

# 基于 InGaP/GaAs HBT 的 X 波段 MMIC 功率放大器研制

陈延湖<sup>†</sup> 申华军 王显泰 葛 莽 李 滨 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 研制了 X 波段的 InGaP/GaAs HBT 单级 MMIC 功率放大器, 该电路采用自行开发的 GaAs HBT 自对准工艺技术制作. 电路偏置于 AB 类, 小信号 S 参数测试在 8~8.5GHz 范围内, 线性增益为 8~9dB, 输入驻波比小于 2, 输出驻波比小于 3, 优化集电极偏置后, 线性增益为 9~10dB. 在 8.5GHz 进行连续波功率测试, 在优化的负载阻抗条件下,  $P_{1dB}$  输出功率为 29.4dBm, 相应增益 7.2dB, 相应 PAE>40%, 电路的饱和输出功率  $P_{sat}$  为 30dBm.

**关键词:** HBT; MMIC; X 波段

EEACC: 2560J; 2570B

中图分类号: TN431

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)05-0759-04

## 1 引言

GaAs HBT 器件具有高频特性好, 功率密度大, 工作效率高, 线性度好, 特征尺寸宽, 制作成本低等优势, 使它成为开发高功率, 高效率, 高线性度微波单片功率放大器的主要技术之一<sup>[1~3]</sup>. 开发微波单片功率放大器, 特别是 X 波段单片大功率放大器对发展新型军用雷达系统具有重要意义. 在 GaAs HBT 器件中, InGaP/GaAs HBT 与 AlGaAs/GaAs HBT 相比, 具有偏移电压小, 电流增益随温度变化稳定的优点; 且其不含有 Al 及相关缺陷, InGaP 与 GaAs 的选择性腐蚀使得器件稳定性更好, 可靠性更高. 因此 InGaP/GaAs HBT 更适合于开发单片功率放大器. 目前国内在 AlGaAs 和 InGaP HBT 功率器件及相关材料的研究成果主要集中于功率器件的工艺开发和分立功率管的性能评价. 本文在国内首次报道了采用 InGaP/GaAs HBT 的 X 波段单级单片功率放大器, 电路采用中国科学院微电子研究所自行开发的 InGaP/GaAs HBT 自对准工艺技术<sup>[4]</sup>完成制作, 在电路设计和工艺中采用多项措施确保 HBT 的电稳定性和热稳定性. 电路利用测试夹具进行性能测试, 在 X 波段, 小信号线性功率增益大于 8dB,  $P_{1dB}$  输出功率大于 27dBm, 输入驻波比小于 2, 输出驻波比小于 3, 并且通过优化电路实际应用中的敏感参数, 获得了电路的最佳功率和增益性能.

## 2 单片电路制作

单片电路制作在中科院微电子研究所的 100mm 化合物工艺线上完成, 通过优化 InGaP/GaAs HBT 外延材料结构, 改进有源器件和无源器件制作工艺, 我们开发了一套适合高频大功率放大器应用的 InGaP/GaAs HBT 单片电路制造技术. HBT 晶体管采用传统的多台面结构, 使用湿法腐蚀工艺完成器件台面制作和器件隔离, 材料的选择性腐蚀特性和有效的腐蚀时间控制保证了 HBT 器件的一致性和电路成品率. BE 自对准技术提高了器件的高频增益, 外基区耗尽钝化层提高了器件的直流增益和可靠性. 通过优化 HBT 集电极层外延层厚度和掺杂浓度, 提高器件的击穿电压, 器件的典型击穿电压  $BV_{CBO}$  和  $BV_{CEO}$  分别大于 30V 和 20V; 通过添加发射极镇流电阻, 抑制 HBT 器件的电流坍塌现象<sup>[4]</sup>; 通过衬底减薄工艺加强器件的散热; 通过背孔工艺减小接地寄生电感. 以上措施有效地提高了器件的电热稳定性, 扩大了器件的安全工作区 (SOA), 提高了功率管的功率密度. 在 X 波段, 器件的功率密度可达 1.6W/mm. 片上电容为 MIM 电容, 电阻为 NiCr 薄膜电阻<sup>[5]</sup>. 外延材料由中国科学院上海微系统与信息技术研究所提供, 优化的外延层结构如图 1 所示. 为了防止基区掺杂 Be 的扩散, 在基区上下加入了非掺杂的 GaAs 隔离层.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: cyh714@sohu.com

2006-11-06 收到, 2006-12-03 定稿

|   |                  |         |                                    |    |
|---|------------------|---------|------------------------------------|----|
| $n^+ - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ | $x = 0.6$        | 50nm    | $>1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ | Si |
| $n^+ - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ | $x = 0.6 \sim 0$ | 50nm    | $>1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ | Si |
| $n^+ - \text{GaAs}$                           |                  | 250nm   | $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  | Si |
| $n^- - \text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$  | $x = 0.5$        | 50nm    | $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  | Si |
| GaAs  |                  | 4nm     | undoped                            |    |
| $p^+ - \text{GaAs}$                           |                  | 80nm    | $>4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ | Be |
| GaAs  |                  | 3nm     | undoped                            |    |
| $n^- - \text{GaAs}$                           |                  | 1000 nm | $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  | Si |
| $n^+ - \text{GaAs}$                           |                  | 500 nm  | $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  | Si |
| SI GaAs                                       |                  |         |                                    |    |

图 1 InGaP/GaAs HBT 的器件材料结构

Fig.1 Material structure of InGaP/GaAs HBT

### 3 单片电路设计

通过折中输出功率、功率增益和版图尺寸三个参数,采用了由 10 个  $2.6 \times 30 \mu\text{m}$  发射极面积的 HBT 器件组成的功率管单胞,功率管单胞的截至频率  $f_T$  达到 28GHz,最高振荡频率  $f_{\text{MAX}}$  达到 31GHz,在  $V_c = 7\text{V}$ , 8GHz 其  $P_{1\text{dB}}$  输出功率为 26dBm 左右.单片电路的拓扑为两个功率管单胞进行功率合成,发射极面积为  $2 \times 2.6 \times 300 \mu\text{m}$ . HBT 器件工作在共发射极组态,以获得较高的功率增益.电路的设计主要以功率管单胞的小信号  $S$  参数线性模型为基础进行功率增益设计,同时在输出匹配中,引入一定的失配,来调节电路的输出功率特性.阻抗匹配网络的拓扑采用 T 形头结构,它同时实现阻抗匹配和功率合成的作用,匹配元件采用微带线和电容实现.为了确保电路的高稳定性,在设计中采用以下措施:(1)在匹配网络中插入了 RC 并联结构<sup>[6]</sup>,使功率管单胞的稳定性因子  $K$  在高于 1GHz 的频率范围内大于 1;(2)在两个功率管单胞之间加入隔离电阻,提高器件的隔离度;(3)在直流偏置网络中加入了在片去耦电容抑制低频振荡.为了提高电路直流偏置点的温度稳定性,采用了在片的有源电流镜偏置电路为功率管提供直流偏置<sup>[7]</sup>.为了避免版图布局中的耦合效应,利用 ADS 电磁场仿真工具 MONENTUM 对电路中的敏感部位进行了版图电路图的协同仿真.芯片照片如图 2 所示.

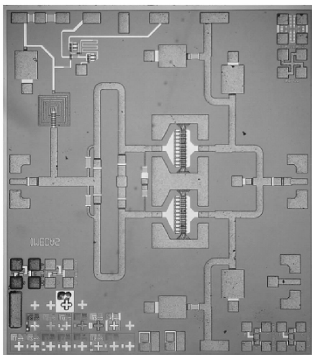


图 2 单片电路的芯片照片

Fig.2 Photo of the MMIC PA die

### 4 电路性能测试结果与分析

采用聚四氟乙烯板材设计了 PCB 测试板,将芯片用导电胶粘接到测试板上,然后固定到测试夹具上进行 RF 测试.首先对该电路进行直流特性测试,由于在电路设计时采用了抑制自激的稳定性措施,电路未发现自激振荡现象,使射频信号测试得以进行.

小信号测试的直流偏置点为  $V_{cc} = 7\text{V}$ ,  $I_{cc} = 210\text{mA}$  左右,电路工作于 AB 类,仿真结果与测试结果的对比如图 3 所示.仿真结果与测试结果具有比较好的一致性,说明器件模型准确,电路版图结构,设计和仿真方法合理.由测试结果可知,在 8.0 ~ 8.5GHz 频率范围内,电路的小信号功率增益为 8 ~ 9dB,输入驻波比小于 2,输出驻波比小于 3,带宽 500MHz.由于 HBT 的增益特性受温度影响明显,对电路的集电极偏置条件进行了优化,在  $V_{cc} = 3.5\text{V}$ ,  $I_{cc} = 210\text{mA}$  下,电路在 8.0 ~ 8.5GHz 的范围内线性增益为 9 ~ 10dB,在低集电极偏置下, HBT 器件的发热较小,结温较低,因而功率增益较高,其测试结果如图 4 所示.

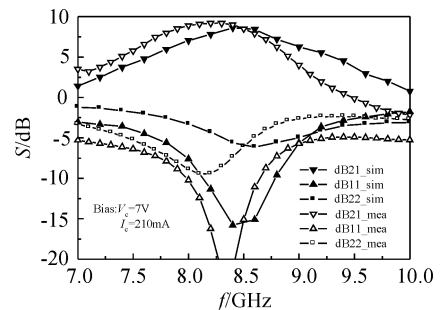
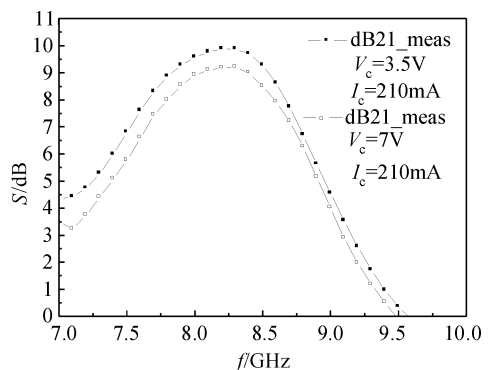
图 3 小信号  $S$  参数测试结果Fig.3 Results of the  $S$  parameter

图 4 优化偏置点的小信号线性功率增益

Fig.4 Results of the linear power gain for optimized bias

选取电路工作频段的高端 8.5GHz,对电路进行了大信号功率测试,测试信号为连续波,电路的偏置点为  $V_c = 7V$ ,  $I_c = 210mA$ ,其功率特性曲线如图 5 所示,电路的  $P_{1dB}$  输出功率为 27.6dBm,对应功率增益 7.7dB;饱和输出功率  $P_{sat}$  为 29dBm,此时器件处于深饱和.依据负载线理论<sup>[7]</sup>,在功率放大器的设计和实际应用中,电路的输出阻抗匹配状态对电路的输出功率具有重要影响,特别对于 HBT 器件,输出端口的失配会引起异常的动态负载线特征,引发 HBT 的热稳定性问题,从而限制 HBT 的高功率输出,因此利用负载牵引系统在电路的输出端口进行了调配优化,优化后电路的功率特性如图 6 所示.

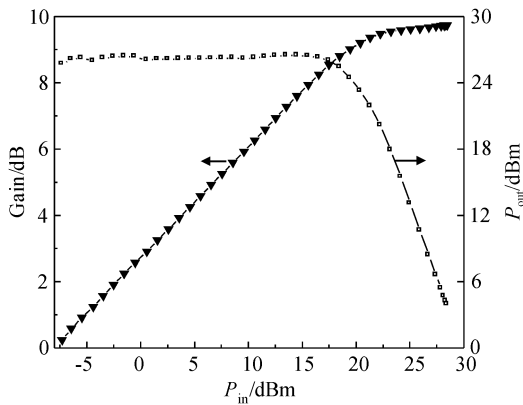


图 5 增益和输出功率随输入功率的变化  
Fig. 5 Gain and  $P_{out}$  versus  $P_{in}$

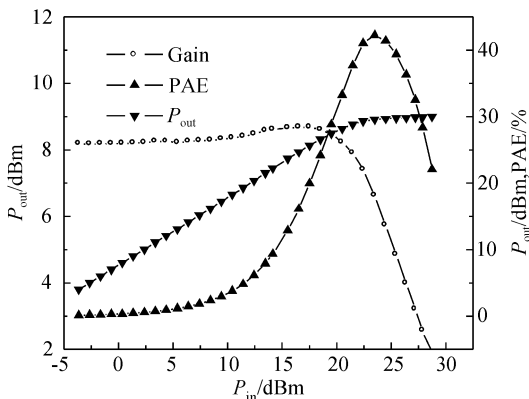


图 6 优化后增益、输出功率和 PAE 随输入功率的变化  
Fig. 6 Gain,  $P_{out}$ , PAE versus  $P_{in}$  after optimizing

电路的  $P_{1dB}$  输出功率为 29.4dBm,对应功率增益 7.2dB,相应 PAE 为 42%;饱和输出功率  $P_{sat}$  为 30dBm 左右,此时器件处于深饱和状态.由以上功率特性可知所设计的单片电路的输出匹配是最佳增益匹配和最佳输出功率匹配的折中,经调配后其  $P_{1dB}$  输出功率增加 1.8dBm.

## 5 结论

本文基于小信号  $S$  参数线性模型设计了两个功率管单胞进行合成的单级单片 X 波段功率放大器,该电路使用国产 InGaP/GaAs HBT 材料制造,采用中科院微电子所优化的 InGaP/GaAs HBT 工艺进行流片,为国内首次报道的基于 InGaP/GaAs HBT 的 X 波段 MMIC 功率放大器.电路的直流特性测试,未发现自激振荡现象.电路偏置在 AB 类,小信号测试在 8.0~8.5GHz 频率范围内,线性增益为 8~9dB,输入驻波比小于 2,输出驻波比小于 3,带宽 500MHz,通过优化收集极偏置,其线性增益可达 9~10dB.在 8.5GHz 进行功率测试, $P_{1dB}$  输出功率为 27.6dBm.通过优化电路的输出负载阻抗匹配,其最大  $P_{1dB}$  输出功率可达 29.4dBm,相应 PAE 为 42%,饱和输出功率为 30dBm 左右,为基于国产 InGaP/GaAs HBT 技术的 X 波段 MMIC 大功率放大器的应用和开发奠定了基础.

**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 外延材料生长和供给上给予的大力支持;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;感谢四川龙瑞微电子公司在封装测试上的帮助.

## 参考文献

- [1] United Monolithic Semiconductors (UMS). X-band GaInP HBT 10W high power amplifier including on-chip bias control circuit. Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, 2003, 2: 855
- [2] Bayraktaroglu B, Khatibzadeh M A, Hudgens R D. Monolithic X-band heterojunction bipolar transistor power amplifiers. IEEE GaAs IC Symposium, 1989: 271
- [3] Blank 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] Shen Huajun, Chen Yanhu, Yan Beiping, et al. C-band 3.5W/mm InGaP/GaAs HBT power transistors with >40% power-added efficiency. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(8): 64 (in Chinese) [中华军, 陈延湖, 严北平, 等. C 波段 3.5W/mm, PAE>40% 的 InGaP/GaAs HBT 功率管. 半导体学报, 2006, 27(8): 64]
- [5] Shen Huajun, Chen Yanhu, Yan Beiping, et al. Passive component models for GaAs MMICs. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10): 1872 (in Chinese) [中华军, 陈延湖, 严北平, 等. GaAs MMIC 用无源元件的模型. 半导体学报, 2006, 27(10): 1872]
- [6] Teeter D, Platzker A, Bourque R. A compact network for eliminating parametric oscillations in high power MMIC amplifiers. IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium Digest, 1999

- [ 7 ] Jarvinen E, Kalajo S, Matilainen M. Bias circuits for GaAs HBT power amplifiers microwave symposium digest. IEEE MTT-S International, 2001, 1:507
- [ 8 ] Cripps S C. RF power amplifiers for wireless communications. Artech House, 1999

## X Band MMIC Power Amplifier Based on InGaP/GaAs HBT

Chen Yanhu<sup>†</sup>, Shen Huajun, Wang Xiantai, Ge Ji, Li Bin, Liu Xinyu, and Wu Dexin

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

**Abstract:** An X band InGaP/GaAs HBT single stage MMIC power amplifier is reported. The self-aligning InGaP/GaAs HBT process was used to fabricate the circuit. The PA circuit is biased at the class AB state. The small signal  $S$  parameter test shows that at 8~8.5GHz, the linear power gain is 8~9dB,  $VSWR_{in} < 2$ , and  $VSWR_{out} < 3$ . After optimizing the collector bias, the linear gain is improved to 9~10dB. Under an 8.5GHz CW signal power test with optimized loading conditions, the  $P_{1dB}$  of the circuit is 29.4dBm, relevant power gain is 7.2dB, and relevant PAE is 42%. The  $P_{sat}$  of the circuit is 30dBm.

**Key words:** HBT; MMIC; X band

**EEACC:** 2560J; 2570B

**Article ID:** 0253-4177(2007)05-0759-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: cyh714@sohu.com

Received 6 November 2006, revised manuscript received 3 December 2006