

Ku 波段宽带氮化镓功率放大器 MMIC

余旭明^{1,2}, 洪 伟¹, 王维波², 张 斌²

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京, 210096; 2. 单片集成电路与模块国家重点实验室, 江苏南京, 210016)

摘 要: 基于 $0.25\mu\text{m}$ 栅长 GaN HEMT 工艺, 采用三级放大拓扑结构设计了一款 Ku 波段 GaN 功率放大器. 放大器设计从建立大信号模型出发, 输出匹配网络和级间匹配网络均采用电抗匹配减小电路的损耗, 从而提高整体放大器的功率效率. 测试结果表明, 该放大器在 $14.6\sim 18\text{GHz}$ 频带内, 小信号增益 30dB , 脉冲饱和输出功率达 15W , 功率附加效率 (PAE) 大于 32% ; 在 14.8GHz 频点处, 放大器的峰值功率达 19.5W , PAE 达 39% . 该结果表明 GaN MMIC 具有高功率高效率的优势, 具有广阔的应用前景.

关键词: 氮化镓; 功率放大器; 微波集成电路; Ku 波段

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)09-1859-05

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.026

Ku Band Power Amplifier MMIC Based on GaN HEMT Technology

YU Xu-ming^{1,2}, HONG Wei¹, WANG Wei-bo², ZHANG Bin²

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: A three stage Ku band GaN power amplifier MMIC was developed with $0.25\mu\text{m}$ GaN HEMT technology. The MMIC was designed in micro-strip technology. Based on the large signal model, the amplifier adopted reactance matching network to reduce the insertion loss of the output stage, which improved its associated efficiency. The measurement results exhibited that this amplifier provided a flat small signal gain of 30dB and a pulsed saturated output power of 15W at the drain voltage of 28V over the $14.6\sim 18\text{GHz}$ frequency range. At 14.8GHz , a peak output power of 19.5W with power added efficiency of 39% was achieved.

Key words: GaN HEMT; power amplifier; MMIC; Ku-band

1 引言

微波系统发射通道的特性在很大程度上取决于末级的功率放大器性能. 与 GaAs 材料相比, GaN 作为三代半导体的代表具有更高的热导率、更大的禁带宽度和更强的抗辐照能力, 可在探测雷达、卫星通信、固态发射机等领域得到广泛的应用^[1,2]. 在相同的体积下, 采用 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 技术设计的功率放大器不仅具有高输出功率、宽带和高效率等特性^[3~5], 而且 GaN 功率器件高电压低电流的特性还可以简化系统的二次电源转换单元, 从而缓解大电流带来的一系列难题, 成为目前微波毫米波功率器件的研究热点. 2011 年, 日本的三菱电机公司通过多胞合成及二次谐波反射控制的方式, 实现了 60W 功率输出和 45% 的 PAE, 但仅限于 15GHz 附近较窄的频率范围^[6]. 2012 年, 中科院微电子所报道过 Ku 波段的功放分立器件, 输出功率达到

24W , PAE 达到 34.6% , 但频率范围仅限于 $13.7\sim 14.2\text{GHz}$ ^[7]. 另外, 基于波形工程的 C 类到 F 类、甚至 J 类高效率功率放大器^[8], 其 PAE 已经达到 90% 以上, 但工作频率均集中在 L 和 S 频段.

针对 Ku 波段宽带高效率 GaN MMIC 功率放大器, 本文基于双场板结构 GaN HEMT, 从精确的大信号模型出发, 通过优化设计每级放大器最佳栅宽比和输出匹配电路, 设计一款三级放大拓扑结构的 Ku 波段宽带高效率功率放大器 MMIC.

2 器件工艺

功率放大器芯片采用 $0.25\mu\text{m}$ 栅长 GaN HEMT 圆片工艺制作而成. AlGaIn 势垒层中的 Al 摩尔含量是 0.25 , 外延材料的二维电子气浓度为 $1.0 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$, 霍尔测试电子迁移率为 $1900\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 栅脚通过电子束刻写技术实现, 具有较好的一致性和可控性. 为了获得较好的

频率特性,栅场板和源场板尺寸进行了优化,器件的 f_T 为 28GHz, f_{MAX} 达到 57GHz, 击穿电压达到 80V. 为了便于把沟道中产生的热量输运到热沉上, SiC 衬底厚度最终减薄至 $80\mu\text{m}$. 图 1 是 $4 \times 100\mu\text{m}$ GaN HEMT 管芯的横截面示意图及实物照片.

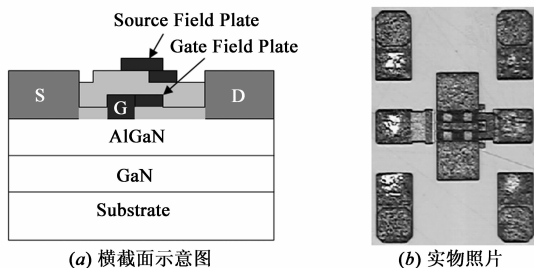


图1 $4 \times 100\mu\text{m}$ GaN HEMT 横截面示意图及实物照片

3 电路设计

器件大信号模型的准确性和精度对功放 MMIC 芯片设计的重要前提, 本文采用的大信号模型拓扑如图 2 所示.

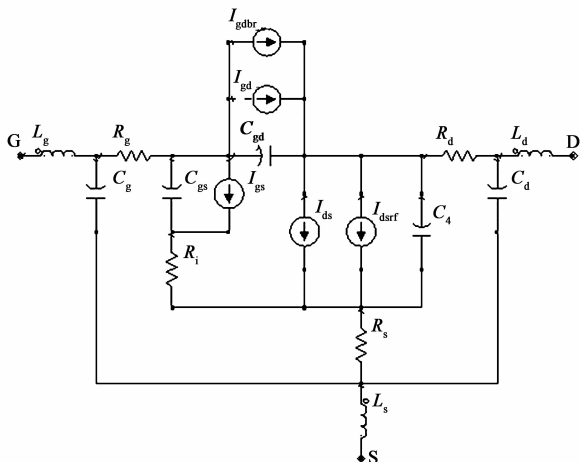


图2 GaN HEMT大信号等效电路模型拓扑

电流源 I_{gs} 、 I_{gd} 表征栅二极管特性, I_{gdbr} 表征栅漏击穿特性, I_{ds} 表征源漏电流特性, I_{dsrf} 模拟低频色散效应, C_{gs} 和 C_{gd} 分别为和偏置相关的栅源、栅漏电容. 本文采用的漏源电流 (I_{ds}) 模型是 Tjima 模型, 非线性漏源电流方程如下:

$$I_{ds} = \begin{cases} 0, & f_3 < 0 \\ W \times N \times \text{Beta} \times \tanh(\text{Alpha} \times V_{ds}) \times f_3^2, & f_3 > 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $f_1 = \text{Aid} + \exp[\text{Eid} \times (V_{t0id} + 0.15 - V_{com} - \text{Gammaid} \times V_{ds}^2)]$

$$f_2 = \frac{-\ln(f_1)}{\text{Eid}} = \frac{\ln\left(\frac{1}{f_1}\right)}{\text{Eid}} \quad (2)$$

$$f_3 = f_2 + 0.15 \quad (4)$$

$$V_{com} = \begin{cases} V_{gd}, & V_{ds} < 0 \\ V_{gs}, & V_{ds} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 W 是单指栅宽, N 是栅指数量, Aid 、 Eid 等是拟合系数. 图 3 所示是 $400\mu\text{m}$ GaN HEMT 管芯大信号模型在 14GHz 频点下的仿真数据和在片 Loadpull 测试数据的比较. 漏极电压 30V, 栅极电压 -2.5V , 输入功率 24dBm. 最佳效率匹配点的功率仿真结果是 32.66dBm, 测试结果 32.79dBm; 最佳效率匹配点的效率仿真结果是 48.64%, 实测结果是 45.34%, 非线性模型具有较好的仿真精度.

根据管芯的功率密度和所需要的饱和输出功率决定末级栅宽; 放大器的级数根据所需要的总增益确定. 驱动级的设计同样也会影响整个放大器的效率. 首先, 级间匹配网络既要满足末级管芯的输入匹配设计又要满足前级管芯的输出功率匹配; 其次, 驱动级管芯的栅宽要根据功率密度和增益进行合理选择, 需要给末级管芯提供足够的激励功率, 同时驱动级管芯不能深压缩^[7]. 每一级管芯栅宽的选择如图 4 所示. 末级管芯的栅宽为 3.84mm, 第二级管芯的栅宽为 1.28mm, 第一级管芯的栅宽为 0.48mm.

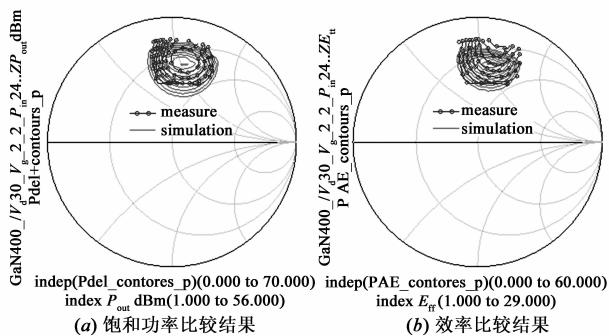


图3 $4 \times 100\mu\text{m}$ GaN HEMT 器件大信号 Loadpull 仿真/测试结果

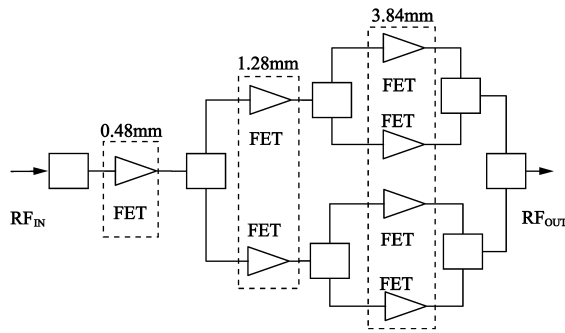


图4 放大器每一级管芯栅宽的选择

本放大器采用微带线的结构进行设计. 电路中的功分器作为匹配电路的一部分完成阻抗匹配. 栅偏置电路采用 RC 网络, 漏偏置线作为匹配电路的一部分, 需要考虑线宽能否承受对应的电流. 由于频率较高, 匹

配电路中的电感均采用微带实现. 放大器采用微带线的结构进行设计, 级间匹配网络和末级匹配网络均为电抗匹配, 减小输出匹配网络的插入损耗, 实现高增益高效率. 设计的 Ku 波段 GaN 功率放大器芯片的实物显微照片和原理图分别见图 5、图 6.

功率放大器的效率主要取决于输出匹配电路的设计: 一方面是末级管芯的阻抗匹配情况; 另一方面是匹配网络自身的插入损耗大小. 和 GaAs 功率器件类似, GaN HEMT 器件的最佳效率阻抗和最佳功率阻抗不在同一个阻抗点, 因此输出匹配网络的阻抗参考往往处于最佳效率和最佳功率之间; 为了达到高效率, 需要往效率匹配点偏, 牺牲部分功率特性. 实现两个阻抗值之间的匹配往往有多个匹配结构实现, 为了实现高效

率就需要找到插入损耗最小的匹配网络.

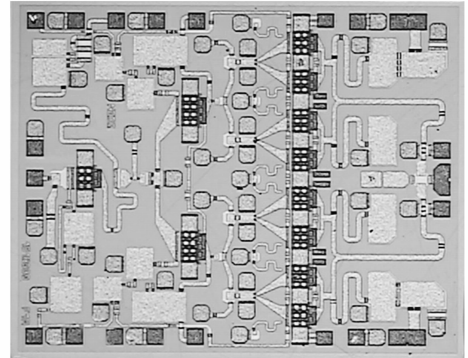


图5 GaN功率MMIC的显微照片

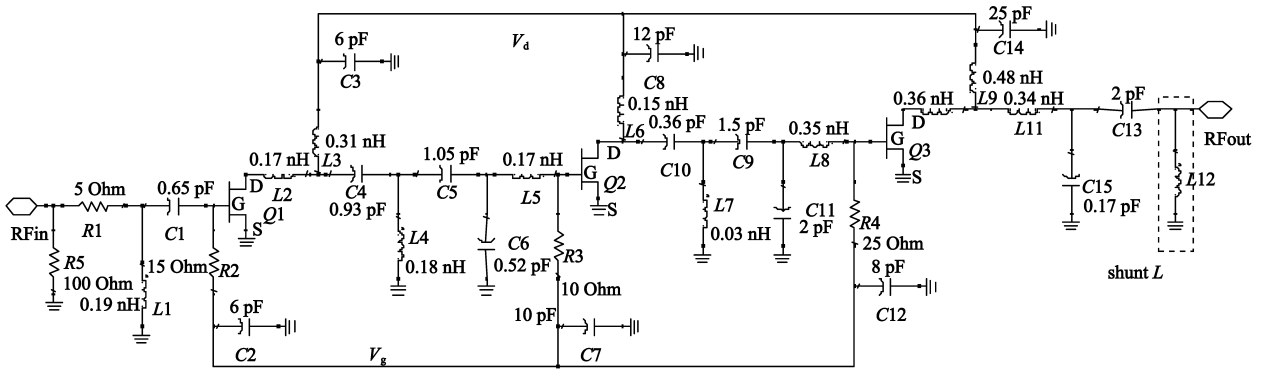


图6 GaN功率MMIC的匹配电路原理示意图

如图 6 所示, 末级输出匹配网络中的并联电感虽然可以增加放大器输出端口的抗静电能力, 但是会增加匹配电路的插损, 从而降低放大器的效率. 图 7 所示为有并联电感和没有并联电感两种匹配网络的插入损耗仿真结果. 两种网络都是匹配在最佳效率点附近, 并联电感值约为 1nH, 采用螺旋电感实现.

振荡^[9]. 串联电阻也可以改善相邻晶胞之间的信号串扰, 有助于提高合成效率. 为了消除偶模振荡, 每一级的管芯栅偏置电路中都引入 RC 网络^[10].

4 测试结果

研制的放大器芯片首先用金锡焊料高温烧结在 0.2mm 厚的无氧铜载体上, 然后把载体低温烧结在测试盒中. 放大器芯片的输入输出端通过直径为 $25\mu\text{m}$ 的金丝和测试盒中的 50 欧姆微带线连接起来. 在 Ku 波段, 芯片输入输出端压点和微带线之间的金丝具有较明显的电感效应, 会影响放大器的输入驻波和输出匹配. 放大器设计时将 $300\mu\text{m}$ 长的金丝考虑在内对匹配电路进行优化. 对装配好的 7 只放大器样品进行测试, 漏极工作电压为 28V, 10% 占空比, 小信号特性、输出功率、增益和附加效率测试结果如图 8、图 9 所示.

从图 8 可以看出小信号仿真结果测试结果具有较好一致性, 不同放大器之间的增益波动原因之一由于工艺和装配的离散以及测试盒的腔体效应. 图 9 所示为功率放大器在激励为 21dBm 时的输出功率、增益以及功率附加效率的典型数据. 测试结果表明放大器在 14.6~18GHz 频带内的输出功率大于 15W, 增益大于

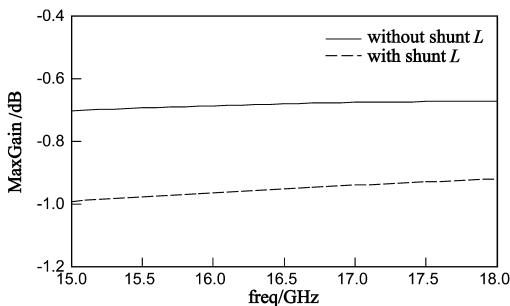


图7 输出匹配网络插损仿真结果

从图 7 可以看出含并联电感的匹配网络将增加 0.3dB 左右的插入损耗, 这将导致整个放大器的效率下降 7% 左右. 因此本放大器的输出匹配网络采用无并联电感的拓扑进行设计. 为了改善电路的稳定性, 末级管芯相邻晶胞之间串联一个小电阻, 可以有效抑制奇模

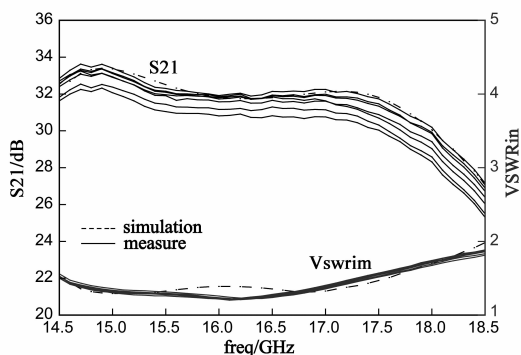


图8 小信号增益和输入驻波的测试仿真结果

20dB. 在 14.8GHz, 放大器的最大输出功率达到 42.9dBm (19.5W), 功率附加效率为 39%, 相应的增益为 21.9dB.

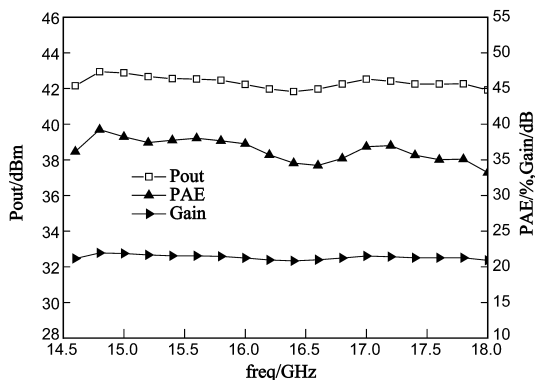


图9 放大器芯片在28V电压下的输出功率、增益及效率测试结果

相比较 GaAs 功率芯片而言, GaN 功率放大器对温度更加的敏感. 图 10 是该放大器在不同环境温度下及不同栅压下的输出功率测试曲线.

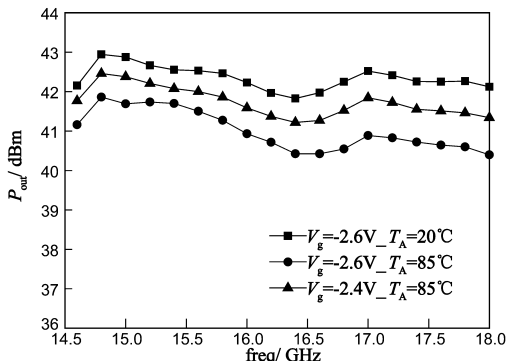


图10 GaN功率放大器芯片在不同温度不同栅压下的测试结果

从图 10 可以看出 GaN 功率芯片随着环境温度的升高, 输出功率下降的幅度较大: 当环境温度从 20°C 上升到 85°C, 在相同的栅压和相同的注入功率下, 放大器的输出功率下降了 1.5dB 左右; 在 85°C 环境温度下, 相同的注入功率下, 把栅压从 -2.6V 调为 -2.4V, 放大器的输出功率提高了 0.5dB ~ 1dB.

对 $4 \times 100\mu\text{m}$ GaN HEMT 管芯进行不同温度下的在片 Loadpull 测试, 表明 GaN 管芯的输出功率温度系数为 $-0.004\text{dB}/^\circ\text{C}$, 增益温度系数为 $-0.02\text{dB}/^\circ\text{C}$. 当放大器的沟道温度升高后, 一方面器件自身的输出功率能力下降, 同时增益也大幅度下降, 想要维持常温下的输出功率就需要更大的注入功率. 为了实现高效率, GaN 功率放大器芯片的静态偏置点一般选择在深 AB 类, 器件结温升高后增益下降导致末级管芯无法达到饱和输出状态. 从测试结果也可以看出放大器的栅压仅调整了 0.2V, 输出功率就得到了大幅度提高. 因此, GaN 功率放大器芯片的栅偏置网络中引入温度补偿电路将会明显改善放大器的温度特性.

5 结论

本文基于 $0.25\mu\text{m}$ 栅长 GaN HEMT 圆片工艺通过大信号精确建模、优化驱动级和末级栅宽比和低损耗电抗匹配技术设计了一款 Ku 波段高效率功率放大器芯片, 芯片尺寸 $2.3\text{mm} \times 1.9\text{mm}$. 实测结果表明该放大器在 14.6 ~ 18GHz 频带内的饱和输出功率大于 15W, 最高效率达到 39%. 由于 GaN 器件的功率增益在高温时下降明显, 下一步工作将通过栅压的温度补偿改善 GaN 功率放大器的高低温度特性.

参考文献

- [1] S T Sheppard, R P Smith, W L Pribble, et al. High power hybrid and MMIC amplifiers using wide-bandgap semiconductor devices on semi-insulating SiC substrates[A]. IEEE Device Research Conference Digest[C]. Santa Barbara, CA: IEEE Press, 2002. 175 - 178.
 - [2] M J Rosker. The Present state of the Art of wide-bandgap semiconductors and their future[A]. IEEE Radio Frequency Integrated Circuit (RFIC) Symposium Digest[C]. Honolulu: IEEE Press, 2007. 159 - 162.
 - [3] D E Meharry, R J Lender, K Chu, et al. Multi-Watt wideband MMICs in GaN and GaAs[A]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig[C]. Honolulu: IEEE Press, 2007. 631 - 634.
 - [4] C Campbell, C Lee, V Williams, et al. A wideband power amplifier MMIC utilizing GaN on SiC HEMT technology[A]. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium Digest[C]. Monterey, CA: IEEE Press, 2008. 1 - 4.
 - [5] 冷永清, 张立军, 曾云, 等. 基于 GaN HEMT 的 1.5 ~ 3.5GHz 宽带平衡功率放大器设计[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 815 - 820.
- LENG Yong-qing, ZHANG Li-jun, ZENG Yun, et al. Design of a 1.5 ~ 3.5GHz octave bandwidth balanced power amplifier in GaN HEMT technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4): 815 - 820. (in Chinese)

- [6] K Yamauchi, H Noto, H Nonomura, et al. A 45% power added efficiency, Ku-band 60W GaN power amplifier [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Baltimore, MD: IEEE Press, 2011: 1 – 4.
- [7] W J Luo, X J Chen, L Pang, et al. A 24W Ku band GaN based power amplifier with 9.1 dB linear gain [J]. Microelectronics Journal, 2012, 43(8): 569 – 572.
- [8] R S Pengelly, S M Wood, J W Milligan, et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs [J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2012, 60(6): 1764 – 1783.
- [9] R G Freitag. A unified analysis of MMIC power amplifier stability [A]. IEEE MTT-S Digest [C]. Albuquerque, NM: IEEE Press, 1992. 297 – 300.
- [10] Steven Marsh. Practical MMIC Design [M]. Boston, America: Artech House, INC. 2006

作者简介



余旭明 男, 1982 年 7 月生, 浙江建德人。2004 年和 2006 年在南京理工大学获得工学学士和硕士学位。现为东南大学在读博士生, 从事 GaN 功率放大器研究。

E-mail: nlgyxm9989@163.com