0.6	50	$> 1 \times 10^{19}$
$n^+ - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$	0.6 ~ 0	50	$> 1 \times 10^{19}$
$n^+ - \text{GaAs}$		250	5×10^{18}
$n^- - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$	0.5	50	3×10^{17}
GaAs		5	undoped
$p^{++} - \text{GaAs}$		80	$> 4 \times 10^{19}$
GaAs		5	undoped
$n^- - \text{GaAs}$		1000	1×10^{16}
$n^+ - \text{GaAs}$		500	5×10^{18}

SI GaAs

* 中国科学院创新基金资助项目(批准号: KGCX2-SW-107)

[†] 通信作者. Email: tohuajun@hotmail.com

以降低基区电阻,提高器件频率特性,在基区层上下分别加入 5nm 未掺杂 GaAs 层,以阻止基区掺杂 Be 的扩散;发射极帽层采用 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 外延层过渡到 InGaAs 外延层,亚集电区采用 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 外延层,以降低发射极和集电极串联电阻,提高效率。

2.2 器件几何结构参数设计

HBT 器件的结构参数设计包括:发射极的长度和宽度的选择,多指 HBT 排列的拓扑结构以及镇流措施等.高频工作时,为了降低发射极电流集边效应的影响,并考虑发射极接触孔刻蚀工艺和高温分布效应,选择发射极宽度 W_E 为 $2.5 \mu\text{m}$,发射极长度 L_E 为 $40 \mu\text{m}$.

由于 GaAs 衬底的热导率差和各 HBT 之间的热耦合作用,导致 HBT 功率管发生电流增益塌陷现象,如图 1 所示.抑制电流增益塌陷的措施有降低器件热阻、引入镇流电阻等,镇流电阻是最直接有效的方法.本文采用优化设计的发射极镇流电阻 R_E 来抑制电流增益塌陷,每一个发射极上的 R_E 分担了加在 BE 结上的电压降,起到了负反馈的作用,单指 HBT 所需的最小镇流电阻 $R_{E\text{-opt}}$ 的公式为^[6]

$$R_{E\text{-opt}} = R_{th} \cdot BV_{CEO} - 2 \left(\frac{kT_A}{q} \times \frac{R_{th} \cdot BV_{CEO}}{I_{Kirk}} \right)^{1/2}$$

式中 R_{th} 为器件的热阻; β 为热电反馈系数; T_A 为环境温度; α 为电流理想因子; I_{Kirk} 为 Kirk 电流.衬底厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的 GaAs HBT 晶体管中, $\beta = 1.2 \text{ mV/V}$, $R_{th} = 650 \text{ }^\circ\text{C/W}$, $\alpha = 1$.假定 $I_{Kirk} = 20 \text{ mA}$, $BV_{CEO} = 20 \text{ V}$, $T_A = 300 \text{ K}$,则计算每个 HBT 所需的最小发射极镇流电阻为 7Ω .为了有效地镇流,设计每个 HBT 的 R_E 为 10Ω .采用十指 HBT 并排连接的拓扑结构,相邻 HBT 晶体管之间相隔约 $40 \mu\text{m}$,以降低热互耦。

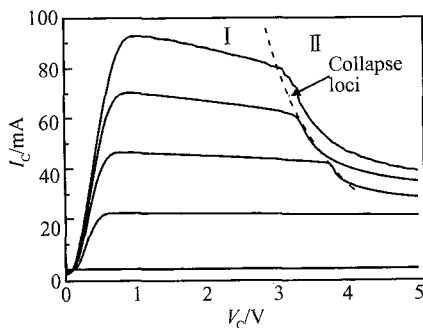


图 1 多指未镇流 InGaP/ GaAs HBT 器件的 $I-V$ 特性
Fig. 1 $I-V$ characteristics of multi-fingers InGaP/ GaAs HBT without ballasting resistor

3 器件制备及性能测试

3.1 功率管制作

在中国科学院微电子研究所的 100mm 化合物工艺线上完成了 HBT 功率管的流片,器件的主要工艺流程包括:蒸发发射极金属,以发射极金属为掩蔽腐蚀盖帽层,钝化 Ledge 制作,蒸发自对准基极金属,腐蚀集电极台面和器件隔离台面,蒸发集电极金属并合金, Si_3N_4 介质钝化保护,溅射 NiCr 电阻,金属布线互连,电镀空气桥,背面减薄和背孔刻蚀,背面金属化等. BE 金属自对准工艺可以最小化发射极和基极之间的距离,降低外基区电阻,有助于提高器件的高频性能;外基区耗尽的 InGaP 层形成钝化 Ledge 结构^[7],有助于提高器件的增益和可靠性.集电极采用电镀空气桥互连,减薄衬底至 $100 \mu\text{m}$, Pad 背面通孔并背面金属化,有效地降低功率管的热阻,提高器件的高频功率性能和热稳定性.针对 HBT 功率管高台面差等特点,进行了 HBT 功率器件工艺研究,优化了工艺流程,以上措施使 HBT 功率管成品率大于 90%.

图 2 为制得的 InGaP/ GaAs HBT 功率管单胞的显微镜照片,发射极面积为 $10 \times (40 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m})$.图 3 为 HBT 功率管的击穿电压特性, BV_{CBO} 大于 31 V , BV_{CEO} 大于 21 V ,满足 9 V 工作电压的需求,可见集电区外延层参数设计合理。

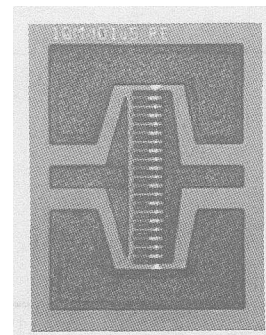


图 2 InGaP/ GaAs HBT 功率管照片
Fig. 2 Picture of the InGaP/ GaAs HBT power transistor

图 4 为所研制功率管的 $I-V$ 特性,可见 R_E 有效镇流,在 10 V 集电极电压时没有出现电流增益塌陷现象,功率管的热稳定性良好.图 5 为直流增益随集电极电流密度的变化曲线,最大电流增益大于 170,对应集电极电流密度为 33 kA/cm^2 ,最大工作电流可达 330 mA 。

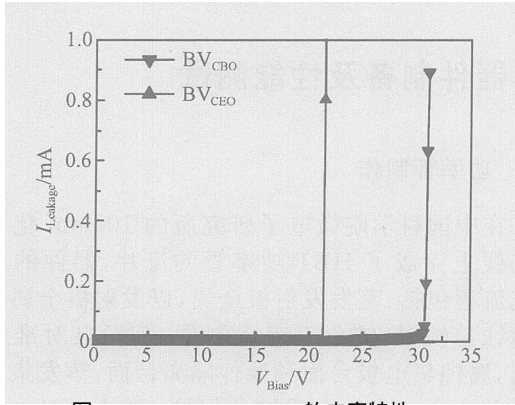


图 3 InGaP/GaAs HBT 的击穿特性

Fig. 3 Measured B-C and E-C junction breakdown voltage of the InGaP/GaAs HBT

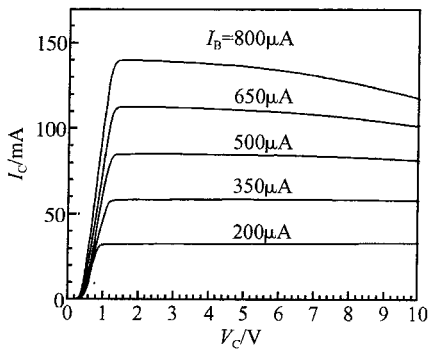


图 4 器件尺寸为 10 x (40um x 2.5um) InGaP/GaAs HBT 的 I-V 特性

Fig. 4 I-V characteristics of InGaP/GaAs HBT with 10 x (40um x 2.5um) emitters

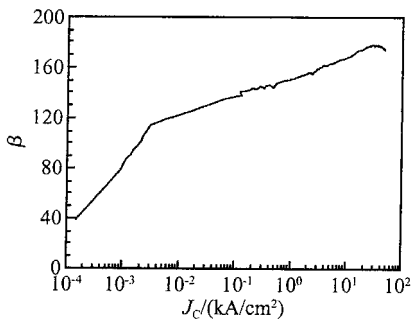


图 5 InGaP/GaAs HBT 的直流增益

Fig. 5 Current gain of InGaP/GaAs HBT

3.2 功率管高频和功率测试结果

使用 HP8510 网络分析仪片测试 HBT 器件单胞的小信号 S 参数,结果如图 6 所示. HBT 功率管的截止频率 f_T 为 28GHz,最大振荡频率 f_{max} 为 31GHz,在 5.4GHz 时最大稳定功率增益 MSG 为 13dB,高频性能良好.

将 HBT 功率管进行管壳封装后,在自行搭建

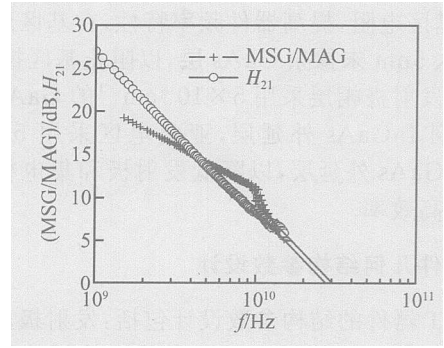


图 6 InGaP/GaAs HBT 的高频特性

Fig. 6 Measured small-signal performance of 10 x (40um x 2.5um) InGaP/GaAs HBT

的功率匹配测试平台上测试功率管的大信号功率特性.集电极偏置电压为 9V,偏置电流为 110mA,AB 类工作状态,5.4GHz 时连续波测试结果如图 7 所示.其线性功率增益为 7.4dB,1dB 增益压缩点输出功率 P_{-1dB} 为 29dBm,饱和输出功率 P_{sat} 达到 31.6dBm(1.45W),功率密度达到 3.5W/mm,PAE 大于 40%,高功率性能优异.

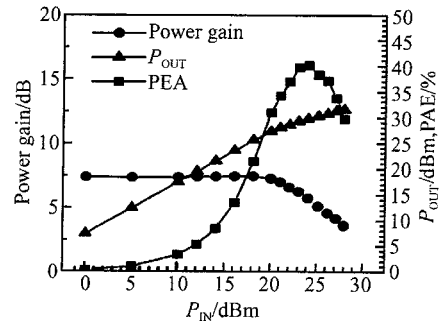


图 7 InGaP/GaAs HBT 的功率特性

Fig. 7 Measured large-signal performance of 10 x (40um x 2.5um) InGaP/GaAs HBT

4 结论

使用国产 HBT 材料,通过合理地设计外延层材料结构参数和器件结构参数,采用 BE 金属自对准、发射极镇流电阻、电镀空气桥、衬底减薄、背面金属化等工艺技术制备了 C 波段 InGaP/GaAs 高频功率管.其直流和高频性能良好.在 5.4GHz 测试频率下,发射极面积为 10 x (40um x 2.5um) 的功率管单胞饱和输出功率大于 1.4W,功率密度达到 3.5W/mm,PAE 大于 40%,高功率性能优异. HBT 功率管成品率大于 90%,为单片功放电路的研制奠定了良好的基础.

致谢 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所的齐鸣教授和徐安怀博士在 HBT 外延材料生长

和提供上给予的大力支持;感谢中国电子科技集团公司第五十五所一中心提供的背面工艺帮助.

参考文献

- [1] Ali F, Gupta A, Higgins A. Advances in GaAs HBT power amplifiers for cellular phones and military applications. Digest of Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, 1996:61
- [2] Wadsworth S D, Davies R A, Davies I, et al. GaInP/ GaAs HBTs: state of the art and future trends. International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, 1998:40
- [3] Blanck H, Riepe K J, Doser W, et al. Industrial GaInP/ GaAs Power HBT MMIC Process. Proceedings of the Gallium Arsenide Applications Symposium, Paris, 2000:113
- [4] Liu Honggang, Yuan Zhipeng, He Zhijing, et al. Super performance InGaP/ GaAs heterojunction bipolar transistor with hexagonal emitter. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(11):1135
- [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] Liu W. Handbook of - heterojunction bipolar transistors. John Wiley & Sons, Inc, 1998
- [7] Zheng Liping, Liu Xinyu, Yuan Zhipeng, et al. Passivation ledge fabrication and its effect on performance of self-aligned InGaP/ GaAs HBT with variety of 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]

C-Band 3.5W/mm InGaP/ GaAs HBT Power Transistors with >40% Power-Added Efficiency*

Shen Huajun[†], Chen Yanhu, Yan Beiping, Ge Ji, Wang Xiantai, Liu Xinyu, and Wu Dexin

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

Abstract: A C-band InGaP/ GaAs HBT power transistor with an optimized material structure and device peripheral structure is designed and fabricated by base-emitter metal self-aligning, emitter ballasting, and an electric plated air bridge. The measured BV_{CEO} is greater than 31V and the BV_{CE0} is greater than 21V. At a frequency of 5.4GHz, the saturated CW output power of the fabricated HBT power transistor is more than 1.4W with a maximum power density of 3.5W/mm, and the power added efficiency is greater than 40%.

Key words: InGaP/ GaAs; power; heterojunction bipolar transistor

EEACC: 2560J; 2560P

Article ID: 0253-4177(2006)09-1612-04

* Project supported by the Innovation Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No. KG CX2-SW-107)

[†] Corresponding author. Email: tohuajun@hotmail.com