# 文章编号: 2095-4980(2019)06-1102-05

# 基于 GaN HEMT 技术的 5G 高线性单片集成放大器

张 磊<sup>1</sup>, 蔡道民<sup>2</sup>, 银 军<sup>2</sup>, 谭仁超<sup>2</sup>

(1.海军驻南京地区电子设备军事代表室,江苏南京 210039; 2.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 0.15 μm 氮化镓高电子迁移率晶体管技术(GaN HEMT),研制了一款 5G 毫米波通 信用高线性单片集成功率放大器。通过优化材料结构,使器件在较宽的栅压动态范围内具有较为 平坦的跨导特性;优化设置电路的静态直流工作点,均衡输出功率和线性等指标要求;采用栅宽 比为 1:2:3.2 的三级放大结构保证了电路的增益和功率指标。芯片的在片测试结果表明,静态直流 工作点为最大饱和电流的 30%;在漏极电压 20 V、脉冲 100 μs、占空比 10%条件下,在 24~28 GHz 频率范围内,放大器的小信号增益大于 22 dB,饱和输出功率位于 40~40.5 dBm 范围内,功率附加 效率为 30%~33%;输出功率回退至 34 dBm 时,功率附加效率为 18%,在 26 GHz、双音间隔 100 MHz 条件下,其三阶交调(IMD3)小于-30 dBe;该单片放大器芯片尺寸小于 3.4 mm×3.2 mm。

关键词: 5G; 高电子迁移率晶体管; 功率放大器; 功率附加效率 中图分类号: TN722 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201906.1102

# A high linearity MMIC amplifier for 5G based on GaN HEMT

ZHANG Lei1, CAI Daomin2, YIN Jun2, TAN Renchao2

(1.Naval Representative Office of Electron Equipment Resident in Nanjing Area, Nanjing Jiangsu 210039, China;2.The 13th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

**Abstract:** Based on the 0.15 μm GaN High Electron Mobility Transistor(HEMT) technology, a high linearity power amplifier Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) used for 5G communication is designed and fabricated. By optimizing the structural material, the amplifier has a relatively smooth transconductance characteristic over a wide gate voltage dynamic range. By optimizing the setting of the static DC operating point, the output power and linearity requirements are balanced. The three-stage amplification structure with a gate width ratio of 1:2:3.2 ensures the gain and power index of the circuit. The on-wafer test results of the chip show that the small-signal gain of the MMIC is greater than 22 dB; the saturated output power is 40-40.5 dBm with above 18 dB power gain and a power added efficiency is 30%-33% over the band 24-28 GHz under testing condition of 20 V drain voltage, 100 μs pulse ,10% duty circle; when the output power is back to 34 dBm, its Power Additional Efficiency(PAE) is 18%, and the third-order Intermodulation Distortion(IMD3) is less than -30 dBc under 26 GHz with the 100 MHz frequency offset. The chip size of the MMIC amplifier is less than 3.4 mm×3.2 mm.

Keywords: 5G; High Electron Mobility Transistor; power amplifier; Power Additional Efficiency

因为重要的战略地位和巨大的市场前景,5G通信成为当前通信领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。由于频谱资源和带宽的限制,5G移动通信将采用6GHz以下的低频段和毫米波频段2个频段,其中低频段发展多年,相对成熟<sup>[3-4]</sup>; 而高频段器件和电路成熟度差距较大,有待加大投入进行突破。

当前,5G毫米波射频前端朝2个方向发展:其一朝大多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 面阵、单元小功率输出;另一朝小 MIMO 面阵、单元大功率输出。前者代表有英国 PLextek RFI 公司和美国 Anokiwave 公司,着眼于5G毫米波射频前端集成研究,PLextek RFI 公司采用 GaAs 工艺实现了28 GHz 收发一体的单通道收发芯片<sup>[5]</sup>,Anokiwave 公司实现了5G 的全硅基有源器件和有源天线集成<sup>[6]</sup>,为5G毫米波射频前端 提供集成方案,也是后续大 MIMO 面阵发展的方向之一。后者则是实现单元大功率输出,多以 GaN 基为主流技术,也是5G 射频前端发展的趋势。

收稿日期: 2018-04-29; 修回日期: 2018-08-28

功率放大器是 5G 通信系统射频前端中重要组成部分,其线性度与效率直接决定通信系统射频前端的线性和 效率,因此提高放大器的线性度与效率,成为 5G 通信放大器研究的主要难点。应用于毫米波段功率放大器的众 多材料中,第三代半导体 GaN 具有更宽的禁带宽度和更高的饱和速率等特点而广受青睐。GaN HEMT 器件具有 功率密度大、工作频段宽和频响好等优势,成为通信用大功率器件的重要构成之一。

5G用国外毫米波频段大功率放大器主要制造有美国的QORVO公司<sup>[7]</sup>、AVAGO公司和德国的FHI研究所等, 其中美国QORVO公司推出2款适用于5G基站的高性能功率放大器产品:TGA4030-SM GaAs中等功率放大器<sup>[8]</sup>、 TGP2594 GaN-On-SiC 功率放大器<sup>[9]</sup>。国内的研究机构则主要有中科院、北京大学、中电13 所、中电29 所、中 电55 所和东南大学等<sup>[10]</sup>,还有一批致力于5G研究与应用的公司,如苏州能讯高能半导体等。但国内5G通信用 毫米波放大器发展整体仍落后于国外,有待进一步努力追赶。

本文基于自主 0.15 µm GaN HEMT 制程技术<sup>[11]</sup>,设计了 5G 毫米波频段高效率、高线性功率放大器电路,并 借助 ADS 仿真软件进行电路原理仿真以及电磁场仿真,最终实现芯片制作。通过在片测试表明,5G 毫米波单片 功率放大器在效率、线性等技术指标方面具有较好的特性,并已应用于通信放大链路。

# 1 0.15 μm GaN HEMT 器件特性

第6期

有源器件是实现高性能放大器的基础,尤其是同时满足高 线性和高效率<sup>[12]</sup>的功率放大器。如何提升有源器件的线性是关 键所在。有源器件的非线性主要受以下参量影响:跨导非线性 变化、 $C_{gs}($ 栅-源电容)和 $C_{gd}($ 栅-漏电容)随电压变化不均匀以及 输出电导变化等;效率主要受增益、膝点电压和高工作电压区 的漏电等影响。针对上述参数,通过优化外延层材料和局部工 艺,提升器件的性能,实现如表 1 所示的有源器件和图 1 所示 的较平坦的跨导。表 1 为 0.15 µm GaN HEMT 工艺制作的器件 直流参数,表中 $U_{gs}$ 为栅压, $I_{ds}$ 为饱和漏极电流, $I_{max}$ 为最大饱 和电流; $BU_{gd}$ 为击穿电压, $U_{th}$ 为阈值电压, $I_{gd}$ 为栅漏电流。 图 1 中优化后的跨导曲线,在工作区域内(-2~1 V)具有较平坦 的 $G_m^{[13]}$ 。从表 1 和图 1 得知,该有源器件具有较小的膝点电压 和平坦的跨导,满足毫米波放大器高线性和高效率需求。







Fig.1 G<sub>m</sub> characteristics curves of GaN HEMT device 图 1 U<sub>ds</sub>=20 V 时 GaN HEMT 器件跨导特性曲线

# 2.1 线性和效率分析

2 功率放大器设计和制作

效率和线性是通信用毫米波功放的核心指标,如何提升是关键所在<sup>[14]</sup>。功放的非线性产生原因为:当输入 信号经过功放时,除了基波还会产生其他的新的频率信号,这些新的频率信号会使功放产生非线性失真。如式 (1)所示,当输入信号为 U<sub>in</sub>=Acoso<sub>0</sub>t 时,输出电压可表示为:

$$\begin{aligned} u_{\text{out}} &= k_1 A \cos \omega_0 t + k_2 A^2 \cos^2 \omega_0 t + k_3 A^3 \cos^3 \omega_0 t = k_1 A \cos \omega_0 t + k_2 A^2 (\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_0 t) + k_3 A^3 (\frac{3}{4} \cos \omega_0 t + \frac{1}{4} \cos 3\omega_0 t) = \\ & \frac{1}{2} k_2 A^2 + (k_1 A + \frac{3}{4} k_3 A^3) \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} k_2 A^2 \cos 2\omega_0 t + \frac{1}{4} k_3 A^3 \cos 3\omega_0 t \\ & \pm \vec{\chi}(1) \vec{\eta} \ \ \vec{\chi} \vec{f} \ \ \vec{L} \ , \ \ \vec{E} \ \vec{\chi} \ \vec{h} \ \ \vec{L} \ \ \vec{h} \ \vec{m} \ \vec{E} \ \vec{h} \ . \end{aligned}$$
(1)

$$U = k_1 A + \frac{3}{4} k_3 A^3 \tag{2}$$

当 k<sub>3</sub>>0 时, U>k<sub>1</sub>A,称为增益扩展;当 k<sub>3</sub><0 时,U<k<sub>1</sub>A,称为增益压缩<sup>[15]</sup>。因此,设计线性功放时,可充 分利用前后级有源器件的增益扩张-压缩特性,实现非线性对消,进而提高功放的线性度。功放的效率越高, 其直流功耗就越低,这在通信系统中至关重要。功率附加效率(PAE)定义为:

$$PAE = \frac{P_{\rm o} - P_{\rm in}}{P_{\rm DC}} = \frac{P_{\rm o}}{P_{\rm DC}} (1 - \frac{1}{G})$$
(3)

由式(3)可以看出,功放的功率增益越高,其效率越高。因此在设计功放时,应尽量使功放具有高增益。

1104

针对 5G 毫米波重点候选频段 24~28 GHz 频段和实际应用 需求, 拟达到的毫米波线性功放指标如表 2 所示。

首先,考虑采用何种电路架构。基于表 2 目标,尤其是 功率增益、功率、线性和效率等核心指标,本文采用三级放大 拓扑,并借助朗格电桥合成结构,实现平衡式放大器。该架构 放大器具有可靠性高,输入输出驻波好和稳定性好等诸多优 点,同时在此频段,朗格电桥尺寸较小,易于版图布局。

表 2 5G 毫米波线性放大器设计参数									
Table2 Design parameters of 5G millimeter wave linear PA									
parameters	range	conditions							
<i>f</i> /GHz	24-28								
$P_{\rm sat}/{\rm dBm}$	40	U <sub>DS</sub> =20 V, I <sub>DS</sub> =30% I <sub>MAX</sub>							
PAE/%	30								
gain/dB	18								
IMD3/dBc	-30	$P_{out}=34 \text{ dBm}$							
return loss/dB	-10								

其次,确定末级有源器件尺寸。采用朗格电桥合成结构<sup>[16]</sup>,并考虑朗格插损(0.2~0.3 dB)和匹配损耗以及工 艺波动,单路电路输出功率大约为 38 dBm。图 2 是单元器件尺寸为 6×80 µm 的 load pull(负载牵引)曲线,从中 得到最大输出功率为 33 dBm,最高附加效率超过 50%;且输出功率回退至 27 dBm 时, IMD3 小于-32 dBc,表明 采用 4 个该尺寸的单元功率器件,可满足要求。

接下来根据功率增益,确定放大级数以及前后级有源器件尺寸的比例。通常 GaN HEMT 器件的压缩范围较大,单级 GaN HEMT 器件的饱和功率压缩可高达 3 dB,因此确定电路增益时,需要根据所选单元器件的最大功率增益(MaxGain),同时需要考虑 GaN HEMT 器件的压缩特性。本放大器功率增益需大于 17 dB,故拟用三级放

大拓扑结构实现。末级包括 4 个 6×80 µm 的功率管,功率增益大于 8 dB,4 胞合成则可达到 39 dBm,考虑输出匹配和功率合成损耗, 大约 0.3~0.4 dB,同时考虑工艺偏差和模型变动所带来的误差,给 出 1 dB多的冗余量;驱动级采用 2 个 6×50 µm 的驱动管,提供驱动 功率大于 32 dBm,增益大于 9 dB;前级采用一个 6×50 µm 的驱动 管子,增益大于 10 dB。前级、驱动级和输出级栅宽比为 1:2:3.2。 前级提供足够增益和调节增益平坦度,并充分利用末级增益压缩、 前级增益扩张的特性,即前后级偏置点不同,使其三阶互调系数恰 好正负可以对消,进而提升线性,同时确保效率不受或受影响较 小,驱动级确保足够高的线性输出功率,维持较高的效率。

然后,根据三级有源器件尺寸和数量,确定匹配结构。对于功 放,输出级匹配是核心关键,其损耗对输出功率和效率影响较大, 采用电抗式低通滤波结构,实现低损耗匹配,损耗控制在 0.3 dB 内;输入级采用共轭匹配以达到最大的增益和最小的回波损耗,同 时还需保证实现全域稳定性,采用串联RC和两阶LC匹配;级间匹 配则实现输出级输入阻抗至驱动级输出阻抗的变换,采用LC和CL 带通匹配;输入级和级间匹配还起到增益调节作用,实现放大器在 工作频带内的增益平坦。完成输出级、级间、输入级匹配后,进行 输入和输出朗格功率合成,除了降低插损外,更重要的是实现两路 输出信号的相位一致性。

最后,借助微波电路设计软件,进行电磁场仿真,最终实现的 MMIC电路照片如图 3 所示,芯片尺寸小于 3.4 mm × 3.2 mm。





Fig.3 Photo of the amplifier MMIC circuit 图 3 放大器 MMIC 电路照片

## 3 测试结果和分析

利用矢量网络分析仪、微波探针台和频谱仪等测试仪器,进行 *S* 参数测试、脉冲大信号功率测试、已经回退下线性 IMD3 测试,全面评估该放大器性能。测试频率范围为 24~28 GHz,放大器偏置条件为  $U_{g1}/U_{g2}=-2.0$  V,  $U_{g3}=-1.8$  V,  $U_{ds}=20$  V,  $I_{ds}=30\% I_{max}$ ,其中  $U_{g1},U_{g2},U_{g3}$ 分别为放大器一、二、三级栅偏置电压。图 4~图 6 为相关测试曲线。下面详细分析说明。

图 4 为放大器的小信号测试结果,由图可知,在工作频率(24~28 GHz)范围内, *S*<sub>21</sub>大于 22 dB,增益平坦度 小于 1 dB,输入驻波比(*S*<sub>11</sub>)与输出驻波比(*S*<sub>22</sub>)均小于–15 dB。测试结果基本达到设计要求,输入输出驻波较 小,也间接证明了在该频段范围内采用朗格合成结构,可以显著改善驻波特性,进而提升性能。



张

由图 5 可知,在工作频率(24~28 GHz)范围内,功率 放大器饱和输出功率大于 40 dBm,功率附加效率大于 30%,功率增益大于 18 dB,测试结果超过预期目标,验 证了模型和有源器件的准确性。

图 6 为在 26 GHz 频率下,频率间隔 100 MHz,输出 功率回退下测试的 IMD3 值。在输出功率 34 dBm 时,其 *IMD3*≤-30 dBc,功率附加效率为 18%;采用 64QAM 调 制信号,在调制输出功率为 32 dBm下,测试其误差向量 幅度(Error Vector Magnitude, EVM)指标小于 5%,表明 该放大器具有较好的线性,能够满足通信要求。

从上述测试图可得,本文研制的 24~28 GHz 毫米波 功率单片放大器具有较好的性能。并与国外同类产品进 行对比,见表 3。通过对比分析,本款功率放大器芯片 在功率、效率和线性等核心技术指标方面达到国际主流 水平。



Fig.5 Curves of the measured output power and PAE with the frequency of the amplifier

图 5 放大器实测输出功率和功率附加效率随频率变化曲线



图 6 频偏 100 MHz 下的实测 IMD3

Table3 Contrast analysis of similar products in foreign countries									
	manufacturer/model	<i>f</i> /GHz	$P_{\rm out}/{\rm dBm}$	PAE/%	gain/dB	IMD3/dBc	reference		
	QORVO TGA2595	27-31	39	24	17	-30(34 dBm)	[3]		
	QORVO TGA2594	27-31	37	28	17	-32(28 dBm)	[3]		
	MACOM APN228	27-31	41	27	20				
_	this paper	24-28	41	30	18	-30(34 dBm)			

表3国外同类产品对比分析

#### 4 结论

借助 0.15 μm GaN HEMT 技术,采用平衡式放大结构,通过选择合适的器件尺寸和调节前后级的偏置状态,实现了高线性和高效率 MMIC 放大器,其 *P*<sub>out</sub>≥40 dBm, *PAE*≥30%,输出功率回退至 34 dBm 下的 IMD3 ≤-30 dBc,其 *PAE* 可达 18%;可满足 5G 大容量和大调制带宽的使用要求。该放大器可应用于毫米波无线通信领域。

# 参考文献:

- MOH Y S,YOM I B. A linear GaN high power amplifier MMIC for Ka-band satellite communications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016,26(8):619-621.
- [2] WU S,WANG Y,AL-IMARI M,et al. Frequency and quadrature amplitude modulation for 5G networks[C]// 2016 European Conference on Networks and Communications(EuCNC). Athens,Greece:IEEE, 2016:1-5.
- [3] QORVO[EB/OL]. [2017-05-18] (2017-05-23). http://www.qorvo.com/products/p/opa3503.

# 太赫兹科学与电子信息学报

- [4] RUBIO J M,FANG J,CAMARCHIA V,et al. 3-3.6 GHz wideband GaN Doherty power amplifier exploiting output compensation stages[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(8):2543-2548.
- [5] CORMAN D W. All-silicon active antenna for high performance 5G/SATCOM terminal[J]. Microwave Journal China, 2018(3/4):58-64.
- [6] GLYNN S,SMITH R,DEVLIN L,et al. Design of a single chip front-end module for 28 GHz 5G[J]. Microwave Journal China, 2018(5/6):45-52.
- [7] MACOM[EB/OL]. [2017-05-18] (2017-05-23). http://www.macom.com/products/product-detail/XP1042-QT.
- [8] QORVO[EB/OL]. [2017-05-18] (2017-05-23). http://www.qorvo.com/products/p/TGA2594.
- [9] QORVO[EB/OL]. [2017-05-18] (2017-05-23). http://www.qorvo.com/products/p/TGA2595.
- [10] YU X,TAO H,HONG W. A Ka band 15 W power amplifier MMIC based on GaN HEMT technology[C]// 2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics:Applications and Student Innovation Competition(iWEM). Nanjing, China: IEEE, 2016:1-3. doi:10.1109/iWEM.2016.7505042.
- [11] MISHRA U K,SHEN L,KAZIOR T E,et al. GaN-based RF power devices and amplifiers[J]. Proceedings of the IEEE, 2008,96(2):287-305.
- [12] KOMIAK J J,CHU K,CHAO P C. Decade bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT power amplifier MMICs in DFP and no FP technology[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore,MD,USA:IEEE, 2011:1-4.
- [13] NUNES L,GOMES J,CABRAL R,et al. A new nonlinear model extraction methodology for GaN HEMTs subject to trapping effects[C]// 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix,AZ,USA:IEEE, 2015.
- [14] ALQADAMI A S M,MADHUWANTHA S,FARRELL R,et al. A 5 W high efficiency class ab power amplifier for LTE base station application[C]// 2017 28th Irish Signals and Systems Conference(ISSC). Killarney, Ireland: IEEE, 2017:1-5.
- [15] SHARMA T,SRINIDHI EMBAR R,HOLMES D,et al. Harmonically engineered and efficiency enhanced power amplifier design for P3dB/back-off applications[C]// 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Honololu,HI, USA:IEEE, 2017:789-792.
- [16] LEE J,LEE D H,HONG S. A Doherty power amplifier with a GaN MMIC for femtocell base stations[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014,24(3):194-196.

### 作者简介:



**张** 磊(1982-),男,河南省滑县人,硕士, 工程师,主要研究方向为雷达电子元器件.email: 644566130@qq.com. **蔡道民**(1977-),男,湖南省龙山县人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为半导体功率芯片.

**银 军**(1981-),男,甘肃省古浪县人,高级 工程师,主要研究方向为半导体功率器件.

**谭仁超**(1991-),男,河北省衡水市人,硕士, 工程师,主要研究方向为半导体功率芯片.

### (上接第1101页)

# 作者简介:



**雷一博**(1994-),男,湖北省荆州市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为模拟集成电路设 计.email:598632608@qq.com. **方**健(1969-),男,成都市人,教授,主要 研究方向为新型功率器件、功率集成电路、专用 集成电路.