

文章编号: 2095-4980(2018)01-0135-04

高增益 S 波段小型化 200 W 功率模块研制技术

李 晶, 倪 涛, 吴景峰, 赵夕彬, 王 毅

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 采用多级射频放大电路以及高压脉冲调制技术, 实现了 S 波段高增益小型化 200 W 功率模块的研制。驱动放大电路采用 GaAs 功率单片进行功率合成; 末级放大电路依托栅长(0.5 μm) GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)芯片, 选取多子胞结构来改善热分布, 通过内匹配技术设计完成了双胞总栅宽 24 mm GaN 芯片的匹配网络, 并设计高压脉冲调制电路提供电源, 成功研制出了小型化的 S 波段 200 W 内匹配 GaN 功率模块。测试得出该模块实现了在输入功率 10 dBm, 栅极电压 -5 V, 漏极电压 32 V, TTL 调制信号输入条件下, 输出频率在 3.1~3.5 GHz 处, 输出功率大于 200 W, 功率附加效率(PAE)大于 55%。模块实际尺寸为 2.4 mm $\times$ 38 mm $\times$ 5.5 mm。

关键词: GaN; 功率放大模块; 高压脉冲调制技术; 小型化; 阻抗匹配

中图分类号: TN722

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0135

High gain S-band miniaturized 200 W power amplifier module fabrication

LI Jing, NI Tao, WU Jingfeng, ZHAO Xibin, WANG Yi

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

Abstract: By using multistage RF amplifier circuit and the high voltage pulse modulation technology, the high gain S-band miniaturized 200 W GaN power amplifier module is successfully fabricated. The drive amplifier circuit adopts GaAs power chip for power combining. The last stage amplifier circuit is based on the gate-length(0.5 μm) GaN High Electron Mobility Transistor(HEMT) chip, and the heat distribution is improved by means of the multi-sub-cell structure. Through the internal matching, the matching network of two cells of 24 mm gate width GaN device is successfully designed, so is the high voltage pulse modulation circuit. The test results show that under the input power of 10 dBm, the gate voltage of -5 V, the drain voltage of 32 V, and TTL modulated signal, the output frequency is in the range of 3.1~3.5 GHz, the output power is above 200 W, and the Power Additional Efficiency (PAE) is more than 55%. The module size is 2.4 mm $\times$ 38 mm $\times$ 5.5 mm.

Keywords: GaN; power amplifier module; high voltage pulse modulation technology; miniaturization; impedance matching

近年来, 以宽禁带半导体为主的第 3 代半导体技术飞速发展。作为第 3 代半导体代表的 GaN 器件具有禁带宽度大、击穿场强高、电子迁移率高、耐高温等优点^[1], 能够满足对高功率、高效率^[2]等的需求。GaN 器件相比于 GaAs 器件以及 Si 器件, 具有抗辐照能力强^[3]、功率密度高、具有高输出电流^[4]和高饱和输出功率、高可靠性^[5]等优势。GaN 器件的发展为小型化高效率、高功率的功率模块的研制提供了芯片选择和技术支撑。在现代科技以轻量化、高功率、高效率为发展趋势的大背景^[6]下, GaN 功率模块具有明显优势, 因此成为工程应用的首选。

2010 年 7 月, 唐世军等报道了 5.2~5.8 GHz GaN 微波功率放大模块, 工作电压 28 V 下饱和输出功率达到了 14 W, 功率增益 20 dB, 功率附加效率为 46%^[7]。2011 年 1 月, 周洲等发表了 C 波段 GaN HEMT 微波功率器件内匹配模块在连续波条件下(直流偏置电压为 $U_{ds}=25\text{ V}$, $U_{gs}=-3.0\text{ V}$), 内匹配模块在 5.5 GHz 频率下最大输出功率为 40 dBm, 最大效率为 30%^[8]。2014 年 9 月, 程光伟等发表了 X 波段固态功率放大模块, 最终研制出工作在 9.3~9.4 GHz 频段内的模块, 脉冲输出功率大于 30 W^[9]。

查阅相关文献可以发现, 国内外对于大功率器件的研究偏重于内匹配功率管, 相比之下, 配套高压脉冲调制技术

的内匹配功率放大模块的研究发展较为缓慢。在小型化逐渐发展为重要指标的现阶段,研制出小型化大功率的功率器件模块满足现阶段模块发展的需求^[10]。因此,本文研制了 S 波段 GaN 功率放大模块,工作在 3.1~3.5 GHz,工作脉宽 100 μ s, 占空比 10%, $U_{gs}=-5.0$ V, $U_{ds}=32$ V, $P_{out}>200$ W, $PAE>55\%$ 。模块体积为 2.4 mm $\times$ 38 mm $\times$ 5.5 mm。

1 电路结构设计

本文以设计 S 波段 200 W GaN 功率模块为目标,在该电路结构设计中需要考虑达成大功率输出及高增益目标以及为达成以上目标所带来的稳定性问题。

1.1 功率放大模块电路原理分析

考虑到本文研制的 S 波段功率放大模块以大功率输出和高增益的设计目标,拟采用多级放大电路进行实现。

在实现方法上,通过前级放大电路驱动末级功率放大电路,设计合适的偏置电路,选择合适的芯片来设计高压脉冲调制电路,为前级电路和末级电路提供合适脉宽的栅级和漏极电压。

1.2 模块前级射频放大电路设计

本文设计的 S 波段模块射频电路由前级功率放大电路和末级功率放大电路 2 部分构成。为使前级和末级电路 2 级之间达到良好的匹配状态,有良好的驻波,选用 2 个 GaAs 单片和 2 个 GaAs Lange 耦合器进行前级驱动放大器的合成,拟在 3.1~3.5 GHz, 10 dBm 输入功率下得到 38 dBm 的输出功率。将前级电路输出阻抗匹配到 50 Ω , 使前级功放在 10 dBm 的输入下能够达到 37 dBm 的输出功率。通过对相应 GaAs 功率单片指标的分析,最终选取了一款合适的芯片,该芯片能够在 $U_{gs}=-2.0$ V, $U_{ds}=32$ V, $P_{in}=10$ dBm, 脉宽 100 μ s, 占空比 10% 的条件下得到 $P_{out}=38$ dBm 的输出功率。该单片通过 Lange 耦合器进行合成,能够达到预计的前级设计目标。

1.3 模块末级射频放大电路设计

对于该功率模块末级电路的设计,选取 GaN 内匹配功率放大结构。选取合适栅宽的 GaN 器件对于设计该大功率、高效率的 GaN 内匹配功率放大电路来说尤为重要。

考虑该模块的脉宽及占空比设计,以及要在大功率下可靠工作,需要解决芯片的热集中问题,选取多子胞结构的 GaN 芯片,该结构能够有效消除芯片的热集中问题,能够较好地改善芯片的散热^[11]。根据功率及效率需求,最终选取了一款 12 胞,单个子胞区有 8 个栅指,单指栅宽 250 μ m 的芯片。芯片结构示意图如图 1 所示。

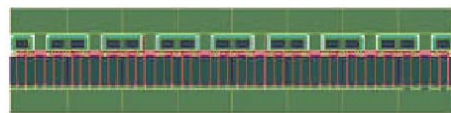


Fig.1 Architecture of GaN HEMT chip
图 1 GaN HEMT 芯片结构示意图

在确定所用 GaN 芯片之后,通过仿真软件对该芯片进行阻抗牵引,得到该芯片在本模块所需条件下的源阻抗和负载阻抗,通过阻抗匹配技术及几种常用阻抗匹配网络,并利用史密斯圆图进行阻抗匹配。阻抗变换和匹配在功率放大器设计中具有非常重要的地位。在工作频带内,通过阻抗匹配技术,将晶体管的输入输出阻抗均变换到 50 Ω ,对于内匹配功率放大器来说尤为重要^[12]。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^[13],因此,选取合适的匹配网络对于电路的设计有很大帮助。在选取匹配网络时,一般考虑带宽、频率响应、电路复杂性以及是否易于实现这几项要素。在阻抗匹配网络中常见的有 L 型网络、T 型和 π 型网络,以及 $\lambda/4$ 波长变换线^[14]。

选取合适的匹配网络进行阻抗匹配,得到末级放大电路的原理框图^[15]。图 2 是通过阻抗匹配得到的末级放大电路原理图。通过对电原理图进行建模、仿真及优化,确定最终的匹配电路结构。图 3 所示是该模块射频电路的仿真结果。

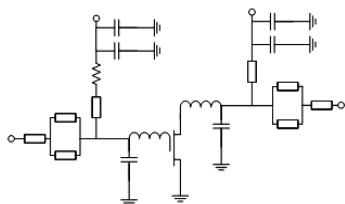


Fig.2 Schematic diagram of the amplifier circuit of the last stage
图 2 末级放大电路原理图

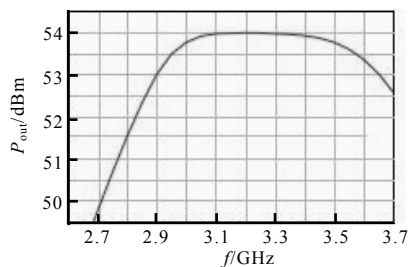


Fig.3. Simulation result of the last stage circuit
图 3 仿真结果

1.4 高压脉冲调制电源部分设计

本文研制的S波段模块由于需自带偏置及调制电源,需要合理设计电源部分,为射频电路部分提供可靠的供电。电源部分的设计依托于稳压芯片和调制芯片,通过稳压芯片分别给出前级电路和末级电路的栅压;通过调制芯片将输入的外加电压进行调制以驱动P沟道金属氧化物半导体场效应晶体管(Positive-channel Metal Oxide Semiconductor, PMOS)给出所需脉宽及占空比的两级射频电路的调制漏压。

为保证该功率模块的可靠性,在电源电路设计时需选择稳压芯片、调制芯片及PMOS管,根据所选芯片的推荐使用电路选择合适的电容电阻进行滤波和隔离,以达到能够输出过冲小、无干扰的栅漏电压的目标。

2 功率模块的实现及测试

2.1 电路设计的实现

通过第2节的设计及仿真,将末级电路输入输出匹配电路和匹配电容进行制版设计,基于中国电子科技集团第十三研究所的工艺线将其制作到材料和厚度的陶瓷基片上,并设计相应尺寸的前级、末级载体进行装配。同时,对于设计好的偏置及调制电路进行合理布版,并选择合适工艺制成PCB印制板。

2.2 模块测试

完成该S波段功率放大模块的装配,并设计合适的测试盒进行测试。测试实物图如图4所示。

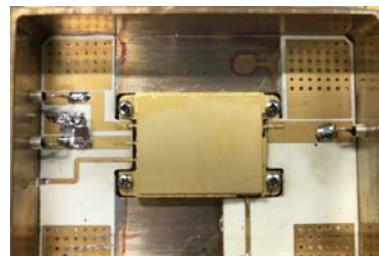


Fig.4 Picture of the real module
图4 模块实物测试图

3 测试结果及可靠性分析

3.1 模块的测试结果

对该S波段功率放大模块进行测试,栅极电压 $U_{gs}=-5\text{ V}$,漏极电压 $U_{ds}=32\text{ V}$,脉冲电源逻辑门电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)提供脉冲宽度为 $100\text{ }\mu\text{s}$,占空比为10%的信号,输入功率为 10 dBm 。得到该S波段功率放大模块的射频测试结果如图5所示。

从该功率放大模块输出功率随频率的变化曲线可以看出,该模块在 $3.1\sim 3.5\text{ GHz}$ 的频带内的实测输出功率达到了 200 W 的设计目标,在 3.3 GHz 时,输出功率达到最大值 245 W ,功率平坦度 $<0.5\text{ dB}$ 。实际测试结果与仿真结果相对比,结果相差约 30 W 。从该模块的附加效率随频率的变化曲线,可以看出该模块在 $3.1\sim 3.5\text{ GHz}$ 的频带内的实测PAE达到了55%的设计目标,全频带内约在60%。

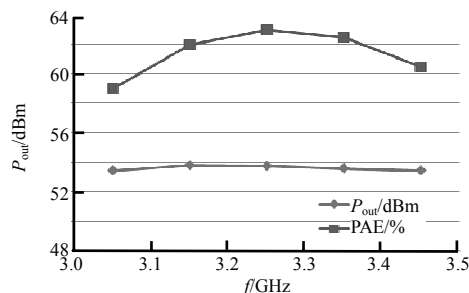


Fig.5 Test results of the module
图5 模块测试结果

3.2 模块的可靠性分析

为了验证该S波段功率放大模块的可靠性,将该功率放大模块放入高低温箱,先将低温温度设定为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度达到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后并保温 30 min ,之后加电压和TTL信号,注入输入功率,待功率放大模块达到平衡状态之后,进行测试。然后升至常温并烘干,进行高温测试,低温温度设定为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度达到 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保温 30 min ,之后加电压和TTL信号,注入输入功率,待功率放大模块达到平衡状态之后,进行测试。图6为该S波段功率放大模块在低温下和高温下的测试结果。

4 结论

本文介绍了GaN内匹配功率放大模块的设计和研制方法,通过设计合理的模块结构分布,选择合适的射频结构,电源部分通过稳压芯片、调制芯片和MOS管输出所需的栅极电压和漏极调制电压。前级选择稳定性较好的GaAs单片进行功率合成作为射频部分的驱动,末级选取合

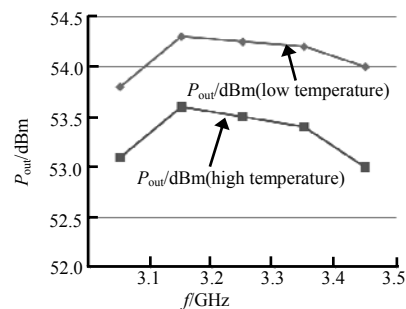


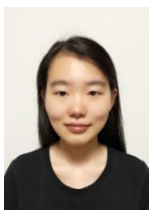
Fig.6 High-low temperature test results of the module
图6 模块高低温测试结果

适的 GaN 器件, 进行负载牵引得到 GaN 器件最佳的输入输出阻抗, 再参照史密斯圆图, 通过电容、微带线等将阻抗匹配至 $50\ \Omega$, 用电磁场三维仿真。最终实现了在 S 波段达到输出功率 200 W, 附加效率大于 55% 的小型化功率模块。此方法可推广至更高输出功率模块的设计, 具有非常广阔的发展前景和工程应用前景。

参考文献:

- [1] 郝跃, 张金凤, 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.)
- [2] 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.)
- [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 AlGaIn/GaN MOS-HEMT with 73% power-added efficiency[J]. Electron Device Letter, 2011, 32(5): 626–628.
- [5] HAGEN J B. 射频电子学—电路与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (HAGEN J B. RF electronics-circuits and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [6] SECHI F, BUJATTI M. 微波固态高功率放大器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. (SECHI F, BUJATTI M. Solid-state microwave high-power amplifiers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.)
- [7] 唐世军, 徐永刚, 陈堂胜, 等. 高功率 GaN 微波功率放大模块及其应用[J]. 半导体技术, 2010, 35(Z): 7–9. (TANG Shijun, XU Yonggang, CHEN Tangsheng, et al. Applications of high power GaN microwave power amplifier modules[J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(Z): 7–9.)
- [8] 周洲. GaN HEMT 微波功率器件的内匹配模块研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011. (ZHOU Zhou. Internal matching circuits' design and manufacture of GaN HEMT[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2011.)
- [9] 程光伟, 闫燕勤. X 波段 30W 固态功率放大模块的设计[J]. 计算技术与自动化, 2014(3): 69–72. (CHENG Guangwei, YAN Yanqin. Design for 30W X-band solid state power amplifier module[J]. Computing Technology and Automation, 2014(3): 69–72.)
- [10] REINHOLD L, PAVEL B. 射频电路设计—理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (REINHOLD L, PAVEL B. RF circuit design: theory and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [11] 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.)
- [12] JOSEF Lutz. 功率半导体器件[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013. (JOSEF Lutz. Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.)
- [13] RAAB F H, ASBECK P. Power amplifiers and transmitters for RF and microwave[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 814–826.
- [14] 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.)
- [15] 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.)

作者简介:



李 晶(1993–), 女, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波功率器件及模块, email: 13106522708@163.com.

倪 涛(1982–), 男, 兰州市人, 高级工程师, 主要研究方向为微波功率器件及模块.

吴景峰(1966–), 男, 石家庄市人, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路、电磁场理论、无线通信技术.

赵夕彬(1968–), 男, 石家庄市人, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路等.

王 毅(1968–), 男, 石家庄市人, 高级工程师, 主要研究方向为微波功率器件及模块.