

文章编号: 2095-4980(2023)08-1054-06

2~6 GHz 紧凑型、高效率 GaN MMIC 功率放大器

邬佳晟, 蔡道民

(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 SiC 衬底的 GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)工艺, 根据有源器件的 G_{max} 和输出功率密度, 选择末级功率器件尺寸并确定其最优阻抗; 采用三级放大器, 其栅宽比为 1:4:16, 实现高功率增益和高效率; 利用等 Q 匹配技术, 把偏置电路融入匹配电路中, 实现简单、低损耗和宽带阻抗变换; 借助电磁场寄生参数提取技术实现紧凑型芯片版图, 尺寸为 2.8 mm \times 2.0 mm。测试结果表明, 偏置条件漏极电压 $U_{\text{D}}=28$ V、 $U_{\text{G}}=-2.2$ V, 在 2~6 GHz 频率范围内, 功率放大器增益大于 24 dB, 饱和输出功率大于 43 dBm, 功率附加效率大于 45%, 可广泛应用于电子对抗和电子围栏等领域。

关键词: 紧凑; 功率附加效率; 宽带; 增益; 微波单片集成电路

中图分类号: TN43; TN722.75

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023014

2~6 GHz compact GaN power amplifier MMICs with high PAE

WU Jiasheng, CAI Daomin

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: Based on the 0.25 μm SiC substrate GaN High Electron Mobility Transistor(HEMT) process, the final power device size is selected and its optimal impedance is determined by the G_{max} and the unit output power density of the active device. The tertiary amplifier is adopted, and its gate width ratio is 1:4:16 to achieve high power gain and high efficiency. By using the equal-Q-matching technique, and integrating the bias circuit into the matching circuit, an impedance transformation is realized with simple, low loss and broadband. With the help of the extraction of parasitic parameters in electromagnetic fields, the compact chip is realized. The chip size of the Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) amplifier is 2.8 mm \times 2.0 mm. The test results show that in the 2~6 GHz frequency range, and under the conditions of the drain voltage of 28 V, the gate voltage -2.2 V, and continuous wave, the large signal gain of the MMIC amplifier is greater than 24 dB, the saturation output power is greater than 43 dBm, and the Power Additional Efficiency(PAE) is greater than 45%. The proposed power amplifier can be widely used in electronic countermeasures and electronic fence.

Keywords: compact; Power Additional Efficiency(PAE); broadband; gain; Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC)

第三代半导体器件 GaN 因其固有的诸多优势, 包括高功率密度、高饱和电子速率、易宽带匹配和好的环境适应能力等, 是当前固态微波器件研究的热点^[1-4], 而宽带、高功率、高效率和高增益的微波单片集成电路(MMIC)功率放大器则一直是电子对抗、电子围栏和雷达通信等领域的关键核心器件, 美国等占据领先地位^[5-7], WOLFSPEED、QORVO 等公司有相关产品报道^[8-9], 国内则报道较少。

本文报道了基于 0.25 μm GaN MMIC 工艺, 研制一款 2~6 GHz 紧凑型、高增益和高效率的宽带 MMIC 功率放大器。该放大器技术指标达到输出功率大于 20 W, 效率大于 45%, 小信号增益大于 32 dB, 功率增益大于 24 dB, 具有非常广泛的应用领域。

1 GaN MMIC 工艺和器件特性

0.25 μm GaN MMIC 工艺主要包括 T 形状栅制作、源漏欧姆接触制作、SiN 介质钝化、金属-绝缘体-金属 (Metal-Insulator-Metal, MIM) 电容、NiCr 金属电阻和互联金属 1 和金属 2 以及背面密集通孔等。为了提升器件的可靠性，优化了源场板结构和栅漏间距等，器件击穿电压大于 110 V，满足 28 V 电压应用需求；同时采用了 3 000 Å 厚的 SiN 介质，具有高击穿特性(大于 250 V)。相关器件直流参数见表 1。有源器件具有良好的微波特性，比如电流截止频率(f_T)大于 30 GHz，功率增益截止频率(f_{MAX})大于 60 GHz，其在 6 GHz 工作频率点，最大功率增益大于 15 dB，功率密度大于 10 W/mm，PAE 大于 70%。本工艺采用 SiC 作异质衬底，与 GaN 外延层具有良好的晶格匹配特性，同时具有良好的散热能力，满足宽带高效率功放的需求。

表 1 0.25 μm GaN MMIC 工艺器件参数

Table 1 Parameters of 0.25 μm GaN MMIC process device

device	transconductance	threshold	breakdown	capacitance density	current density	block resistivity
	mS/mm	voltage/V	voltage/V	pF/mm ²	mA/μm	Ω/□
HEMT	400	-3	110	-	-	-
MIM	-	-	-	200	-	-
metal1	-	-	-	-	4	-
metal2	-	-	-	-	20	-
NiCr	-	-	-	-	-	50

2 MMIC 放大器设计和制作

功率放大器设计通常从未级放大器开始，根据晶体管输出功率密度 8 W/mm(28 V 电压下)，基于负载牵引 (LOAD PULL) 找出器件的最佳输出功率阻抗点和对应的效率、功率和增益，图 1 是本放大器采用的 10 指、单指栅宽 300 μm 的晶体管(总栅宽 3 mm)的 LOAD PULL 圆图。从中得到晶体管输出功率约 45 dBm，PAE 大于 70%，此时输入功率为 30 dBm，故功率增益为 15 dB。

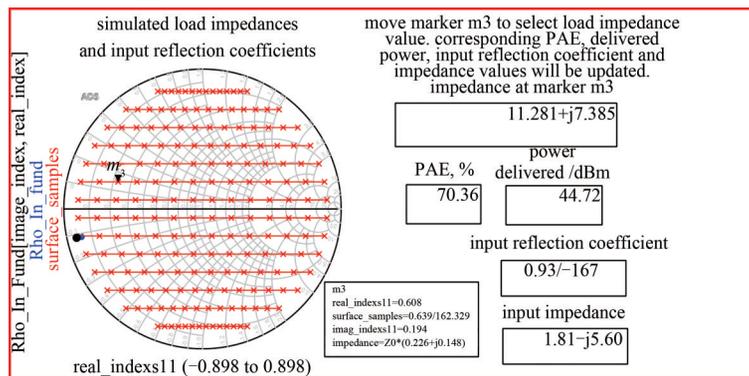


Fig.1 Load impedance circle of final stage GaN HEMT device

图 1 GaN HEMT 的末级器件负载阻抗圆图

末级晶体管尺寸不仅由输出功率密度决定，同时也要考虑其最大增益。图 2 是在偏置条件 $U_D=28\text{ V}$ ， $U_G=-2.2\text{ V}$ 下，S 参数仿真的最大增益 G_{MAX} 随频率变化曲线图。频率由 2 GHz 升至 6 GHz 时，最大增益由 25 dB 降至 20 dB。表明该尺寸晶体管不仅具有较高的增益，同时在宽带范围内，其增益滚降仅变化 5 dB，为后续宽带匹配提供足额的增益和较小的增益平坦度。

末级输出阻抗匹配非常关键，其阻抗匹配的准确度和匹配损耗都直接关系到功率放大器的输出功率和功率附加效率。首先把末级晶体管在 2~6 GHz 范围内的最佳效率点描绘在史密斯圆图(Smith chart)上，如图 3 的红色曲线。然后根据红色曲线的最高 Q 值，绘制等 Q 线，如图 3 所示蓝线，其 Q 值为 2。

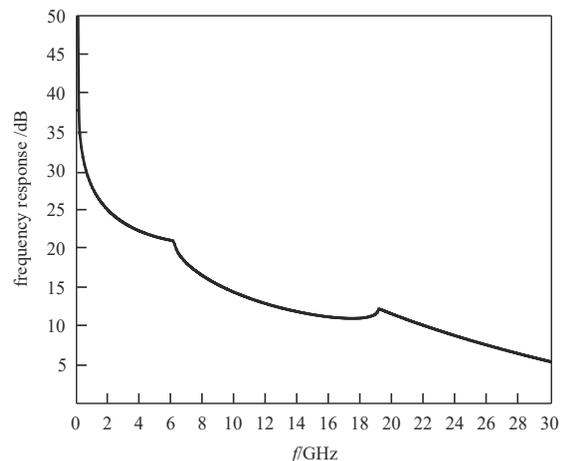


Fig.2 Curve of G_{MAX} vs. frequency on the final stage GaN HEMT device

图 2 GaN HEMT 末级器件 G_{MAX} 随频率变化曲线

采用 LC-CL 宽带匹配, 实现 $50\ \Omega$ 到最佳效率的阻抗变化, 其所用的匹配元件比较少(4个), 匹配损耗降至 0.3~0.5 dB, 提升了放大器的效率和宽带特性。

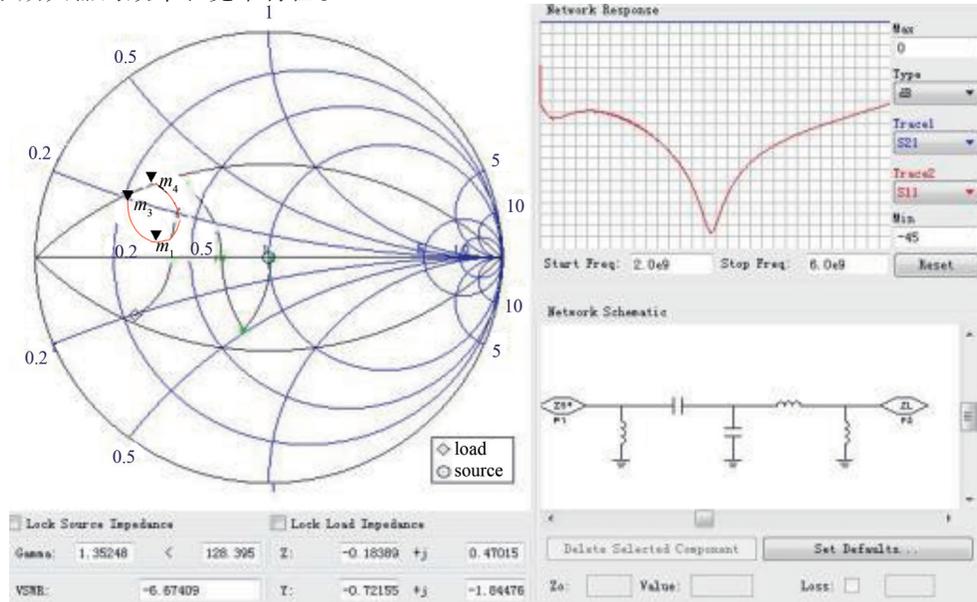


Fig.3 Output equivalent Q match

图3 输出等 Q 匹配

根据本放大器高功率增益要求(大于 30 dB), 结合单级晶体管 G_{MAX} 特性, 采用 3 级放大结构, 三级栅宽比为 1:4:16。通常末级晶体管的输入阻抗比其输出阻抗小一个量级(本放大器的末级输出阻抗为 $11.3+7.8j$, 输入阻抗为 $1.8-5.6j$), 主要原因是输入有较大的栅源寄生电容 C_{GS} , 加之第二级驱动晶体管的输出阻抗比末级输出阻抗高 3~4 倍(栅宽比 1:4), 限制放大器带宽的主要因素是 2、3 级级间匹配电路。图 4 是二、三级之间的等 Q 级间输出匹配圆图。把第三级栅偏置电路和第 2 级漏偏置电路融入级间匹配电路, 由于变比 Q 值越高, 匹配电路损耗越小, 采用了 7 个元件进行了降 Q 匹配, 实现宽带匹配。

图 5 是本功率放大器采用的电路拓扑框图。图中虚线框分别是末级输出匹配和二、三级的级间匹配。一、二级的级间匹配和输入匹配则主要负责提供增益、均衡器和稳定性, 可采用 S 参数进行集总参数优化, 并在一、二级均添加了电阻、电容(resistance、capacitance)均衡器, 不仅实现了增益均衡, 而且提升放大器的稳定性, 其中, U_{g1} 、 U_{g2} 、 U_{g3} 分别为第一、二、三级栅压, U_{d1} 、 U_{d2} 、 U_{d3} 分别为第一、二、三级漏压。

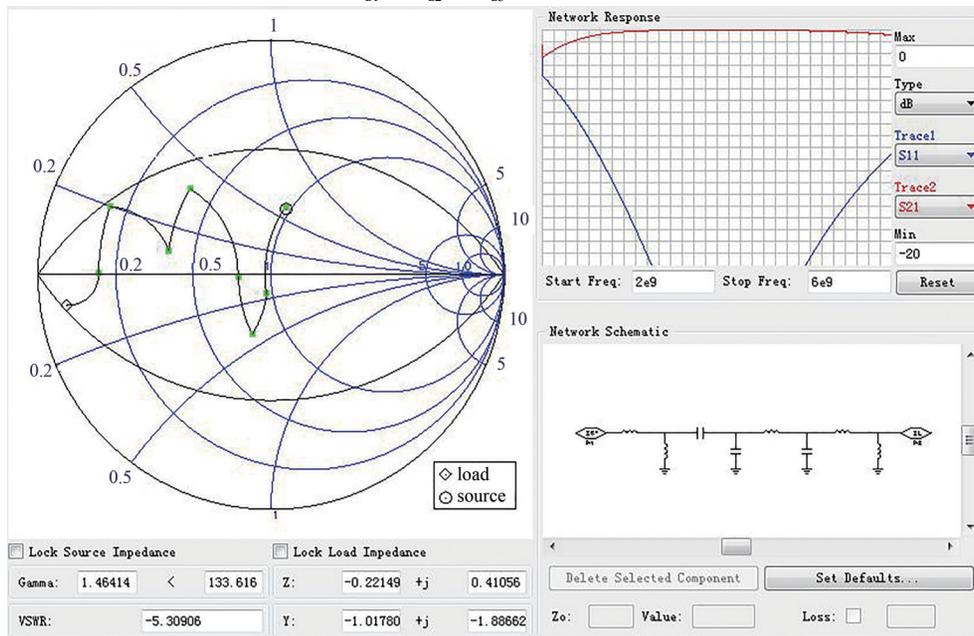


Fig.4 Interstage equivalent Q match of the 2nd stage-the 3rd stage

图4 二、三级的级间等 Q 匹配

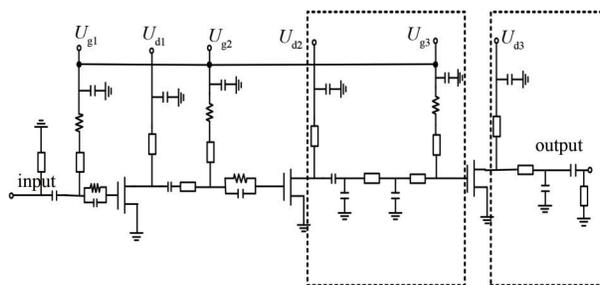


Fig.5 Topological structure of the power amplifier circuit
图5 功率放大器电路的拓扑结构

完成了电路设计后，开展从原理图到芯片版图的电磁场对准和版图寄生参数提取。以有源器件输入输出端为界面，分为末级输出匹配，二、三级级间匹配，一、二级级间匹配和输入匹配。充分考虑它们之间的耦合影响，并最后进行整体芯片电磁场仿真，要求在全温范围、全频带范围、所有偏置状态、外围键合线长度变换下电路均具有良好的稳定性，无自激和杂散。最终实现的2~6 GHz MMIC 芯片电路照片如图6所示，芯片尺寸仅为2.8 mm×2.0 mm。

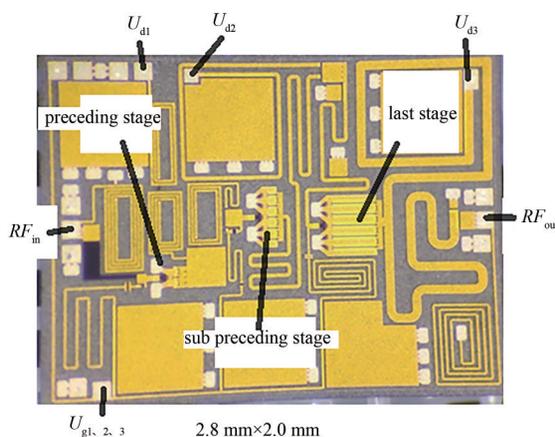


Fig.6 Photo of the MMIC, chip size 2.8 mm×2.0 mm
图6 2~6 GHz MMIC 照片, 尺寸 2.8 mm×2.0 mm

3 测试结果与分析

采用0.25 μm GaN工艺进行流片，将制作完成的功率MMIC放大器烧结在铜铜载体上，栅极、漏极分别有100 pF、1 000 pF的去耦芯片电容，载体外还有47 μF的滤波电容。图7为芯片实物装配图。

3.1 MMIC 放大器小信号特性

按照图7装配好芯片，偏置条件为栅极 $U_G = -2.2$ V、漏级 $U_D = 28$ V，利用矢量网络分析仪测试其 S 参数，设置条件频率1.5~6.5 GHz，频率间隔100 MHz，输入功率-30 dBm。图8为本放大器的 S 参数测试和仿真曲线，实测结果带内 $S_{21} \geq 30$ dB、 $S_{11} \leq -12$ dB、 $S_{22} \leq -10$ dB，具有非常好的增益平坦度(± 1 dB)和良好的输入输出反射系数，并与设计仿真结果吻合度比较高。

3.2 MMIC 放大器大信号特性

采用信号源、功率计和电源等搭建功率放大器大信号测试系统，偏置条件：栅极 $U_G = -2.2$ V，漏级 $U_D = 28$ V，频率范围为2~6 GHz，频率间隔0.1 GHz，输入功率19 dBm。图9为测试和仿真的输出功率、附加效率随频率变化曲线。

本文研制的2~6 GHz功放芯片的输出功率大于43 dBm，功率附加效率大于45%，功率增益大于25 dB，功率增益平坦度小于

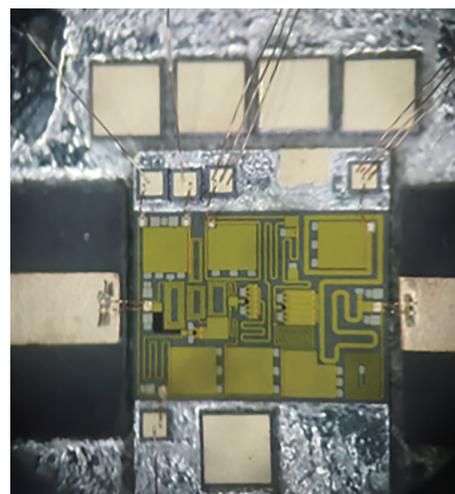


Fig.7 Diagram of the chip assembly
图7 芯片实物装配图

± 0.5 dB, 芯片面积尺寸仅为 5.6 mm^2 。对比测试和仿真结果, 其输出功率、效率和增益吻合较好, 表明设计、工艺制作和测试等均可控, 并具有较好的冗余度, 后续可批产。

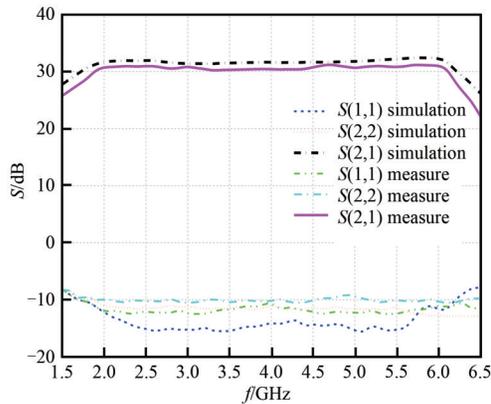


Fig.8 Measurement curves of small signal S parameters for the power amplifier
图8 功率放大器的小信号 S 参数测试曲线

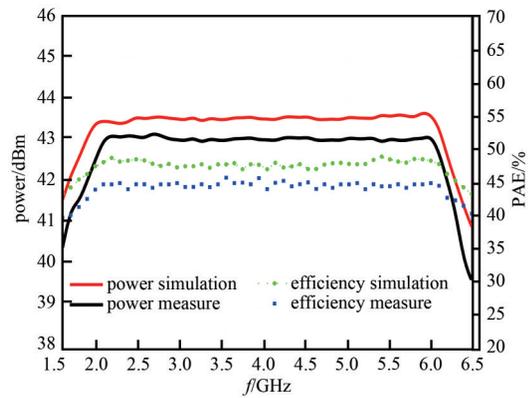


Fig.9 Measured and simulated output power of the power amplifier at $U_{DS}=28 \text{ V}, U_G=-2.2 \text{ V}$
图9 测试和仿真输出功率 ($U_{DS}=28 \text{ V}, U_G=-2.2 \text{ V}$)

3.3 与国内外对比

本文介绍的 MMIC 功率放大器与国内外同类产品在进行输出功率、功率附加效率、增益以及芯片面积等方面进行对比, 见表 2。

表 2 与国内外同类产品的对比

Table2 Comparison with domestic and foreign similar products

institution	frequency/GHz	power/dBm	efficiency/(%)	gain/dB	size/ mm^2
QORVO ^[8]	2.0~6.0	44	35	27	32.0
WOLFSPEED ^[9]	2.5~6.0	44	32	24	17.0
CETC-55 ^[10]	2.0~6.0	43	35	20	14.0
this paper	2.0~6.0	43	45	30	5.6

通过对比, 本文介绍的放大器在效率、增益和芯片尺寸方面具有非常明显的优势, 其后续具有非常广泛的应用。

4 结论

基于 $0.25 \mu\text{m}$ AlGaIn /GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 工艺, 根据有源器件的 G_{MAX} 和输出功率密度, 选择末级功率器件尺寸并确定其最优阻抗; 基于高功率增益采用三级放大器; 采用等 Q 匹配技术, 简化和合并偏置电路和匹配电路, 实现低损耗和宽带阻抗变换; 并通过电磁仿真技术实现紧凑型芯片版图, 其尺寸为 $2.8 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 。芯片的测试结果表明, 偏置条件为漏极电压 $U_D=28 \text{ V}$, 栅极电压 $U_G=-2.2 \text{ V}$, 在 $2\sim 6 \text{ GHz}$ 频率范围内, 功率增益大于 24 dB , 饱和输出功率大于 43 dBm , 功率附加效率大于 45% , 可广泛应用于电子对抗、电子围栏以及雷达通信等领域。

参考文献:

[1] PENGELLY R S, WOOD S M, MILLIGAN J W, et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(6):1764-1783.

[2] MISHRA U K, PARIKH P, WU Y F. AlGaIn/GaN HEMTs—an overview of device operation and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2002,90(6):1022-1031.

[3] KOMIAK J J. GaN HEMT: dominant force in high frequency solid-state power amplifiers[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015,16(3):97-105.

[4] CAMPEL C F I, BALISTRERI A, KAO M Y, et al. GaN takes the lead[J]. IEEE Microwave Magazine, 2012,13(6):44-53.

[5] LEE M P, KIM S, HONG S J, et al. Compact 20 W GaN internally matched power amplifier for 2.5 GHz to 6 GHz jammer systems[J]. Micromachines, 2020,11(4):375-1-375-10.