

# 基于大信号模型的 L 波段 400W 高效 GaN 功率放大器设计

钟世昌<sup>1,2</sup>, 陈堂胜<sup>2</sup>, 殷晓星<sup>1</sup>, 周书同<sup>2</sup>

(1. 东南大学, 江苏南京 210096; 2. 南京电子器件研究所, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 文章阐述了用精确的 GaN Angelov 模型设计了一款 L 波段 400W 内匹配率放大器. 选用 SiC 衬底的 GaN 器件是为了获得大功率输出以及高效率性能. 为了精确设计放大器, 采用脉冲 I-V 测试和多偏置的 S 参数测试建立起高压 GaN 大信号模型. 采用模型设计的 GaN 放大器输入输出电路集成在 17.4mm × 24mm 的封装管壳里. 最终采用单枚 55mm 栅宽 GaN 管芯设计的放大器在 48V 漏压, 100μs 脉宽, 10% 占空比偏置下在 1.2 ~ 1.4GHz 输出功率大于 400W, 功率增益大于 15dB, 最大功率附加效率达到 81.3%, 这是国内 L 波段 400W 微波功率放大器的最高效率报道, 验证了模型的准确度, 实现了极好的电路性能.

**关键词:** 放大器; GaN; 模型; 内匹配; L 波段

**中图分类号:** TN722.7 +6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2020)02-0398-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.02.024

## GaN L-Band 400W Power Amplifier Design Using Large Signal Model

ZHONG Shi-chang<sup>1,2</sup>, CHEN Tang-sheng<sup>2</sup>, YIN Xiao-xing<sup>1</sup>, ZHOU Shu-tong<sup>2</sup>

(1. Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** This paper describes a L-band 400W gallium nitride (GaN) internally matched power amplifier using an accurate large signal Angelov model. The large gate-periphery GaN devices on SiC substrate are used for achieving the large output power and high efficiency. For designing exactly the power amplifier, the large signal GaN model is founded using measured pulse I-V and S parameters of different bias conditions. Based on the large signal model, the input and output matching circuits and one 55mm GaN transistor are integrated in a 17.4mm × 24mm ceramic package. The amplifier finally has the pulse output power of over 400W, the power gain of over 15dB across the band of 1.2-1.4GHz and the max power added efficiency is 81.3% under the pulse drain bias voltage (V<sub>ds</sub>) of 48V, the duty is 10% with the pulse width of 100μs. The results show that the character of realized amplifier is consistent with the simulation result, which fully indicates the veracity of the developed model. And this is the most highest efficiency of a 400W power amplifier achieved in L-band.

**Key words:** amplifier; GaN; model; internally matched; L-band

## 1 引言

L 波段是民用和军用通信以及雷达系统运用的主要频段. 在这些系统里, 微波功率放大器是最核心的元器件之一. 越大的输出功率和越高的效率性能可以很好地提升通信系统的性能. 当前, 以第三代半导体 GaN 芯片为基础的微波功率放大器可以很好的实现大功率和高效率性能, 各种基于模型的 GaN 微波功率放大器设计成了当前研究的热点. 但 GaN 功率器件是一个热敏感器件, 大功率

放大器会随着热效应而性能降低, 并且大功率的放大器设计合成效率也会降低, 所以大功率高效率的 GaN 功率放大器设计当前仍然是一个挑战<sup>[1-5]</sup>.

论文中的 GaN 功率器件采用了南京电子研究所研制的 SiC 衬底的 GaN 功率管芯, 通过对小栅宽管芯测量脉冲 I-V 曲线与不同偏置下的 S 参数建立了精确的 GaN 大信号 Angelov 模型, 再利用该模型设计了一款 L 波段内匹配功率放大器, 在 48V 漏压, 100μs 脉宽, 10% 占空比偏置下在 1.2 ~ 1.4GHz 输出功率大于 400W, 功率增益大于

15dB,最高功率附加效率(PAE)达到 81.3%,这是国内 L 波段 400W 微波功率放大器的最高效率报道,验证了模型的准确度,实现了极好的电路性能.

## 2 器件工艺与属性

图 1 是采用 0.5 $\mu\text{m}$  工艺制造的 GaN 芯片纵向结构图. 结构包括 SiC 衬底,它具有支撑、散热和电磁屏蔽的作用. 未掺杂的 GaN 缓冲层,AlN 插入层以及 AlGaIn 势垒层. 这里 AlN 插入层的作用是为了增加电子迁移率提高频率特性,并且能够减小晶格间的失配引起的散射效应. 栅场板的加入是为了降低峰值电场从而提高器件的击穿电压.

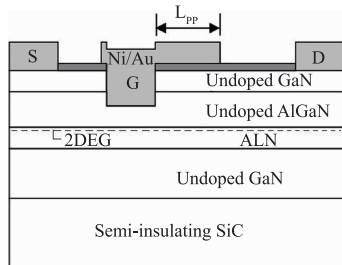


图1 GaN HEMT结构示意图

放大器为了实现高功率输出,选择了 55mm 栅宽管芯来进行匹配电路设计. 为了减小芯片的热阻,提高放大器的可靠性,SiC 衬底减薄至 80 $\mu\text{m}$  同时背金厚度增加至 15 $\mu\text{m}$  来提高散热能力. 为了减少寄生电容与寄生电感来提高器件的频率特性,整个芯片采用通孔接地,同时也采用了空气桥源跨接方式.

图 2 为 55mm 毫米栅宽的 GaN 功率管芯. 器件的单指栅宽为 430 $\mu\text{m}$ ,一共分为 8 个胞,胞胞之间采用电阻隔离提高稳定性. 整个 55mm 栅宽芯片尺寸为 4.2mm  $\times$  0.8mm.

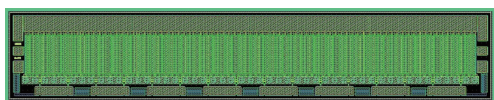


图2 55mmGaN管芯示意图

## 3 器件大信号模型

大信号等效电路模型如图 3 所示. 器件的参数从 300 $\mu\text{m}$  的模型管获得. 模型管有四根栅指,每根栅指长度 75 $\mu\text{m}$ . 为了获得器件的 Angelov 模型,对该模型管进行脉冲的  $I-V$  曲线测试以及各种偏置的  $S$  参数测试.

图 4 与图 5 比较了根据建立的 Angelov 模型仿真数据与测量数据的对比图. 可以看出根据参数提取建立的 Angelov 模型在直流参数与微波参数都有很好的对

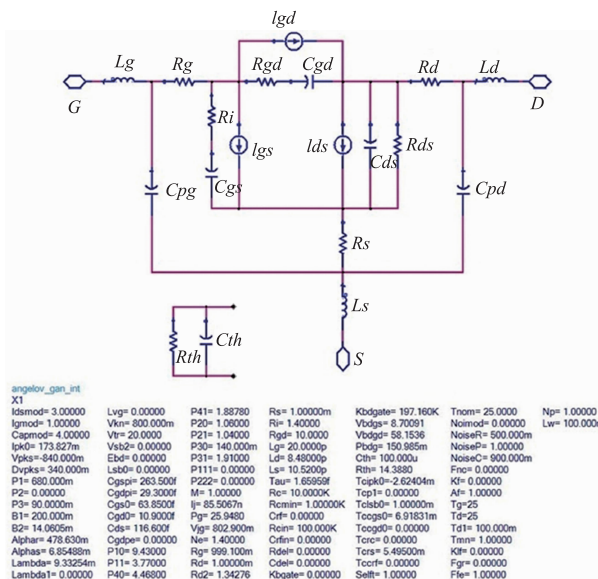


图3 GaN大信号等效电路模型与参数

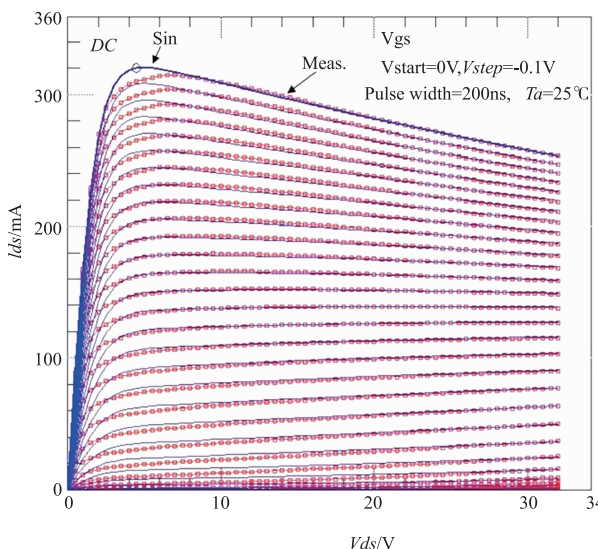


图4 仿真与测试  $I-V$  直流参数对比曲线

应性,模型精度可以满足设计微波功率放大器.

## 4 功率放大器设计

为了实现匹配电路的简化,减小由于功率合成带来的功率和效率损失,论文中的大功率放大器设计选择了单枚的 55mm 栅宽 GaN 芯片. 然后基于建立的 Angelov 大信号模型对放大器的输出匹配电路与输入匹配电路进行设计,最终得到优化的 1mm 栅宽芯片最佳负载阻抗为  $60 - j * 56\Omega$ ,55mm 栅宽芯片的最佳负载阻抗为  $1.1 - j * 1.0\Omega$ .

为了增加输入频率响应,放大器的输入电路由  $L-C-L-C-L-C$  三级低通滤波阻抗匹配网络构成,同时为了减小匹配电路体积,整个电路制造在 100 $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 基

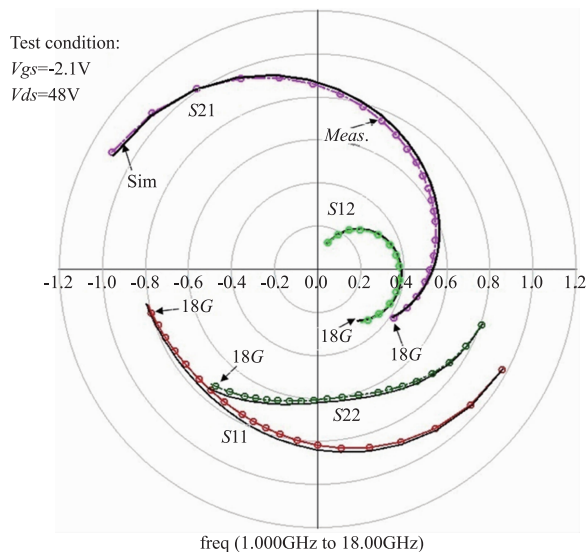


图5 仿真与测试S参数对比图

底下. 输出电路由  $L-L-C$  阻抗匹配网络构成, 整个匹配电路制造在介电常数为 9.9 的氧化铝陶瓷基板和介电常数为 152 的钛酸钡陶瓷基板上降低输出匹配损耗. 同时, 为了增加放大器带宽, 整个 55mm 栅宽放大器分为两个放大器来匹配. 图 6 为 L 波段放大器的匹配网络图, 图 7 为 1mm 栅宽的共轭输出阻抗与仿真阻抗在匹配频带内的关系图.

根据模型得到的仿真结果, 放大器的输入输出匹配电路进行设计与流片, 最终电路高温烧结在封装管壳内, 管壳底座为铜钼铜结构.

## 5 微波性能

图 8 是 L 波段 GaN 功率放大器的正面照片图. 一枚 55mm 栅宽的 GaN 功率管芯和输入输出匹配元件紧凑地烧结在  $17.4\text{mm} \times 24\text{mm}$  尺寸的封装管壳内. 金锡烧结温度为  $280^\circ\text{C}$ .

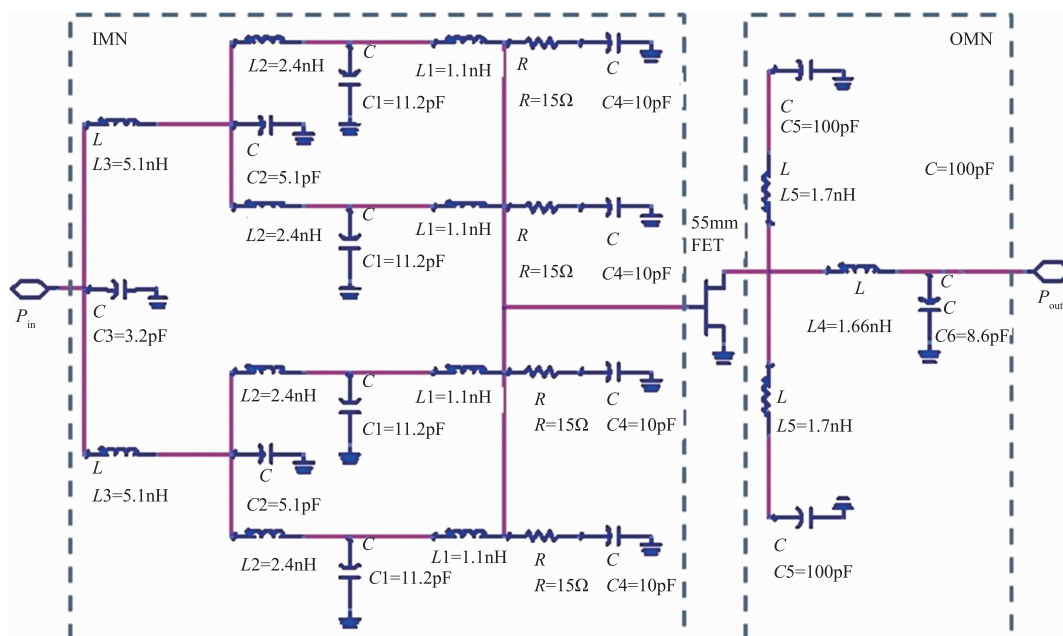


图6 GaN功率放大器匹配网络示意图

图 9 比较了小信号下放大器的输入输出回波损耗与小信号采用模型仿真与实际测试的对比值. 测试条件为 48V 漏压,  $100\mu\text{s}$  脉宽, 10% 占空比条件. 从对比数据可以看出仿真数据与实际结果非常接近, 说明放大器的属性与模型数据一致.

图 10 为放大器在 48V 漏压,  $100\mu\text{s}$  脉宽, 10% 占空比条件下 1.4GHz 频点模型仿真数据与实际数据对比. 从对比数据可以看出, 仿真曲线与实际曲线基本吻合, 放大器在输入功率 40dBm 下输出功率达到 400W, 增益超过 16dB, 同时最高功率附加效率达到 81.3%. 放大器良好的微波性能输出是依靠了精确的 GaN 大信号模型

仿真数据. 在放大器的饱和区仿真与实测曲线的差异主要是因为在大功率下由于管芯的热积累效应引起的.

为了获得宽带的微波性能, 放大器的偏置设置在 48V 漏压,  $100\mu\text{s}$  脉宽, 10% 占空比条件下测试. 从图 11 曲线可以看出放大器在 1.2 - 1.4GHz 范围内输入功率为 41dBm 下的输出功率均超过 400W (56dBm), 增益大于 15dB, 功率附加效率大于 76%, 最高达 81.3%, 并且与仿真曲线基本吻合.

表 1 是近年来国内研制的 L 波段功率放大器性能指标对比. 可以看出, 实现的 400W 功率放大器性

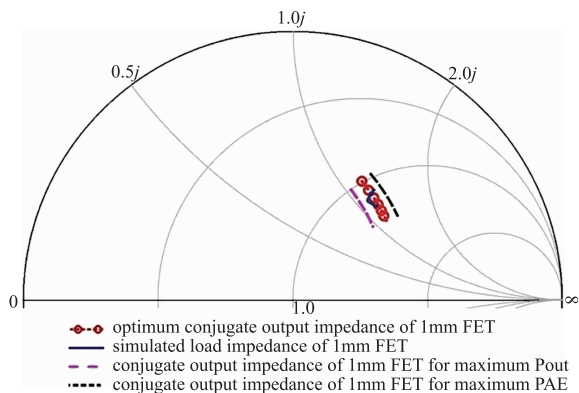


图7 1mm管芯输出与负载阻抗示意图

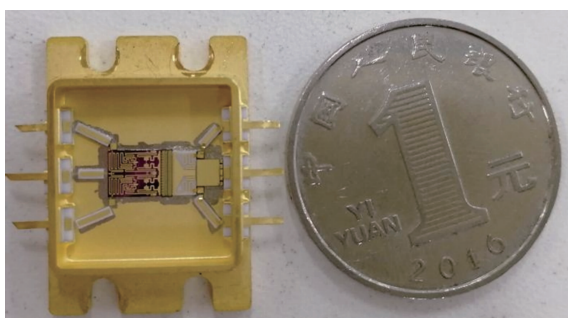


图8 L波段GaN功率放大器正面照片

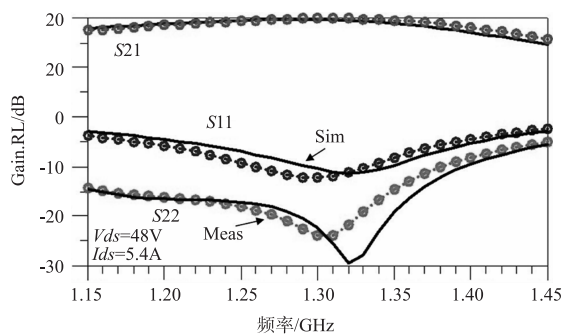


图9 放大器的小信号增益与回波损耗对比图

能优异,是当前国内 L 波段放大器的最高效率报道<sup>[6-10]</sup>.

表 1 国内 L 波段功率放大器性能对比

Ref	Freq/GHz	Pulse width/Duty	Pout/W	Vds/V	PAE
This work	1.2 - 1.4	100μs/10%	400.0	48.0	81.3%
[6]	1.2 - 1.4	500μs/10%	80.0	28.0	73.0%
[7]	0.96 - 1.25	100μs/30%	200.0	40.0	67.0%
[8]	1 - 1.15	100μs/10%	60.0	28.0	77.8%
[9]	1.2 - 1.4	300μs/10%	10.0	28.0	60.0%
[10]	1.12 - 1.36	C. W.	60.0	28.0	74.3%

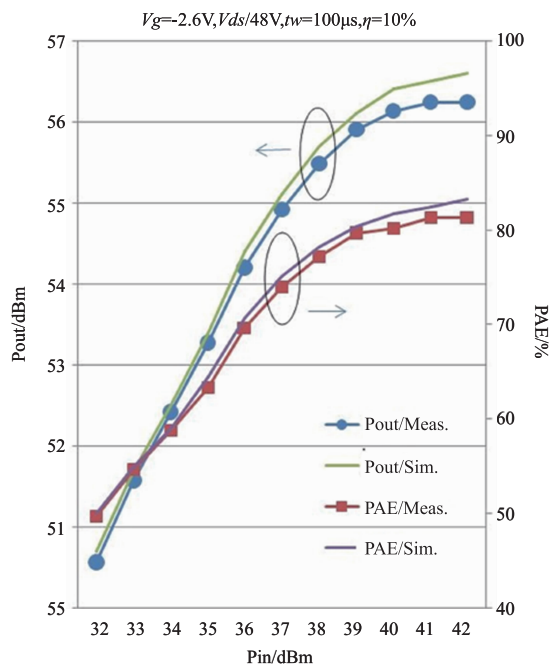


图10 放大器输出功率与效率曲线对比图

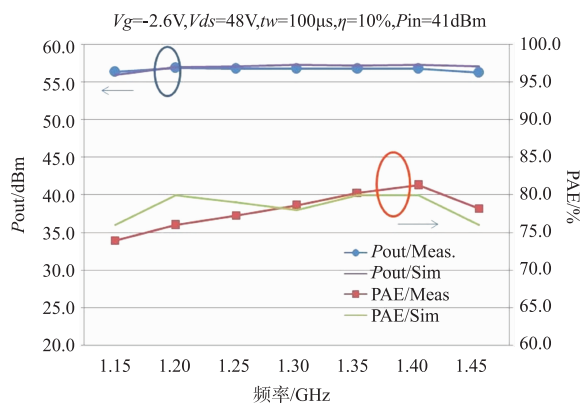


图11 放大器宽带特性曲线图

## 6 结语

本文设计一款高性能的 L 波段 GaN 微波功率放大器. 为了精确的设计放大器,用脉冲 I-V 曲线和 S 参数提取参数建立了精确的 Angelov 大信号模型. 根据该模型成功地设计了放大器的输入输出匹配电路. 最终在 48V 漏压,100μs 脉宽,10% 占空比条件下放大器在 1.2 ~ 1.4GHz 范围内输出功率均超过 400W,增益大于 15dB,功率附加效率大于 76%,最高达 81.3%,实现了优异的微波性能,可运用于雷达、通信等各种相关领域.

本项目是在南京电子器件研究所化合物部与功率器件部全体同事努力下完成的. 研制过程中同唐世军、王储君和陶洪琪三位工程师进行过有益探讨,在此一并感谢.

## 参考文献

- [1] 钟世昌,陈堂胜,钱锋,陈辰,高涛. Ku 波段 60W AlGaIn/GaN 功率管[J]. 固体电子学研究与进展,2014,34(4): 350 - 353.
- [2] Michale Mikulla, Sabine Storm, Niklas Henelius, et al. Manufacturable GaN SiC substrates and GaN epi wafer supply chain[A]. European Microwave Integrated Circuit Conference[C]. Rome, Italy:2014. 221 - 224.
- [3] Zhong Shichang, Chen Tangsheng, Ren Chunjiang, et al. AlGaIn/GaN HEMT with over 110W output power for x-Band[A]. European Microwave Integrated Circuit Conference[C]. Amsterdam, Holland:2008. 91 - 94.
- [4] Wang Houyu, Mai Kaidi, Peng Liyi, et al. Effects of the Fe-doped GaN buffer in AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrate [A]. IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits[C]. Singapore:2015. 645 - 648.
- [5] S Rochette, O Vendier, D Langrez, et al. A high efficiency 140W power amplifier based on a single GaN HEMT device for space applications in L-band[A]. European Microwave Integrated Circuit Conference[C]. Amsterdam, Holland:2012. 127 - 130.
- [6] 蔺兰峰,周衍芳,黎明,陶洪琪. L 波段 GaN 大功率高效率准单片功率放大器[J]. 固体电子学研究与进展, 2017,37(6):384 - 388.
- [7] 蒙燕强. 一种塔台用高压宽脉冲 GaN 功放设计与实现 [J]. 数字技术与应用,2018,37(1):183 - 184.
- [8] 卢啸,徐跃杭,兰贵林,国云川,徐锐敏. L 波段 GaN 高效率功率放大器技术研究[A]. 全国微波毫米波会议[C]. 重庆:2013. 1238 - 1241.
- [9] 李飞,钟世昌. L 波段 GaN 自偏压功率放大器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2018,16(5):918 - 921.
- [10] 李玉龙,宋树祥,岑明灿,蒋品群. 1.25GHz 高效率 F 类射频功率放大器[J]. 微电子学与计算机,2015,32(10):143 - 147.

## 作者简介



钟世昌(通信作者) 男,1979年9月出生,汉族,福建长汀人,2002年毕业于吉林大学物理系,同年分配至南京电子器件研究所工作至今,现为东南大学工程博士研究生,主要从事射频与微波内匹配功率放大器的研究与开发。  
E-mail: sinoboy@163.com



陈堂胜 男,研究员,1964年10月生,1986年、1989年毕业于西安交通大学电子工程系半导体物理与器件专业,分别获学士和硕士学位。1989年到南京电子器件研究所参加工作至今,长期从事化合物半导体微波功率器件和单片电路的研制工作。