

6mm GaAs 有源器件模型库

陈新宇 陈效建 郝西萍 李拂晓 蒋幼泉

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 采用基于测量 S 参数和直流参数的工程模型与微波在片测试技术, 建立与 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 工艺线直接结合的 GaAs 器件(MESFET, PHEMT) 的 MMIC CAD 适用器件模型及模型库, 并通过对不同种类 GaAs MMIC 的设计研制进行了验证与改进, 模拟结果和测试结果基本一致. 目前此模型和模型库已用于 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 工艺线上多种微波 GaAs 单片的设计研制.

关键词: 模型; 模型库; 场效应晶体管; 膺配高电子迁移率晶体管; $\Phi 6\text{mm}$ 砷化镓

EEACC: 2506B; 2560S; 2570A

中图分类号: TN702

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)09-0983-05

1 引言

随着 GaAs 单片集成电路技术的不断发展, 电路的设计与工艺研制都日益复杂化, 如何进一步提高电路性能, 降低成本, 缩短电路研制周期, 已成为 GaAs MMIC 研制的一个焦点, 而 CAD 技术是其设计的关键. MMIC CAD 作为一种辅助设计手段其精确性不仅取决于它的算法, 很大程度上还与它所采用的元器件模型及相应的元器件库和单元库息息相关. 半导体器件模型是影响电路设计精度的最主要因素, 准确的器件模型对提高 GaAs MMIC 的设计成功率、缩短电路研制周期非常重要. 因此建模、建库工作对 GaAs MMIC 设计技术起着十分关键的作用.

商用的微波电路 CAD 设计软件包中, 像 ADS、Cadence 等, 提供全球各知名 GaAs 制造商开发的元件库及单元库. 借助设计工具可以方便地进行电路的设计优化, 只要其采用的器件来源于提供元件与单元设计库的制造商. 但是对于利用自身工艺制造条件的 GaAs MMIC 设计师而言, 采用类似的观念进行 MMIC 的设计与制造, 常常遇到很大的困难. 尽管在 MMIC 有源器件(如 MESFET, PHEMT) 设计中使用了同一定义(如栅长、栅宽、器

件的层结构与几何布局), 但由于不同供应商的模型之间存在较大差别, 常常导致完全不同的设计结果. 其原因是 GaAs MMIC 的制造工艺迄今仍在发展之中, 制造商的工艺各不相同, 因此其有源器件特性不一致, 必然造成模型之间的很大差异. 到目前为止, 供 GaAs MMIC 研制用的 CAD 有源器件库仍具有与工艺条件惟一相关的“专用”特性: 使用制造商提供的有源元件库进行 MMIC 的设计, 并必须在该工艺线完成加工.

因此, 为了提高 GaAs MMIC 设计的准确性与成功率, 必须建立一套完整的基于自身工艺条件的元器件库, 特别是有源器件模型库, 才能真正实现 MMIC 设计实用化.

2 工作原理

GaAs 技术的发展日新月异, 显示了极强的生命力. 但在器件模型方面, 由于 GaAs 器件内部的物理机制至今尚未完全明了, 工艺对器件特性影响很大, 尤其对三端器件及在很高的微波频率下, 因此, 纯物理基的 GaAs 微波器件模型与器件的实际行为往往偏差较大, 至今尚无法完善地直接用于 GaAs MMIC 的 CAD 设计. 有鉴于此, 在 MMIC 的 CAD 设计中, 大量采用了与器件实际测试相结合的半物

理型或经验型的工程模型. 目前此类模型种类繁多, 例如 Curtice、Statz、TOM³等^[1~3].

为了提高 MMIC 设计的准确性与成功率, 采用基于测量 S 参数和直流参数的工程模型, 着重解决 GaAs MMIC 设计实用化技术. 模型测试与提取的拓扑见图 1. 采用直流、微波测试技术相结合, 利用模型提取软件, 拟合测量 S 参数和直流参数来获得等效电路模型参数. 在片测试系统大大降低了器件相关寄生参数, 保证了器件模型参数的准确性.

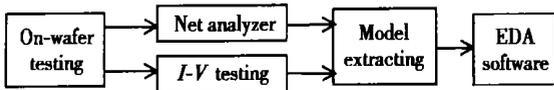


图 1 模型测试与提取的拓扑图

Fig. 1 Model on-wafer testing and extracting system

3 模型及模型库的建立

建模和建库工作是在南京电子器件研究所 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 工艺线上进行的, 以有源器件 MESFET、PHEMT 为主, 如何稳定工艺流程和各个工艺控制参数是一个不可忽视的问题. 为保证稳定的工艺条件, 采用 PCM 工艺控制技术和 SPC 统计分析技术, 建立标准 PCM 测试图形(图 2), 同时建立并完善了 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 研制开发线的版图设计规则, 确保建模建库的工作完全结合 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 研制开发线实际.

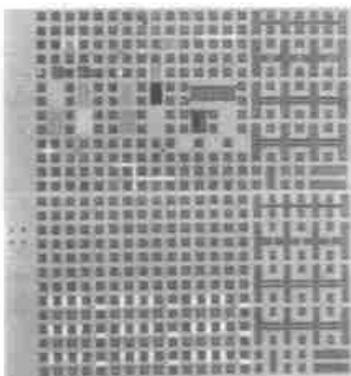


图 2 PCM 监控图形

Fig. 2 Layout of PCM

在建模过程中, 对建模 FET 的全部测试(包括 DC 和 RF 测试) 系统由专门的微波探针在 FET 芯片上直接完成. 为了保证微波探针测试的结果严格地反映器件在 MMIC CAD 过程中的性能, 根据测

试参考面和测试校准的要求, 完成了 GaAs 基片上的微波探针校准图形的设计和制作. 并按照建模、建库的工作需要, 完成多种基于 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 工艺线的元器件模型版图设计, 包括小信号 FET 模型, 大信号 FET 模型及控制电路专用的 FET 模型(图 3). 元器件的版图设计严格按照 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 研制开发线的版图设计规则执行. 此外, 对于每一个要建立的 FET 模型, 均设计了由不同栅宽的 FET 组成的系列组, 以便通过实际测试与分析计算建立符合实际的器件尺寸“缩放”关系.

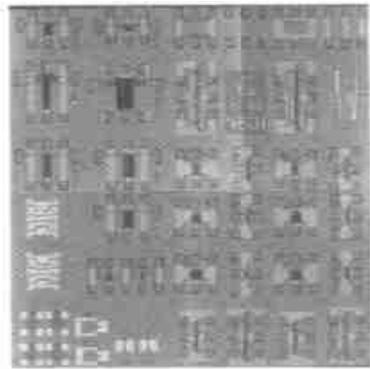


图 3 模型器件的版图

Fig. 3 Layout of FET

在模型参数的测试和提取中, 必须考虑模型参数的容差范围. 通过对 PCM 测试图形和器件模型版图的 DC 和 RF 测试的统计分析, 选取模型参数的工艺容差范围. 图 4 是一片 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 圆片上相同器件的实测夹断电压的统计分布, 共 530 只器件. 采用 $300\ \mu\text{m}$ 栅宽的 FET, 全离子注入 MESFET

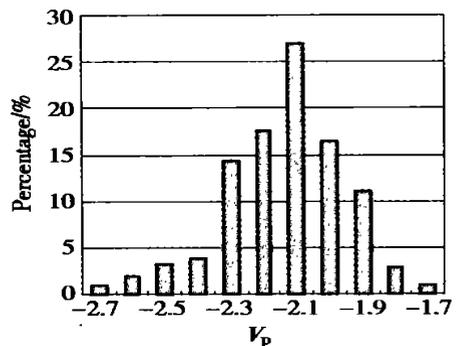


图 4 夹断电压的分布图

Fig. 4 Distributing of V_p in $\Phi 6\text{mm}$ GaAs

工艺, 夹断电压的工艺要求为 2.1V , 根据图表, 本工艺批次的 FET 器件的夹断电压的分布为 $(2.1 \pm$

10%) V. 通过对多品种、多批次有源器件的模型参数的测试分析, 可以确定器件相应模型参数的典型值和相应的容差范围, 加强器件模型对工艺的适应性. 一方面根据工艺条件不断优化更新模型参数, 另一方面根据模型参数不断促进工艺条件的改进.

采用上述技术, 针对多种基于 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 工艺线的有源器件进行参数测试, 建立频率 20GHz 以下有源元器件的 S 参数和直流参数库. 根据有源器件 MESFET、PHEMT 等的工作机理, 利用 Agilent 的 IC-CAP 软件和 Wiltron 矢量网络分析仪, 在片测试系统等模型参数提取技术, 开展模型的测试与提取工作, 先后建立了包括 MESFET、PHEMT 两类器件的有源器件模型, 包括小信号模型、大信号模型, 模型的频率范围最高至 20GHz. 模型中除常用的线性模型外, 还包含了多种大信号非线性模型, 如 Curtice-Cubic 模型, HPRootFET 模型等. 此外, 还建立了 MESFET 开关模型, 包括单栅 MESFET 开关^[4], 三栅 MESFET 开关.

在建库工作中, 根据不同的建模方法, 提取并计算出相应的模型参数, 或直接根据元器件 On-Wafer 微波 S 参数测试结果, 按照相应数据格式写入到数据库中, 与 ADS 等微波 CAD 设计软件接口对应, 最终为电路设计服务. 目前已初步建立了 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 工艺线所适用的元器件库, 其中包括近 40 种不同的模型. 它们在 EDA 软件中组成了 NEDI 自己的 CAD 有源器件库, 见图 5. 典型的 PHEMT 的 Curtice 模型的 DC 参数和 S 参数的测试值和模拟值见图 6.

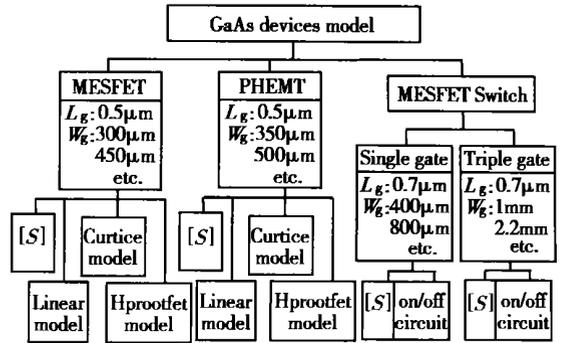


图 5 砷化镓有源器件模型库的树状图

Fig. 5 Topic of GaAs devices model library

4 模型验证和分析

采用模型库中的参数和模型, 通过电路设计、工艺制造并测试, 来验证各方面的工作, 不断提高完善模型的精确度. 目前主要通过对几种典型的 MMIC 电路(LNA、DPDT 及 PA 等) 设计、工艺制造和测试分析, 验证建模和建库各方面的工作.

近年来, 在上述建模和建库工作的基础上, 使用 NEDI 自建的有源器件模型以及独立发展的 GaAs MMIC 工艺技术, 我们研究开发了一批 GaAs MMIC 电路^[5~8]. 其中包括: S 波段的 LNA MMIC; X 波段的 LNA MMIC 和 PA MMIC; 6~18GHz 的功率放大器 MMIC; 900MHz 的功率放大器; K 波段的功率放大器 MMIC; DPDT MMIC; GSM 用开关和衰减器. 测试数据和 CAD 模拟结果拟合较好. 典型的模拟与设计结果对比见图 6、7 和表 1.

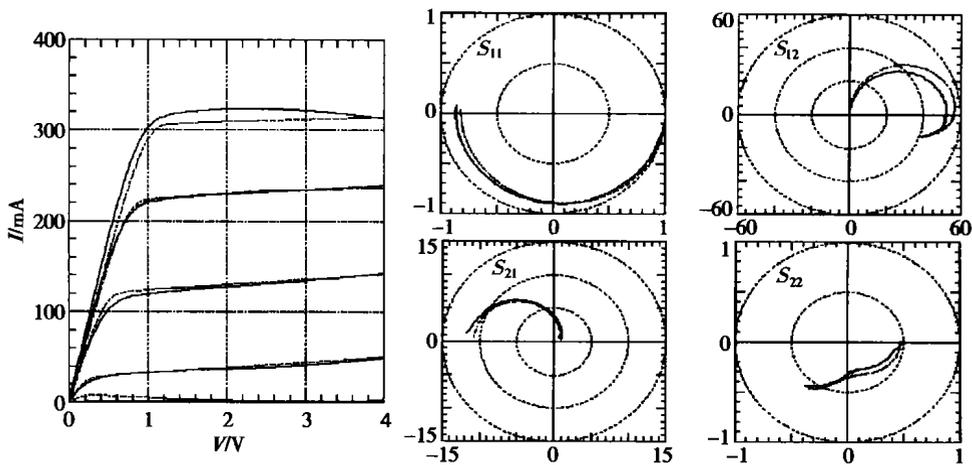


图 6 Curtice cubic 模型直流参数和 S 参数与模拟值对比(PHEMT 800 μm 栅宽)

Fig. 6 PHEMT measurement and simulation of Curtice cubic model

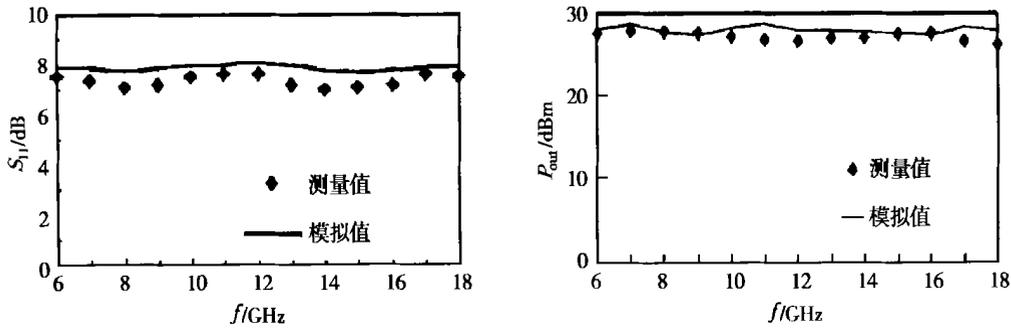


图7 6~18GHz 单片行波功率放大器的测量值与模拟值 带内小信号增益7dB, P_{out} 大于27dBm, 采用 Hprootfet 模型

Fig.7 Measurement and simulation values of 6~18GHz MMIC PA using Hprootfet model

表1 移动通讯用1W DPDT 开关测量值与模拟值(采用开关模型)

Table 1 Measurement and simulation values of DPDT using switch model

Tx-T1/dB	IL		ISO	
Frequency/GHz	1	2	1	2
Simulation	0.45	0.8	20.8	15.0
Measurement	0.5	0.84	19	13.2

但是模型应用也存在一些问题,特别在宽带和高频的功率 MMIC 设计中,如 6~18GHz 的功率放大器 MMIC,实际单片的模拟结果和实测值存在一定的差异.一方面工艺参数的微小差异会导致高频单片设计结果和测试结果的不同,特别是级间的匹配和输出阻抗的匹配,对驻波和输出功率的影响很大;另一方面,由于单片性能指标高,对工艺的要求较苛刻,设计中模型容差选择较小,模型参数的容差不能反映工艺的离散,实测值在批次间有离散.

5 结论

通过针对 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs MMIC 研制开发线的建模和建库工作,初步建立了基于 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 工艺线的 GaAs 器件(MESFET, PHEMT)的模型及模型库,并通过不同种类的 MMIC 设计研制对其进行了验证与改进,取得了阶段性的成果.目前模型及模型库已用于单片研制开发线上多种单片的设计研制.

基于 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 工艺线的 GaAs 器件模型及模型库的建立,为 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs 工艺线向 Foundry 线转化作了充分的准备,为 $\Phi 6\text{mm}$ GaAs

MMIC 实用化技术发展奠定了良好的基础.

致谢 本项研究工作得到了南京电子器件研究所一中心领导的关心和支持,得到了南京电子器件研究所一中心 76mm 砷化镓 MMIC 工艺线的大力支持,参与研究工作的还有李辉、徐世晖、岑元飞、陈雪军、叶禹康、潘啸龙、朱轩昂、洪倩、吴振海等同志,在此表示衷心的感谢.

参考文献

- [1] Curtice W R. A MESFET model for use in the design of GaAs integrated circuits. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1980, 128(3): 448
- [2] Curtice W R. A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1985, 133(12): 1383
- [3] Stutz H, Newman P, Smith I W. GaAs FET device and circuit simulation in SPICE. IEEE Trans Electron Devices, 1987, 34(2): 160
- [4] Chen Xinyu, Chen Jiyi. The model of GaAs MESFET for broadband using. Chinese Research & Progress of SSE, to be published (in Chinese) [陈新宇, 陈继义. 宽带 MESFET 开关模型. 固体电子学研究与进展, 待发表]
- [5] Chen Xiaojian, et al. MMIC modeling technique and its application. 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT'2000), 2000
- [6] Xu Shihui, Chen Xuejun, Li Hui. CAD of GaAs MMIC for mobile communication. Chinese Semiconductor Information, 2000, 37(1): 7 (in Chinese) [徐世晖, 陈雪军, 李辉. 移动通讯用 GaAs 微波单片集成电路的 CAD 技术研究. 半导体情报, 2000, 37(1): 7]
- [7] Zhu Xuanang, et al. 2~6GHz MMIC power amplifier. 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave

Technology (ICMMT'2000), 2000

nese) [陈新宇. K 波段单片功率放大器. 功能材料与器件学

[8] Chen Xinyu. K-band MMIC power amplifier. Chinese Journal
of Functional Materials and Devices, 2000, 6(3): 154 (in Chi-

报, 2000, 6(3): 154]

Model Library of Φ 6mm GaAs Devices

Chen Xinyu, Chen Xiaojian, Hao Xiping, Li Fuxiao and Jiang Youquan

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on simulating measured S parameter and DC I - V characteristics, the engineering model of GaAs devices (MESFET, PHEMT) is extracted using microwave on-wafer testing technology, and a model library based on Φ 6mm GaAs process line is established. These models are confirmed by the design and fabricated of several GaAs MMICs. The results of calculation and those of simulation are in good agreement with each other.

Key words: model; model library; MESFET; PHEMT; Φ 6mm GaAs

EEACC: 2506B; 2560S; 2570A

Article ID: 0253-4177(2002)09-0983-05