

文章编号: 2095-4980(2019)02-0248-05

C 波段紧凑型 25 W GaN 宽带功率放大器

刘 帅, 蔡道民, 武继斌

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 基于 0.25 μm GaN 工艺和以 SiC 为衬底的高电子迁移率晶体管(HEMT)技术, 采用电抗匹配、优化电路的静态直流工作点、三级放大结构栅宽比 1:3.6:16 等措施, 保证电路的增益和功率指标, 实现了 C 波段高功率、高增益和高效率的宽带单片微波集成电路(MMIC)放大器。芯片测试结果表明, 在 4~8 GHz 频率范围内, 漏极电压 28 V, 连续波条件下, 放大器的小信号增益大于 30 dB, 大信号增益大于 23 dB, 饱和输出功率大于 44 dBm, 功率附加效率为 38%~45%。该单片放大器芯片尺寸为 3.6 mm \times 4.0 mm。

关键词: GaN 高电子迁移率晶体管; 高功率放大器; 宽带; 功率附加效率

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0248

C band compact 25 W GaN power amplifier

LIU Shuai, CAI Daomin, WU Jibin

(13th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: Based on the 0.25 μm GaN technology and High Electron Mobility Transistor(HEMT) on SiC substrate, a high power, high gain and high efficiency C-band broadband Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) amplifier is developed. The gain and the output power index of the circuit are guaranteed by means of reactance matching, optimizing the static DC working point of the circuit, and selecting the gate width ratio of the three-stage amplifier 1:3.6:16. The test results show that the chip in 4–8 GHz frequency range, the drain voltage 28 V, under continuous wave condition, the small signal gain of the MMIC is greater than 30 dB, the large signal gain is greater than 23 dB, the saturation output power is greater than 44 dBm, the power added efficiency is 38% to 45%. The size of the MMIC is 3.6 mm \times 4 mm.

Keywords: GaN High Electron Mobility Transistor; high power amplifiers; broad band; Power Additional Efficiency(PAE)

随着微波领域新技术的发展, 无线通信和卫星通信传输的信息量越来越大, 亟需更多的频谱资源来满足, 迫切需要微波宽带射频前端, 而宽带高功率放大器则是其核心所在, 也是研究的热点^[1-3]。

相比于 Si 和 GaAs 等半导体材料, GaN 工艺器件因其固有的高击穿电场、高电子迁移率、非常好的散热特性等特点, 尤其是具有较高的输出阻抗和较低的寄生电容而成为高功率、宽带功率放大器 MMIC 研制的首选工艺^[4-5]。国际上诸多公司报道了许多宽带 GaN MMIC PA 的研究成果^[6-7], 国内相关研究正在逐步开展。

本文基于自主的 0.25 μm GaN HEMT 工艺和有耗式电抗匹配结构, 采用宽带匹配技术和增益补偿技术研发了一款 4~8 GHz 高功率、高效率的宽带微波单片功率放大器, 该功率放大器可广泛用于卫星通信等领域。

1 0.25 μm GaN HEMT 工艺和器件特性

本设计基于国内先进的 GaN HEMT 工艺, 如图 1 所示。采用 MOVPE 技术基于 4H-SiC 衬底进行 AlGaIn/GaN 外延材料的制备, 器件采用离子注入工艺进行台面腐蚀, 实现器件之间良好隔离。采用 AlGaIn 帽层控制表面电荷, 有效抑制与大信号电流崩塌和跨导(g_m)散射有关的不稳定问题^[8-9]。漏极、源极与 AlGaIn/GaN 异质结连接采用 Ti/Al/Ni/Au 四层金属在惰性气体保护下进行高温退火形成欧姆接触, 降低本征电阻, 提升器件的效率、增益和截止频率。通过电子束直写工艺实现 0.25 μm 栅长, 工艺控制成熟稳定。器件背面通孔接地, 在晶圆减薄到

80 μm 厚度后, 采用感应耦合等离子体干法腐蚀技术完成打孔工艺。最后采用 4 μm 厚镀金进行背面金属接地。本工艺还包括 50 Ω/□的 NiCr 电阻和 Si₃N₄ 介质金属-绝缘体-金属(Metal Insulator Metal, MIM)电容^[10-11]。

基于上述工艺, 设计制作了包含一系列不同栅指数和不同单指栅宽器件的模型版, 并采用模型版中器件的各项测试参数, 提取了用于电性能仿真设计的可定标的大信号器件模型参数^[12]。

图 2 为 0.25 μm GaN HEMT 工艺制作的器件直流参数。图 3 是栅宽为 10×90 μm 器件的频率响应, 从中可以得到, 在频率 8 GHz 时, 最大功率增益(MaxGain)大于 19 dB。图 4 是尺寸为 10×90 μm 的单元器件在 8 GHz 频率下的负载牵引(loadpull)曲线, 从中得到最大输出功率大于 37 dBm, 最高附加效率为 75%, 功率增益大于 13 dB。

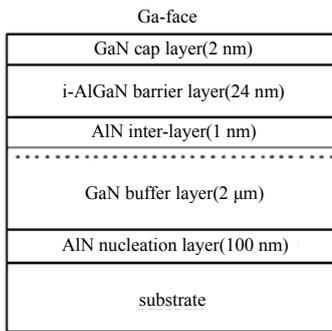


Fig.1 Diagram of AlGaIn/GaN HEMT
图 1 AlGaIn/GaN 工艺剖面图

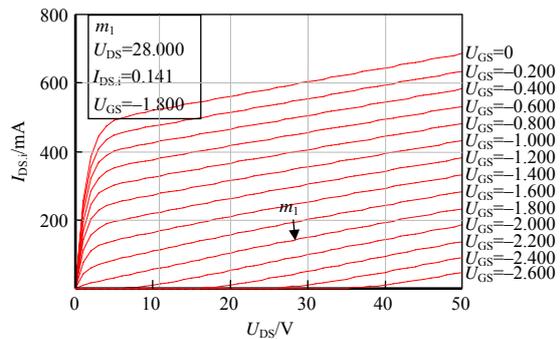


Fig.2 DC parameters of the GaN HEMT device
图 2 GaN HEMT 器件直流参数

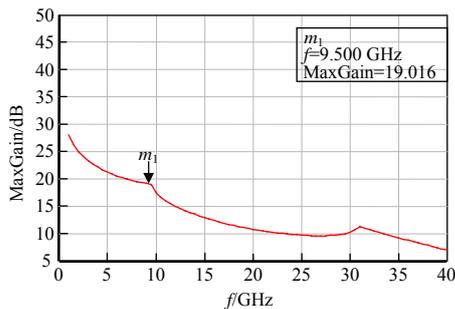
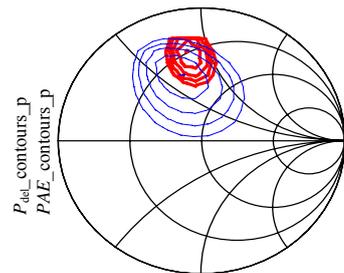


Fig.3 Frequency characteristics curves of the GaN HEMT device at $U_{ds}=28$ V and $I_{ds}=30\%I_{max}$
图 3 $U_{ds}=28$ V, $I_{ds}=30\%I_{max}$ 时 GaN HEMT 器件频率特性曲线



indep(PAE_contours_p)(0.000 to 34.000)
indep(Pdel_contours_p)(0.000 to 64.000)
maximum Power Added Efficiency, 70.02%
maximum Power delivered, 37.18 dBm

Fig.4 Curve of 10×90 μm GaN load pull
图 4 10×90 μm GaN load pull 曲线

2 C 波段放大器设计和制作

2.1 电路原理图设计

为研制满足表 1 要求的 GaN HEMT 放大器电路, 在原理图设计中要解决以下 3 个技术难点: a) 最佳阻抗随频率变化, 分散较大; b) 由于增益滚降使得器件在倍频程带宽内增益差距较大, 频带内功率和增益平坦度较差; c) 阻抗 Q 值变化较大, 匹配结构复杂, 损耗较大^[13]。

目前宽带高功率放大器主要有分布式电路结构和有耗电抗式匹配 2 种。分布式电路可以实现多个倍频程的超宽带电路, 但该结构电路增益较低且饱和输出功率主要受工作电压和输出负载所限制。有耗电抗式电路结构可在倍频程带宽内实现高的输出功率、功率增益和效率, 从而成为宽带放大器的主流架构^[14-15]。因此本文采用有耗电抗式匹配实现 C 波段宽带功率放大器的研制。

由于 GaN HEMT 器件的压缩范围较大, 单级器件的饱和功率压缩可以高达 3 dB, 因此确定电路增益时, 不仅需要考虑到所选单元器件的最大功率增益 MaxGain, 还需要考虑到 GaN HEMT 器件的压缩特性。结合各级匹配电路的损耗和本放大器大于 23 dB 的功率增益要求, 本设计采用三级放大电路结构。

表 1 C 波段功率放大器设计参数

Table1 Design parameters of C-band power amplifier		
parameters	values	condition
f/GHz	4-8	
saturated output power/dBm	44	$U_{DS}=28$ V, $I_{DS}=30\% I_{max}$
efficiency/%	40	
power gain/dB	22	
small signal gain/dB	25	
return loss/dB	-10	

根据图 4 所示 $10 \times 90 \mu\text{m}$ 的功率管的 loadpull 曲线, 单胞最大输出功率为 37 dBm, 功率增益大于 13 dB, 8 胞合成的理论输出最大功率为 46 dBm。考虑输出匹配和功率合成大约 0.4~0.5 dB 的损耗, 同时考虑工艺偏差、模型变动和散热影响所带来的误差, 给出了大于 1 dB 的冗余量, 从而确定放大器功率输出级器件的总栅宽为 $8 \times 10 \times 90 \mu\text{m}$ 。

驱动级采用 2 个 $10 \times 80 \mu\text{m}$ 的驱动管, 提供的驱动功率大于 38 dBm, 增益大于 13 dB; 前级采用一个 $6 \times 75 \mu\text{m}$ 的驱动管, 增益大于 13 dB。前级、驱动级和末级输出栅宽比为 1:3.6:16。前级电路提供足够的增益, 同时调节增益平坦度; 驱动级确保足够的线性输出功率, 同时维持较高的效率。

确定前级、驱动级和输出级有源器件尺寸和数量后, 重点考虑匹配结构。通常输入匹配、级间匹配和输出匹配结构不仅实现阻抗变换, 而且具有滤波整形作用, 共同实现 4~8 GHz 宽频段范围内的频率响应, 同时抑制频段外响应。上述匹配结构中, 输出级阻抗匹配最为关键, 对输出功率和效率有非常重要的影响。采用电抗式低通滤波结构, 实现低损耗匹配; 级间匹配采用 LC 和 CL 带通匹配, 实现前后级器件间阻抗变换; 输入匹配采用串联 RC 和两阶 LC 匹配, 降低输入驻波, 同时输入和级间匹配网络补偿器件增益滚降, 提升电路增益响应平坦度^[16]。电路在 $U_{ds}=28 \text{ V}$, $I_{ds}=30\%I_{max}$ 的 AB 类直流偏置点条件下进行匹配参数的优化设计。

2.2 芯片版图设计

本文设计的功率放大器主要工作在连续波模式下, 而末级有源器件作为主要发热源, 其热耗密度在芯片中是最大的。因此, 本文在末级管芯布局中采用梯度加宽栅-栅间距的方式, 加大有源器件面积, 降低热耗功率密度, 同时又可以最大程度减小由于有源器件面积增加所带来的寄生电容增大和模型误差所导致设计和实测性能之间的差距。

芯片版图设计时考虑电磁干扰的因素。采用电磁仿真和实验验证的方法, 以获得最佳的电性能和小的芯片尺寸。在版图设计中还要考虑到工艺兼容性和功率容量, 在尽量缩小芯片面积的同时要充分考虑微带线与微带线之间、微带线与器件之间的互相干扰效应。版图验证采用版图与原理图对应、设计规则检查(Design Rule Check, DRC)和局部的电磁场分析提高电路设计的精确度。在进行电磁场仿真时, 为了针对性地对电路进行调整, 采用灵敏度分析, 找出对电路性能影响较大的灵敏元件, 在版图布局时进行适当调整, 避免工艺误差对性能产生影响。最终设计制作完成的宽带功率放大器 MMIC 芯片照片如图 5 所示, 芯片尺寸为 $3.6 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 。

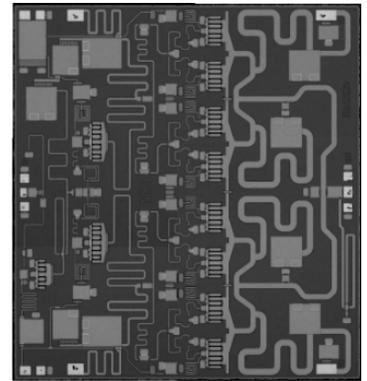


Fig.5 Photo of the amplifier MMIC circuit
图 5 放大器 MMIC 电路照片

3 测试结果与分析

利用矢量网络分析仪和微波探针台对芯片的各项性能指标进行了在片探针测试, 测试频率范围为 4~8 GHz, 放大器偏置条件为 $U_{ds}=28 \text{ V}$, $I_{ds}=30\%I_{max}$ 。

图 6 为放大器的小信号 S 参数测试曲线, $S_{21} \geq 30 \text{ dB}$, $S_{11} \leq -15 \text{ dB}$, $S_{22} \leq -7 \text{ dB}$, 表明电路输入、输出驻波较好, 小信号 S 参数满足设计指标要求。图 7 为测试和模拟输出功率随频率变化曲线。

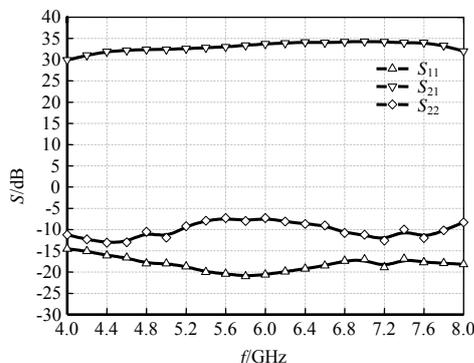


Fig.6 Measured curves of the small-signal characteristic parameters of the power amplifier
图 6 放大器小信号特性参数测试曲线

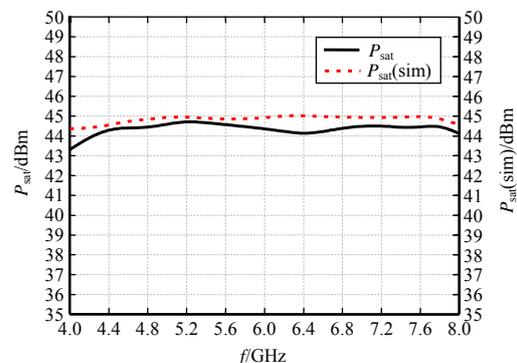


Fig.7 Measured and simulated output power of the power amplifier at $U_{ds}=28 \text{ V}$, $I_{ds}=30\%I_{max}$
图 7 测试和模拟输出功率($U_{ds}=28 \text{ V}$, $I_{ds}=30\%I_{max}$)

图 8 为测试和模拟功率增益随频率变化曲线,图 9 为测试和模拟功率附加效率随频率变化曲线。在 4~8 GHz 频率范围内,功率放大器的 $P_{\text{out}} \geq 44 \text{ dBm}$, $PAE \geq 38\%$, $G_p \geq 23 \text{ dB}$, 增益平坦度为 $\pm 0.5 \text{ dB}$, 芯片的各项指标基本达到了研制要求。

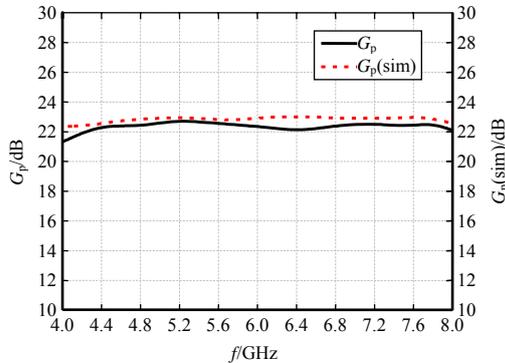


Fig.8 Measured and simulated G_p of the power amplifier at $U_{\text{ds}}=28 \text{ V}$, $I_{\text{ds}}=30\%I_{\text{max}}$

图 8 测试和模拟功率增益($U_{\text{ds}}=28 \text{ V}$, $I_{\text{ds}}=30\%I_{\text{max}}$)

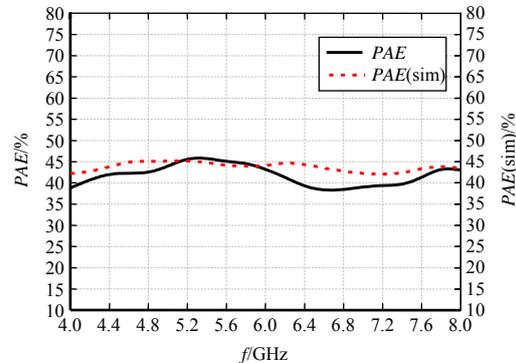


Fig.9 Measured and simulated PAE of the power amplifier at $U_{\text{ds}}=28 \text{ V}$, $I_{\text{ds}}=30\%I_{\text{max}}$

图 9 测试和模拟功率附加效率($U_{\text{ds}}=28 \text{ V}$, $I_{\text{ds}}=30\%I_{\text{max}}$)

从测试曲线和仿真曲线的对比中可以发现,研制的 C 波段功放芯片在 4~8 GHz 具有高功率和高效特性,同时测试和模拟值吻合较好,验证了模型和设计准确性。

仿真结果和测试结果经过电路后仿真分析,造成差异的主要原因是受器件非线性特性的影响,频带内各个频点的功率增益压缩点不同,同时工艺和材料的离散性也是一个重要原因,为后续电路改进和生产提供了依据。

4 结论

本文基于 $0.25 \mu\text{m}$ GaN HEMT 工艺和有耗式电抗架构,采用宽带匹配技术和增益补偿技术,设计了 C 波段紧凑型高功率和高效微波放大器。详细介绍了有源器件的选择、电路设计和版图布局等关键步骤,完成了小信号特性和大信号特性的测试。芯片输出功率(P_{out})大于 44 dBm,功率附加效率(PAE)介于 38%~45%之间,大信号增益大于 23 dB,输入回波损耗小于 -15 dB。

参考文献:

- [1] MEHARRY D E,LENDER R J,CHU K C K,et al. Multi-Watt wideband MMICs in GaN and GaAs[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,HI,USA:IEEE, 2008:631-634.
- [2] GASSMANN J. Wideband,high-efficiency GaN power amplifiers utilizing a non-uniform distributed topology[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,HI,USA:IEEE, 2008:615-618.
- [3] CAMPBELL C,LEE C,WILLIAMS V,et al. A wideband power amplifier MMIC utilizing GaN on SiC HEMT technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009,44(10):2640-2647.
- [4] REESE E,ALLEN D,LEE C,et al. Wideband power amplifier MMICs utilizing GaN on SiC[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim,CA,USA:IEEE, 2010:1230-1233.
- [5] MASUDA S,AKASEGAWA A,OHKI T,et al. Over 10 W C-Ku band GaN MMIC non-uniform distributed power amplifier with broadband couplers[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim,CA,USA:IEEE, 2010:1388-1391.
- [6] KOMIAK J J,KONG W,NICHOLS K. High efficiency wideband 6 to 18 GHz PHEMT power amplifier MMIC[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Seattle,WA,USA:IEEE, 2002:905-907.
- [7] TriQuint Semiconductor. TGA2501 Datasheet[Z]. 2006:1-11.
- [8] KIKKAWA T,NAGAHARA M,KIMURA T,et al. A 36 W CW AlGaIn/GaN-power HEMT using surface-charge-controlled structure[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Seattle,WA,USA:IEEE, 2002:1815-1818.
- [9] KIKKAWA T,NAGAHARA M,OKAMOTO N,et al. Surface-charge-controlled AlGaIn/GaN-power HFET without current collapse and Gm dispersion[C]// Technical Digest of International Electron Devices Meeting. Washington,DC,USA:IEEE, 2001:585-588.
- [10] WU Y F,KAPOLNEK D,IBBETSON J P,et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001,48(3):586-590.