

# X 波段 PHEMT 功率单片放大器\*

张书敬<sup>1,2,†</sup> 杨瑞霞<sup>1</sup> 武继斌<sup>2</sup> 杨克武<sup>2</sup>

(1 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)

(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

**摘要:** 报道了 X 波段 8W AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT MMIC 功率单片放大器的设计和研制. 放大器采用两级拓扑结构, 输入输出为 50Ω 阻抗匹配, 芯片面积为 4.5mm×3mm. 测试结果显示, 在 7.5V 和 1.5A 的 DC 偏置下, 输出功率在 8W 以上, 功率附加效率为 30%, 功率增益为 15dB.

**关键词:** PHEMT; X 波段; MMIC; 功率放大器

EEACC: 1220

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)10-1800-04

## 1 引言

在微波、毫米波工程领域, 功率放大器技术和电路设计已成为研究热点. 高功率附加效率、宽工作频段和小尺寸是大功率放大器(HPA)设计要求的三个特征. AlGaAs/GaAs PHEMT 在增益、噪声和功率方面具有更加良好的性能, 是微波与毫米波单片集成电路中最具竞争力的有源器件之一. X 波段 MMIC 功率单片放大器已经先后被报道<sup>[1~7]</sup>, 2004 年 Mimix Broadband 公司<sup>[8]</sup> 报道了输出功率为 10W 的 X 波段功率单片放大器, 采用三级放大电路结构, 在 8.5~11.0GHz 下, 输出功率可达到 10W, 功率附加效率为 27%~30%, 功率增益为 20~21dB. 在国内, X 波段功率单片研究与国外还有一定的差距, 但 X 波段 5W 的功率单片已有报道<sup>[9]</sup>.

本文报道了 X 波段两级 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT 高功率单片放大器. 在 8.0~9.0GHz 内, 输出功率为 8W, 功率附加效率为 30%, 输入和输出端口匹配至 50Ω.

## 2 PHEMT 材料结构

对于功率器件, 双平面掺杂结构具有高功率密度、高效率等优势, 所以设计的器件结构采用双平面掺杂的 AlGaAs/InGaAs PHEMT 结构. PHEMT 材料结构很大程度上决定了器件的性能, PHEMT 外延材料层结构如图 1 所示.

器件的栅结构设计为双凹槽的 0.45μm T 形栅

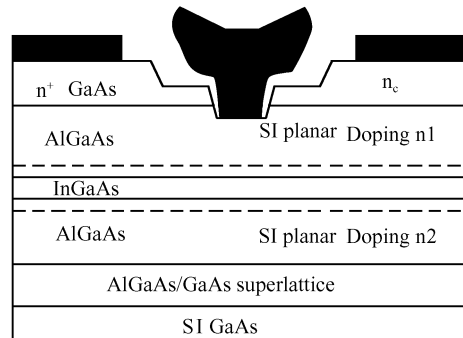


图 1 GaAs PHEMT 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the GaAs PHEMT structure

结构, 目的是减少栅电阻, 提高击穿电压. 为了减小源电感和改善信号分布均匀性, 采用侧面空气桥源区通孔接地结构, 要求通孔具有很好的纵横比和套刻精度. 芯片背面减薄并电镀热沉, 改善器件的热阻和烧结性能.

## 3 MMIC 放大器设计和制作

### 3.1 大信号模型的建立

精确的非线性器件模型是功率放大器单片设计的关键. 本文采用改进的 Materka 模型, 利用分步提取参数的方法, 对 1.2mm GaAs PHEMT FET 进行非线性模型的建模, 参数提取包括 5 步: (1) 从脉冲栅电流测量数据中提取栅电流参数和内建势; (2) 从改进的 Cold FET S 参数测量数据中提取寄生参

\* 河北省自然科学基金资助项目(批准号: F2004000078)

† 通信作者. Email: gavinjing@126.com

2006-03-31 收到, 2006-05-31 定稿

数,包括源、漏、栅电阻和电感<sup>[10]</sup>; (3)从脉冲漏源电流测量数据中提取漏源电流参数; (4)从工作偏置状态  $S$  参数测量数据中提取本征模型参数; (5)提取栅电容模型参数. 建立的 1.2mm PHEMT 大信号模型参数,如图 2 和图 3 所示,图 2 为脉冲  $I-V$  特性与拟合特性曲线,图 3 为器件  $S$  参数特性曲线.

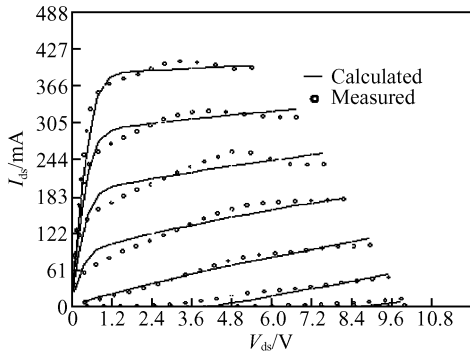


图 2 1.2mm PHEMT 器件脉冲  $I-V$  特性曲线

Fig. 2 Pulse  $I-V$  characteristic curves of 1.2mm PHEMT

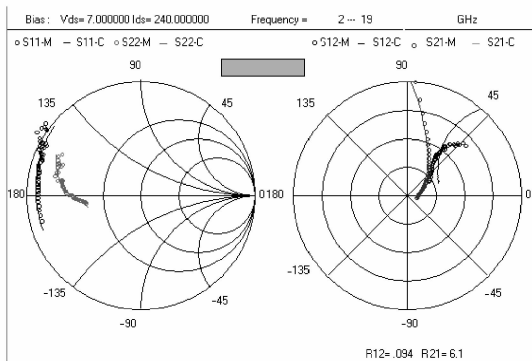


图 3 1.2mm PHEMT 器件  $S$  参数特性比较曲线

Fig. 3  $S$  parameter comparing curve of 1.2mm PHEMT

### 3.2 电路设计

单片放大器采用两级放大器拓扑,输入和输出端口匹配至  $50\Omega$ . 图 4 给出了 X 波段功率单片放大器的拓扑结构. 末级采用功率设计,选择 16.8mm 栅宽的 PHEMT. 第一级采用增益设计,考虑到当 PHEMT 匹配于最佳增益点时,其输出功率要比匹配于最佳功率输出时低  $1\sim 1.5\text{dB}$ ,确定推动级 FET 栅宽为 6mm. 对于 6 和 16.8mm 的 PHEMT 模型,采用对建立的 1.2mm PHEMT 非线性模型进行定标. 总栅宽一定时,增加单胞数无疑会使各单胞的相位更趋一致,从而改善器件工作的一致性,但这也增大引线的寄生参量. 设 FET 总栅宽为  $W_g$ ,单胞数  $N$ ,栅间距设为  $L_{gg}$ ,最大单指栅宽为  $W_{gu}$ . 理论研究表明,为确保 FET 相位的一致性,其单胞

数应满足:

$$N \geq \frac{W_g L_{gg}}{2 W_{gu}^2}$$

给定  $L_{gg}$ ,  $W_g$  和  $W_{gu}$ ,由上式可得 FET 的单胞数. 考虑到设计方便,末级采用四个 4.2mm 栅宽的 FET. 同理,可确定前级为两个 3mm 栅宽的 FET.

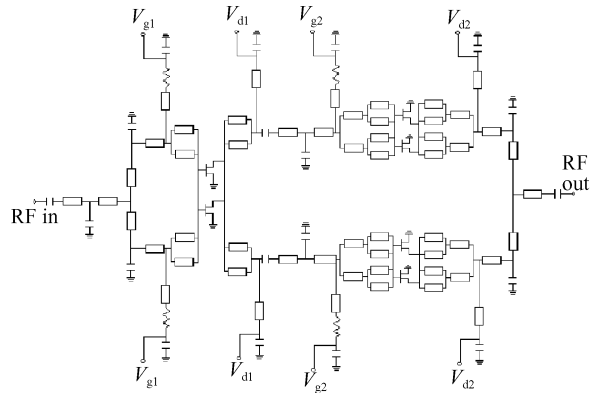


图 4 X 波段功率放大器的拓扑图

Fig. 4 Simplified schematic for X-band power amplifier

匹配网络采用分布参数设计,其输出功率模拟结果如图 5 所示.

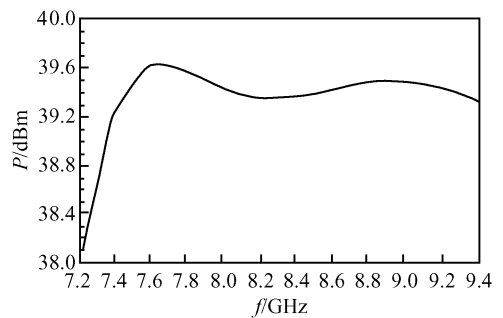


图 5 X 波段功率单片放大器模拟结果

Fig. 5 Simulation results of X-band power amplifier

### 3.3 MMIC 制作

X 波段 MMIC 功率放大器采用  $0.45\mu\text{m}$  栅 75mm GaAs PHEMT 功率单片标准工艺技术制作,制作工艺主要包括: (1)器件隔离,采用 B 离子注入形成有源区; (2)欧姆接触,在  $420^\circ\text{C}$  温度下,蒸发 Au/Ge/Ni 形成源和漏的欧姆接触; (3)肖特基接触,沉积 Ti/Pt/Au 形成肖特基栅势垒; (4)钝化,采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  保护肖特基栅和 GaAs 表面,提高击穿电压; (5)通孔,采用背面通孔接地. 采用溅射与腐蚀相结合的办法来保证电阻阻值的准确性. 制作的 X 波段 MMIC 功率放大器芯片面积为  $4.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ . 图 6 是 X 波段 PHEMT 功率单片放大器的芯片图,为了降低热阻,GaAs 衬底减薄至  $80\mu\text{m}$ ,源端直接

通孔接地.

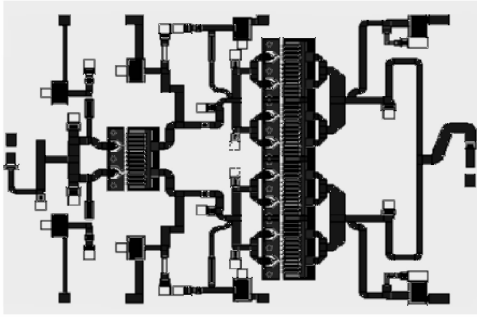


图 6 两级 8W X 波段 PHEMT 功率放大器芯片

Fig.6 Two stage 8W X-band PHEMT power amplifier chip

## 4 测试结果和讨论

该单片采用载体测试.单片的输入、输出驻波是在 HP8757A 标网上测试的.大信号特性是将载体接在功率测试系统中,通过信号源在芯片的输入端加一定功率信号,在不同的频率点下测得.

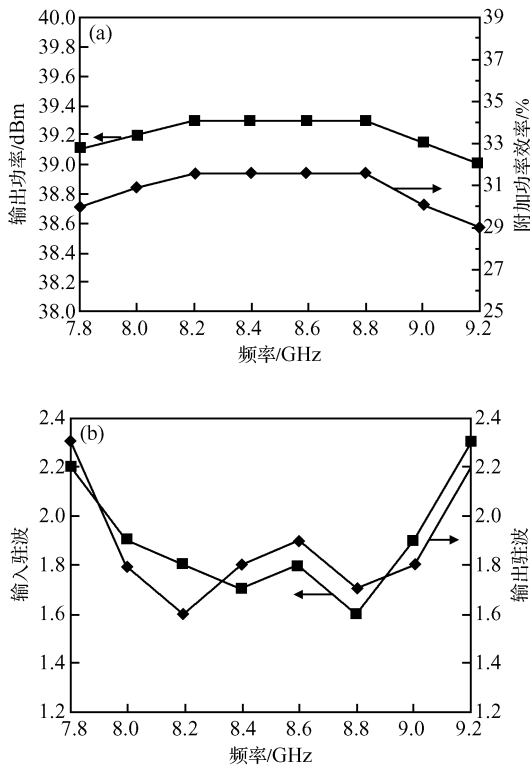


图 7 X 波段功率放大器测试曲线

Fig.7 Measured curve of X-band power amplifier

偏置条件为:  $V_{ds} = 7.5\text{V}$ ,  $I_{ds} = 1.5\text{A}$ , 其中第一级 0.3A, 功率级为 1.2A. 测试结果为: 频率 8.0~9.0GHz, 饱和输出功率大于 39dBm, 功率增益大于

15dB, 增益平坦度小于 0.3dB, 输入、输出驻波小于 2:1, 功率附加效率大于 30%. 图 7 是 X 波段 PHEMT 功率放大器的测试结果. 功率性能模拟结果见图 5.

单片的测试数据和模拟数据存在一定的差距, 主要是由于有源器件模型与实际器件参数存在一定偏差; 单片工艺制作, 如工艺制作中方块电阻的偏差、电容尺寸控制偏差等, 也导致单片实测性能和模拟性能存在一定的差异. 通过对器件模型、电路的再次优化设计, 预计单片的性能将进一步提高.

## 5 结论

利用微波探针测试系统, 采用改进的 Materka 模型, 建立了有源器件非线性模型. 采用标准的 75 mm 0.45 $\mu\text{m}$  栅的 GaAs PHEMT 单片工艺, 成功研制出了 8.0~9.0GHz 功率放大器单片, 输出功率大于 8W, 功率附加效率超过 30%, 输入输出驻波比小于 2.

## 参考文献

- [1] Tayani R. A monolithic X-band class-E power amplifier. Annual Technical Digest of GaAs IC Symposium, 2001; 205
- [2] Wang R, Cole M, Hou L D, et al. A 55% efficiency 5 PHEMT X-band MMIC high power amplifier. Technical Digest of GaAs IC Symposium, 1996; 111
- [3] Bessemoulin A, Quay R, Ramberger S, et al. A 4-W X-band compact coplanar high-power amplifier MMIC with 18-dB gain and 25% PAE. IEEE J Solid-State Circuits, 2003, 38 (9): 1433
- [4] Chu S L G, Platzker A, Borkowski M, et al. A 7.4 to 8.4GHz high efficiency PHEMT three-stage power amplifier. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2000, 2: 947
- [5] Kraemer B, Basset R, Chye P, et al. Power PHEMT module delivers 12 watts, 40% P. A. E. over the 8.5 to 10.5GHz band. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1994, 2: 683
- [6] Cardullo M, Page C, Teeter D, et al. High efficiency X-Ku band MMIC power amplifiers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1996, 1: 145
- [7] Chu C K, Huang H K, Liu H Z, et al. A fully matched 8W X-band PHEMT MMIC high power amplifier. IEEE CSIC Digest, 2004; 137
- [8] <http://www.mimixbroadband.com/PDFfiles/xp1006.pdf>
- [9] Wang Tongxiang, Wu Jibin, Zhang Wuyong. The fabrication of X-band MMIC power amplifier. Semiconductor Technology, 2000, 37(4): 44 (in Chinese) [王同祥, 武继斌, 张务永. X 波段功率单片放大器的研制. 半导体技术, 2000, 37(4): 44]
- [10] Gao Xuebang. The large signal modeling of MESFET and PHEMT. Semiconductor Information, 2000, 37(4): 44 (in Chinese) [高学邦. MESFET 和 PHEMT 大信号建模. 半导体情报, 2000, 37(4): 44]

## An X-Band PHEMT MMIC Power Amplifier<sup>\*</sup>

Zhang Shujing<sup>1,2,†</sup>, Yang Ruixia<sup>1</sup>, Wu Jibin<sup>2</sup>, and Yang Kewu<sup>2</sup>

(1 School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** This paper describes the design, fabrication, and performance of an X-band 8 W AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT MMIC power amplifier. With a two-stage topology design, this amplifier is designed to fully match a  $50\Omega$  input and output impedance. The area of chip is  $4.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ . With 7.5 V and 1.5 A DC bias conditions, an output power of 8 W, power added efficiency of 30%, and power gain of 15 dB are achieved.

**Key words:** PHEMT; X-band; MMIC; power amplifier

**EEACC:** 1220

**Article ID:** 0253-4177(2006)10-1800-04

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2004000078)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: gavinjing@126.com

Received 31 March 2006, revised manuscript received 31 May 2006