2020年2月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2020)01-0089-06

X 波段 300 W GaN 功率器件技术

银 军,余若祺,刘 泽,吴家锋,段 雪

(中国电子科技集团公司 第十三研究所,河北 石家庄 050051)

摘 要:介绍一种基于国产氮化镓(GaN)外延材料的 X 波段 300 W GaN 高效率内匹配器件技术。该技术采用大栅宽芯片的大信号有源模型和封装管壳、键合引线、电容等无源模型,开展 X 波段 300 W 内匹配功率器件的设计。采用四胞匹配合成电路,使用 L-C 网络提升器件阻抗,通过 λ/4 阻抗变换网络进行阻抗变换和功率合成,实现阻抗 50 Ω 匹配,功率分配器和匹配电容使用 高 Q 值陶瓷基片实现。仿真实验证明,该器件在 9.5~10.5 GHz 频率内输出功率大于 300 W,功率 增益大于 9 dB,功率附加效率大于 38.9%。同时研究了器件输出功率和功率附加效率随工作电压、脉冲宽度、占空比变化情况。

关键词:氮化镓;内匹配;X波段;功率;高效率 中图分类号:TN722 **文献标志码:**A

doi: 10.11805/TKYDA2018296

X-band 300 W GaN inter-matching Field Effect Transistor

YIN Jun, YU Ruoqi, LIU Ze, WU Jiafeng, DUAN Xue

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: An X-band 300 W inter-matching GaN High Electron Mobility Transistor(HEMT) with high efficiency based on domestic GaN epitaxial material is studied. The design of matched power devices in 300 W X-band is carried out by using the large signal model of large gate width chip, package shell model, bonding wire model, capacitance model and so on. Four-cell matched synthesis circuit is adopted, L-C network is utilized to improve the impedance of the device, and then impedance transformation and power synthesis are carried out through $\lambda/4$ impedance transformation network to achieve impedance matching of 50 Ω . The power splitter and matching capacitance are realized by using high Q ceramic substrates. The internal matching device is developed with output power over 300 W, the gain above 9 dB and Power Adder Efficiency(PAE) greater than 38.9% in frequency from 9.5 to 10.5 GHz. At the same time, the variation of output power and PAE with operating voltage, pulse width and duty cycle is also studied.

Keywords: GaN; inter-matching; X-band; power; high efficiency

随着第3代化合物半导体材料 GaN 的成熟和应用, GaN 微波功率器件在卫星通信、雷达、基站通信等领域 的应用越来越广泛,具有良好的应用前景。GaN 技术是当前半导体科学技术最重要的领域。GaN 器件具有高工 作电压、高功率密度、高输出功率、工作频率高、工作频带宽^[1-2]、抗辐射能力强^[3]的特点; GaN 材料具有带隙 宽度大、高热导率、击穿电场强、饱和电子漂移速度大等诸多特点,同时具有较好的环境适应性,采用 GaN 材 料研制的功率器件也越来越受到人们的关注。

与GaAs器件和Si器件相比,GaN材料具有较高的热导率,GaN基器件在高温环境下工作时具有良好的散热特性和更高的可靠性;同时AlGaN/GaN HFMT器件具有高跨导、高饱和电流^[4]和高截止频率的优良电学性能,因此GaN器件具有更高的栅漏击穿电压和更小的栅源电流(*I*gss),可以在较高电压条件下工作,且器件具有很好的可靠性。随着第3代化合物半导体材料GaN的成熟和应用,GaN功率器件的优势还在于具有更高的输出功率和更小的尺寸。在相同封装体积下,GaN器件具有GaAs器件5~10倍的输出功率,可以实现相同性能下的低成本或相同成本下的高性能^[5]。

GaN微波大功率器件在雷达、卫星通信和数据传输链中的作用越来越明显,当前系统对固态功率放大器 (Solid State Power Amplifier, SSPA)的性能、体积和质量的要求越来越高,因此,性能优良的GaN内匹配功率管 的研发需求非常迫切。在9.0~10.0 GHz频段内,国外SUMITOMO公司2018年10月推出最新的X波段内匹配器 件,其最大输出功率达到340 W;在8.5~9.6 GHz频段的内匹配功率器件,其最大输出功率125 W。国内只有 9.5~10.5 GHz频段200 W内匹配功率器件的报道^[6]。采用GaN器件研制的固态功率放大器/功率模块,其输出功率 在400 W左右。

本文基于GaN外延材料,采用GaN高压工艺技术,成功研制出X波段300 W GaN内匹配功率器件,其工作带 宽为1 GHz,输出功率最小为55.08 dBm(322 W),最大为55.2 dBm(331.1 W);功率增益(Gain)最小为9.08 dB,最 大为9.2 dB;功率附加效率(PAE)大于38.9%,最大为40.2%;漏极效率(η)大于44.4%,最大为45.88%。

1 内匹配电路的设计与实现

1.1 芯片结构

研制的GaN大栅宽功率芯片具有6.5~7 W/mm的功率密度,四胞大栅宽芯片具有最小输出功率为300 W以上的能力,同时对器件的性能进行综合考虑和优化。器件的工作电压为45.0 V、脉宽(τ)为200 μs、占空比(Duty ratio,D)为10%。考虑器件的散热和效率,对器件的单指栅长、源漏间距和总栅宽进行优化设计,采用多子胞结构的GaN芯片^[7],提高器件的性能指标和散热^[8-9]。为满足器件在45.0 V电压下正常工作,芯片加工采用高压GaN工艺,芯片击穿电压为180 V以上。大栅宽芯片结构见图1,芯片外形尺寸为3.0 mm×0.85 mm。



图 1 GaN HEMT 芯片结构示意图



1.2 内匹配电路设计

采用内匹配技术使管芯及各部分之间在信号幅度和相位上获得平衡,提高管芯的输入/输出阻抗的实部,对 参与内匹配的管芯进行功率分配和功率合成。在器件的输入输出端分别设计匹配网络,对其端口阻抗进行变 换,抵消其虚部阻抗,提高其实部阻抗到定值,再通过λ/4阻抗变换线匹配至50 Ω^[10-11]。图2是四胞内匹配电路 拓扑结构图。采用高压大栅宽芯片的大信号模型、键合引线模型、封装管壳模型,结合内匹配技术对电路进行 整体的优化设计,然后对单个匹配元件进行电磁场仿真,最终实现器件的输入输出阻抗的50 Ω匹配。阻抗匹配 对于实现最优的增益、功率和PAE起到非常关键的作用^[12]。用于匹配的键合引线、电容和功分器分别进行电磁 场仿真,用于器件性能的整体仿真^[13]。

内匹配电路中功分器和功合器采用介电常数为10.1、厚度为380 μm的氧化铝陶瓷基片实现,电阻采用薄膜 电阻,匹配电容采用介电常数为80的钛酸锆陶瓷基片实现,电感采用键合金丝实现。如图2所示,L为电感,C 为接地电容,有L和C共同组成L-C-L的T型低通滤波网络。图3是键合引线、电容、功分器阻抗变换网络的3D示 意图。



Fig.3 3D diagram of impedance transformation network 图 3 阻抗变换网络的 3D 示意图

1.3 内匹配电路的实现

内匹配电路采用四端口网络,端口之间增加平衡电阻, 保证各端口之间的隔离度。功率分配器和功率合成器主图形 旁边都带有匹配调整用的小块,作用为阻抗微调、消除接头 和拐角效应,克服寄生效应和因为信号馈送(幅度和相位)不 均匀引起的振荡^[14]。在不同介电常数和厚度的陶瓷基片上 制作栅漏匹配电容,以减小匹配电路的面积。内匹配电路中 的电感采用高Q值的Φ38 μm的金丝实现。通过烧结工艺,采 用熔点为290℃的金锡焊料把管芯和匹配元件烧结在高热导 率的金属陶瓷外壳内,并用键合工艺实现金丝、金带键合。 图4为四胞内匹配的X波段GaN内匹配功率管全貌图。



Fig.4 Internal view of the four-cell matched circuit of X-band 图4 四胞匹配的X波段GaN内匹配功率管全貌图

1.4 器件热设计

为保证宽脉宽、高占空比条件下的可靠性,需要最大限度地降低器件地沟道温度,确保芯片具有良好的散 热能力。通过优化GaN芯片的纵向结构,包括SiC衬底厚度、栅栅间距、单指栅宽等参数,在兼顾功率、效率等 电性能指标的前提下保证器件的可靠性。

封装管壳的材料选择高导热系数的Co-Mo-Cu材料制作。Co-Mo-Cu材料热导率高,为195 W/(m·K),膨胀系数为7.0~8.0,与Al₂O₃基板(热膨胀系数为6.7)、GaN功率芯片(热膨胀系数为5.6)的热膨胀系数相当,热匹配性好。因此铜钼铜做为外壳的热沉同时又具有良好的散热能力。

2 测试结果与分析

测试条件为: U_{DS}=45.0 V,U_{GS}=-2.0 V,脉宽(r)200 μs,占空比(D)10%,输入功率P_{in}为46.0 dBm。测试9.5~ 10.5 GHz频带内器件的输出功率、功率增益、功率附加效率、漏极效率等指标。在9.5~10.5 GHz频带内,最小输出功率为55.08 dBm(322 W),最大输出功率为55.2 dBm(331.1 W);最小功率增益为9.08 dB,最大功率增益为 9.2 dB;最大功率附加效率为40.2%,最小功率附加效率为38.9%;最大漏极效率为45.88%,最小漏极效率为 44.4%。四胞管芯内匹配功率管微波测试结果如图5所示。



图 5 9.5~10.5 GHz 频带内输出功率、功率增益随频率变化曲线图

在10.0 GHz频点测试了器件的输出功率、功率附加效率(PAE)和功率增益随输入功率的变化情况,分析器件的输出特性与输入功率的变化情况,初步探索器件的线性特性。器件的输入功率P_{in}从34.0 dBm至47.0 dBm,器件输出功率、功率增益、功率附加效率随输入功率的变化曲线如图6所示。

研究在脉宽为200 µs、占空比为10%条件下,器件输出功率随工作电压的变化情况。在相同的输入功率P_{in}为47.0 dBm的情况下,工作电压由33.0 V提升到45.0 V,器件的输出功率增加了1.36 dB,输出功率由251.8 W增加至344.35 W。图7为在工作电压U_{DS}分别为33.0 V,36.0 V,39.0 V,42.0 V,45.0 V, 10.0 GHz频率下,器件的输出功率、功率附加效率随输入功率的变化曲线图。从图7(a)中可以看出,提高器件的工作电压,器件的输出功率增大。随着输入功率的增加,不同工作电压下,输出功率有显著的变化。从图7(b)中可以看出,提高



器件的工作电压,在相同输入功率下,器件的功率附加效率和功率效率随电压的提高而降低,当器件达到饱和 状态时,器件的功率附加效率和功率效率随电压的增加变化趋势很小。

研究在脉冲宽度、占空比变化情况下,器件输出功率和功率附加效率的变化情况。在工作电压为45.0 V, 输入功率为46.0 dBm,占空比为10%的条件下,工作脉宽为200 ns,500 ns,1 ms器件的输出功率、功率附加效率的 变化情况。图8为工作脉宽为100 ns,500 ns,1 ms,在9.5~10.5 GHz频率下,器件的输出功率、功率附加效率随输 入功率的变化曲线图。从图8中可以看出,随着脉冲宽度变大,器件的输出功率变小,功率附加效率变小。这主 要由器件自身发热造成。在相同占空比条件下,器件工作的脉宽越宽,器件自身的发热温度就越高,造成器件 的输出功率、功率增益和功率附加效率下降。

研究工作电压为45.0 V,输入功率为46.0 dBm,工作脉宽为200 ns条件下,占空比分别为25%,10%,1%时器件的输出功率、功率附加效率的变化情况。图9为在工作占空比25%,10%,1%,在9.5~10.5 GHz频率下,器件的输出功率、功率附加效率随着输入功率的变化曲线图。从图中可以看出,随着脉冲宽度变大,器件的输出功率变小,功率增益变小,功率附加效率变小,这主要由器件自身发热造成。在相同脉宽条件下,器件工作的占空

Fig.8 Power,PAE as functions of D with different τ@9.5-10.5 GHz

 图 8 相同占空比、不同脉宽下输出功率、功率附加效率随频率变化曲线图



比越大,器件自身的发热温度就越高,造成器件的输出功率和功率增益下降。

Fig.9 Power,PAE as a function of r with different D@9.5-10.5 GHz 图 9 相同脉宽、不同占空比下输出功率、功率附加效率随频率变化曲线图

随着温度升高,器件性能指标下降的主要原因为:器件二维电子气(2DEG)迁移率明显下降,其密度也有小幅度下降,从而引起器件饱和电流的下降和沟道方块电阻的增加。而沟道方块电阻的增加使得器件源/漏串联电阻增大,进一步导致器件膝点电压的增大。欧姆接触电阻的增大也是器件膝点电压增大的另一个因素^[15]。

3 结论

本文研制的9.5~10.5 GHz的内匹配功率管,在工作电压为45.0 V,工作脉宽为200 µs,占空比为10%条件下,输出功率大于300 W,功率增益大于9.0 dB,功率附加效率大于38.9%;封装形式采用高热导率的铜钼铜材料的金属陶瓷外壳。研究了器件的输出功率随工作电压、工作脉宽、占空比的变化情况,为后续提高器件的输出功率和效率、宽脉宽大占空比工作的GaN功率器件的可靠性及技术改进提供了参考依据。采用本方法设计的GaN内匹配功率器件可以实现更大输出功率,将具有非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 郑新. 三代半导体功率器件的特点与应用分析[J]. 现代雷达, 2008,30(7):10-17. (ZHENG Xin. Characteristics and application analysis of semiconductor power devices for three generations[J]. Modern Radar, 2008,30(7):10-17.)
- [2] 郝跃,张金风,张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京:科学出版社, 2013. (HAO Yue,ZHANG Jinfeng, ZHANG Jincheng. Wide band gap nitride semiconductor materials and electronic devices[M]. Beijing:Science Press, 2013.)
- [3] 曹梦逸. 高效率和大功率氮化镓半导体放大器研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (CAO Mengyi. Research on high efficiency high power GaN semiconductor amplifier[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [4] HAO Y,YANG L,MA X,et al. High-performance microwave gate-recessed AlGaN/AlN/GaN MOS-HEMT with 73% poweradded efficiency[J]. Electron Device Letter, 2011,32(5):626-628.
- [5] KOLIAS N. MMIC pioneers: a historical review of mmic development at Raytheon[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Boston, USA:[s.n.], 2009:1405-1408.
- [6] 唐世军,顾黎明,陈韬,等. X波段200W GaN 内匹配功率管[C]// 中国电子学会, 2017:2596-2599. (TANG Shijun, GU Liming, CHEN Tao, et al. X-band 200 W GaN internal matched power device[C]// Chinese Institute of Electronics Millimeter Wave, Hangzhou: [s.n.], 2017.)
- [7] 李晶,倪涛,吴景峰,等. 高增益S波段小型化200 W功率模块研制技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):135-138. (LI Jing,NI Tao,WU Jingfeng,et al. High gain S-band miniaturized 200 W power amplifier module fabrication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):135-138.) doi:10.11805/TKYDA201801.0135.
- [8] DONALD A N. 半导体物理与器件[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (DONALD A N. Semiconductor physics and devices: basic principles[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [9] 王毅. X波段GaN基内匹配功率放大器设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (WANG Yi. Design and implementation of X-band GaN-based internally-matched power amplifier[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [10] 余振坤,刘登宝. S波段宽带GaN芯片高功率放大器的应用研究[J]. 微波学报, 2011,27(2):68-71. (YU Zhenkun,LIU Dengbao. Application research of S band broadband GaN chip high power amplifier[J]. Journal of Microwave, 2011,27(2):68-71.)

- [11] 斛彦生,余若祺,银军,等. S波段GaN高效率内匹配功率放大器的设计与实现[J]. 通讯世界, 2017(12):25-26. (HU Yansheng, YU Ruoqi, YIN Jun, et al. Design and implementation of s-band GaN high efficiency internal matching power amplifier[J]. Communication World, 2017(12):25-26.)
- [12] BAHL I J. 射频与微波晶体管放大器基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (BAHL I J. Fundamentals of RF and microwave transistor amplifiers[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [13] 刘帧,吴洪江,斛彦生,等.S波段大功率、高效率 GaN HEMT 器件研究[J]. 微纳电子技术, 2013,50(2):78-81. (LIU Zhen, WU Hongjiang, HU Yansheng, et al. Research on S-band high power and high efficiency GaN HEMT devices[J]. Micronano Electronic Technology, 2013,50(2):78-81.)
- [14] 银军,武继斌,张志国,等. L波段高效率内匹配GaN HEMT[J]. 半导体技术, 2014(7):512-515. (YIN Jun, WU Jibing, ZHANG Zhiguo, et al. In the L wave band high efficiency matches GaN HEMT[J]. Semiconductor Technology, 2014(7):512-515.)
- [15] 窦丙飞,严继进,吴贻伟,等. 雷达T/R组件中GaN器件可靠性影响[J]. 电子测量, 2017(15):57-59. (DOU Bingfei,YAN Jijin,WU Yiwei, et al. Reliability impact of GaN devices in radar T/R module[J]. Electronic Measurement, 2017(15):57-59.)

(上接第88页)

- [16] ZHANG Yunjun, XU Guozhong. Bearings-only target motion analysis via instrumental variable estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010,58(11):5523-5533. doi:10.1109/TSP.2010.2064770.
- [17] HO K C,CHAN Y T. An asymptotically unbiased estimator for bearings-only and Doppler-bearing target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006,54(3):809-822. doi:10.1109/TSP.2005.861776.
- [18] GU G. A novel power-bearing approach and asymptotically optimum estimator for target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011,59(3):912-922. doi:10.1109/CDC.2010.5717753.
- [19] LE-CADRE J P,JAETFFRET C. On the convergence of iterative methods for bearings-only tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002,35(3):801-818. doi:10.1109/7.784053.
- [20] KAPLAN L M,LE Q. On exploiting propagation delays for passive target localization using bearings-only measurements[J]. Journal of the Franklin Institute, 2005,342(2):193-211. doi:10.1016/j.jfranklin.2004.10.003.
- [21] SABET M T,FATHI A R,DANIALI H R Mohammadi. Optimal design of the own ship maneuver in the bearing-only target motion analysis problem using a heuristically supervised extended Kalman filter[J]. Ocean Engineering, 2016(123):146– 153. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.07.028.
- [22] LUO Ji'an, ZHANG Xiaoping, WAGN Zhi, et al. On the accuracy of passive source localization using acoustic sensor array networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6):1795-1809. doi:10.1109/JSEN.2017.2657646.