

装备通用质量特性及寿命评估

基于 GaN 技术的大功率 T/R 组件 可靠性设计与分析

彭祥飞, 江浩, 邓林

(中国电子科技集团公司第 29 研究所, 成都 610036)

摘要: 结合 T/R 组件的工作原理, 对影响大功率 T/R 组件可靠性的关键技术进行了设计与分析。通过与现有的基于 GaAs 技术的 T/R 组件设计电路对比分析, 阐述了基于 GaN 技术的大功率、高可靠性 T/R 组件的电路设计方法。

关键词: T/R 组件; GaN 芯片; 高可靠性; 电路设计; 热设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.018

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)12-0115-04

Reliable Design and Analysis of High Power T/R Module Based on GaN Technology

PENG Xiang-fei, JIANG Hao, DENG Lin

(No. 29 Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: Combined with the working principle of T/R module, the key technologies affecting the reliability of high-power T/R module were designed and analyzed. Compared with the existing T/R module design circuit based on GaAs technology, the circuit design method of high power and high reliability T/R module based on GaN technology was described.

KEY WORDS: T/R module; GaN MMIC; high reliability; circuit design; thermal design

T/R 组件是集模拟电路、数字电路、大功率微波电路和小信号微波电路于一体的综合电子组件。T/R 组件的主要作用是完成发射信号的高功率放大以及接收信号的低噪声放大。由于 T/R 组件具有发射功率大、功能复杂等特点, 它作为有源相控阵干扰机的核心组件被广泛使用。T/R 组件一般安装在天线阵面上, 根据实际匹配的天线单元数量, 单型有源相控阵干扰装备中使用的 T/R 组件可达上万个, 成本达整个设备的 60% 以上。T/R 组件的功能、性能及可靠性直接关系到装备使用效能。上述因素对 T/R 组件的使用提出了苛刻要求, 即在紧凑结构空间约束条件下, T/R 组

件应具备长时间、高可靠稳定工作。

伴随着半导体技术的发展, 尤其是半导体微波功率器件的技术更新换代, T/R 组件的发展经历三个阶段。

1) 第一代是基于硅器件的 T/R 组件。该时期 T/R 组件中, Si 管功率器件输出功率可达一百多瓦。但是, Si 管功率器件不能连续波工作, 且工作频率较低, 最高工作频率只在 S 波段, 制约了 T/R 组件的应用^[1-2]。

2) 第二代 T/R 组件, 也是目前广泛使用的 T/R 组件, 以 GaAs 为代表的宽禁带微波功率器件作为其功率放大的核心器件。受限于 GaAs 材料的低热导率、低击穿场强等特性, GaAs 单管输出功率仅几瓦, 难

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-09-04

Received: 2020-07-07; Revised: 2020-09-04

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目 (JSZL2016210B001)

Fund: Technical Basic Research Project of National Defense Science and Technology Bureau (JSZL2016210B001)

作者简介: 彭祥飞 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为有源相控阵技术。

Biography: PENG Xiang-fei (1979—), Male, Master, Engineer, Senior engineer, Research focus: active phased array technology.

于实现 T/R 组件大功率输出, 制约了 T/R 组件在固态大功率的应用发展^[3-4]。

3) 第三代 T/R 组件, 以 GaN 为代表的宽禁带微波功率器件作为其功率放大的核心器件。得益于 GaN 材料拥有高热导率、高击穿电场、宽禁带、高电子饱和速率、高电子迁移率、较强抗辐照能力、较好化学稳定性等特性, GaN 功率器件单位毫米栅宽输出功率可达几十瓦^[5-6], 远高于 GaAs 微波功率器件输出功率, 使得基于 GaN 技术的 T/R 组件已成为当前固态大功率发展的热点。

文中基于 T/R 组件工作原理和 GaN 大功率微波器件的实际特点, 从大功率 T/R 组件电路设计、热设计等方面对高可靠性大功率 T/R 组件进行设计与分析。

1 GaN 大功率 T/R 组件电路设计

T/R 组件主要由大功率开关、限幅器、低噪声放大器、衰减器、开关、移相器、驱动放大器及功率放大器等功能电路组成, 其原理如图 1 所示。其中大功率微波电路是实现 T/R 组件大功率信号放大的核心电路。同时, 大功率微波电路通过电流大, 是 T/R 组件主要的高热耗单元, 其输出功率的稳定性和可靠性直接决定了产品质量。大功率微波电路的设计实现与功率合成方式、功率器件类型密切相关, 同时该电路具有大功率、高热耗等特点, 使得电路设计制造存在诸多难点, 这使得 T/R 组件可靠性面临严峻考验。

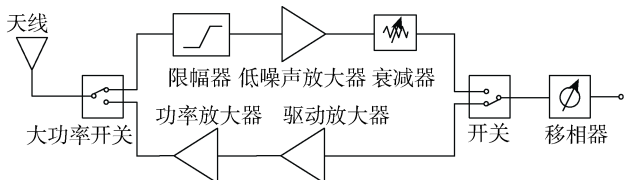


图 1 T/R 组件工作原理
Fig.1 Working principle of T/R modules

基于 GaAs 器件的 T/R 组件大功率微波电路原理如图 2 所示。受限于单管 GaAs 功率器件输出功率不足, 基于 GaAs 器件的 T/R 组件大功率微波电路通常采用多级多路信号合成的方式实现大功率信号放大, 以实现电子战装备作战能力生成。具体地, 在电路结构上, 基于 GaAs 器件的 T/R 组件大功率微波电路由两级功率合成单元组成, 每级功率合成由两个功率合成网络和多个功率放大管并联组成。多级多路合成方式使得该电路呈现出结构复杂、元器件数量多、加工制造工序多等特点, 导致 T/R 组件在设计阶段难以保证固有可靠性的同时, 降低工艺可靠性水平。

基于 GaN 器件大功率微波电路主要由驱动放大器和 GaN 功率放大器组成, 原理如图 3 所示^[7-9]。相较于基于 GaAs 的大功率微波电路, 基于 GaN 的大功率微波电路中单管 GaN 功率器件即可实现多管 GaAs 功率器件的合成功率, 在实现结构形式大幅简化的同

时, 输出功率进一步提高。GaAs T/R 组件输出功率测试曲线如图 4 所示, 输出功率均值为 39 dBm。GaN T/R 组件输出功率测试曲线如图 5 所示, 输出功率均值达 42 dBm, 组件全频段输出功率提高 3 dB。另一方面, 由于 T/R 组件发射电路中芯片、芯片键合焊点及芯片间键合金丝金带数量的减少, 降低了各级输出匹配电路、输入匹配电路的复杂度, 显著提升了 T/R 组件发射通道幅相的一致性, 有效地解决了大信号非线性条件下 T/R 组件发射通道工作难以保证良好幅相一致性的问题^[10-12]。

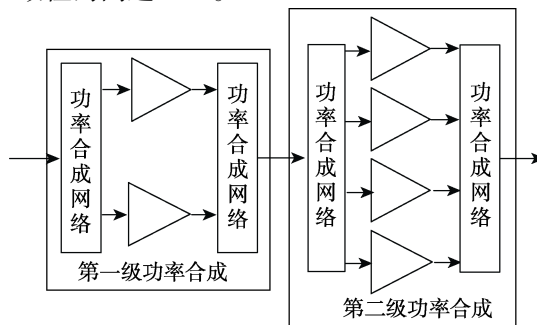


图 2 GaAs 发射电路原理
Fig.2 Principle of GaAs transmit circuit

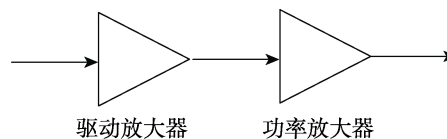


图 3 GaN 发射电路原理
Fig.3 Principle of GaN transmit circuit

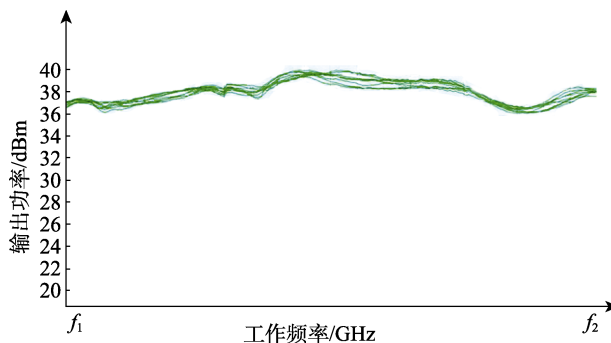


图 4 GaAs T/R 组件输出功率
Fig.4 Output power of GaAs T/R module

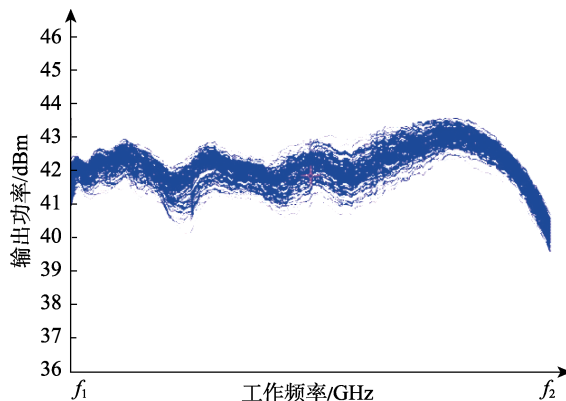


图 5 GaN T/R 组件输出功率
Fig.5 Output power of GaN T/R module

在可靠性基本理论中,产品的基本可靠性模型是用来评估产品组成单元故障引起的维修与保障模型。基本可靠性模型是一个串联模型,其模型可以描述为:

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

式中: λ 为产品的总失效率; λ_i 为产品组成各单元的失效率。由此可见,元器件数量越多,失效率越高,可靠性会降低^[13-15]。因此,在满足组件功能性能的前提下,尽量减少元器件数量是提高产品可靠性的方法之一。

基于 GaN 和 GaAs 的 T/R 组件大功率微波电路元器件使用情况见表 1。基于 GaN 的 T/R 组件单发射通道中,大功率微波电路元器件数量由 GaAs 电路中的 42 个减至 10 个。在微电路芯片减少的同时,显著减少电容使用数量,实现 T/R 组件可靠性设计的大幅提升。在实际电子战设备应用中, T/R 组件发射通道可达上百个,由此可带来客观元器件总数量减少,因此在设计源头实现电子战装备可靠性能力的提升。

表 1 大功率发射电路元器件使用情况

Tab.1 Usage of high-power transmitting circuit components

	基于 GaAs 的大功率 微波电路	基于 GaN 的大功率 微波电路
微电路/个	4	1
电容/个	38	9
总计/个	42	10

2 GaN 大功率 T/R 组件热设计

在大功率 T/R 组件的工程应用中,热一直是制约电子设备发挥效能的瓶颈问题,已成为影响 T/R 组件可靠性的主要因素。虽然 T/R 组件在经历 GaAs 微波单片革新后,其可靠性得以较大提高,但是这种半导体器件的功率转换效率低,其热耗使得芯片局部工作环境变得尤为恶劣。芯片的高热密度引起 T/R 组件不同封装集成材料间因热膨胀系数失配出现裂纹或变形,且不同的温度梯度、不一致材料膨胀系数将影响产品的稳定工作^[16-19]。根据 Arrhenius 模型^[20],高温将加速电子产品的性能退化,并减少电子元器件的使用寿命。半导体器件寿命与温度的关系如图 6 所示,可以看出,芯片温度是制约 T/R 组件可靠性设计的重要因素。因此,在大功率 T/R 组件研制时,不仅应关注产品功能性能符合性,还应着重设计 T/R 组件功率转换效率、减少热耗、控制芯片温度,以此提高产品的可靠性。

在实际工程上,基于 GaAs 技术的 T/R 组件若实现 10 W 功率输出、大于 30 dB 增益放大的需求,需采用两级功率合成实现。第一级功率合成采用两片 0.5 W 驱动放大器合成 1 W 功率输出。第二级功率合成采用四片 4 W 功率放大器合成 10 W 功率输出。整个 T/R 组件热耗达 90 W,发射功率转换效率为 10%。

相比而言,10 GHz 频段以下, GaN 芯片热流密度已达到 400 W/cm²,而 GaAs 芯片尚不足 200 W/cm²。基于 GaN 技术的 T/R 组件,若实现 20 W 功率输出、大于 30 dB 增益的放大需求,驱动放大器和功率放大器分别只需单管便能实现。整个 T/R 组件热耗为 75 W,发射功率转换效率达 21%,T/R 组件发射效率提升 10%。试验表明, GaN 器件工作结温达 225 °C,而 GaAs 器件工作结温不超 175 °C。因此, GaN 器件可以承受更高的工作温度。

综上所述,基于 GaN 技术的 T/R 组件已突破现有 T/R 组件高热耗、低转换效率等短板,并借助 GaN 器件更高的工作结温实现大功率 T/R 组件可靠性设计。

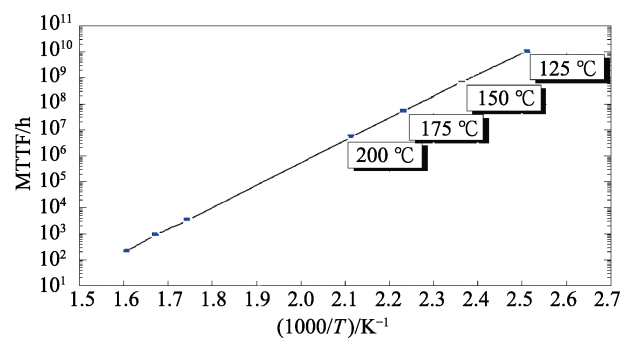


图 6 器件寿命与温度的关系

Fig.6 Relationship between device life and temperature

3 结语

文中结合 T/R 组件的工作原理,对影响大功率 T/R 组件可靠性的关键技术进行设计与分析。通过与现有的基于 GaAs 技术的 T/R 组件设计电路对比分析,阐述了基于 GaN 技术的大功率、高可靠性 T/R 组件的电路设计方法。同时,结合 GaN 器件的特性,分析基于 GaN 技术 T/R 组件热设计的改善与提高。相较于现有的 GaAs T/R 组件,基于 GaN 技术的 T/R 组件在功能性能方面表现优异,同时其可靠性水平也显著提升,将进一步推动相关电子战装备的高质量发展。

参考文献:

- [1] 潘宏菽,李亮,陈昊,等. S 波段 10 W SiC MESFET 的研制[J]. 半导体技术, 2007(11): 940-942.
PAN Hong-shu, LI Liang, CHEN Hao, et al. Development of S-Band SiC MESFET with 10 W Output[J]. Semiconductor Technology, 2007(11): 940-942.
- [2] 张福琼. SiC 微波半导体在 T/R 组件中的应用前景[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008(6): 631-634.
ZHANG Fu-qiong. The Foreground of Application of SiC Microwave Semiconductor in T/R Modules[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008(6): 631-634.
- [3] 张务永,王翠卿,王生国,等. 宽带 GaAs MMIC 功率放

- 大器的设计[J]. 河北省科学院学报, 2005(3): 19-22.
ZHANG Wu-yong, WANG Cui-qing, WANG Sheng-guo, et al. Design of Broad-band GaAs MMIC Power Amplifier[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2005(3): 19-22.
- [4] INDER J B. Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifier[M]. Hoken, New Jeersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] 毕克允, 李松法. 宽禁带半导体器件的发展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006(1): 6-10.
BI Ke-yun, LI Song-fa. The Development of Wide Band Gap Semiconductor Device[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2006(1): 6-10.
- [6] 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(7): 10-17.
ZHENG Xin. Characteristics and Application Analysis of Semiconductor Power Devices for Three Generations[J]. Modern Radar, 2008(7): 10-17.
- [7] SCHUN P, SLEDZIK H, REBER R, et al. X-band T/R-module Front-End Based on GaN MMICs[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2009(4): 387-394.
- [8] BETTIDI A, CETRONIO A, CICOLANI M, et al. X-band T/R-module in State-of-the-art GaN Technology[C]// 6th European Radar Conference Proceedings. Rome, Italy: IEEE, 2009.
- [9] MASUDA S, YAMADA M, KAMADA Y, et al. GaN Singlechip Transceiver Frontend MMIC for X-band Applications[C]// 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada, : IEEE, 2012.
- [10] 陈晓青. 大功率 T/R 组件的研究与设计[J]. 电子与封装, 2012(8): 19-22.
CHEN Xiao-qing. Investigation and Design of High Power T/R Module[J]. Electronics & Packaging, 2012(8): 19-22.
- [11] 任春江, 彭龙新, 戈勤, 等. Ku 波段 GaN 一片式收发组件芯片[J]. 固体电子学研究进展, 2017, 37(1): 1-5.
REN Chun-jiang, PENG Long-xin, GE Qin, et al. GaN Single-chip T/R MMIC for Ku-band Applications[J]. Research & Progress of SSE, 2017, 37(1): 1-5.
- [12] 陈炽, 郝跃, 冯辉, 等. X 波段单级氮化镓固态放大器[J]. 西安电子科技大学学报, 2006(6): 1039-1043.
CHEN Chi, HAO Yue, FENG Hui, et al. X Band Single Stage GaN Solid-state Power Amplifier[J]. Journal of Xi-dian University, 2009(6): 1039-1043.
- [13] 曹心宽. 舰载电子武器系统可靠性评估方法[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 74-77.
CAO Xin-kuan. Reliability Evaluation Method of Carrier Based Electronic Weapon System[J]. Equipment Environment Engineering, 2006, 3(4): 74-77.
- [14] 魏永杰, 王晓红. 系统级可靠性试验技术探讨[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 71-74.
WEI Yong-jie, WANG Xiao-hong. Research of Reliability Test Technology for Complex System[J]. Equipment Environment Engineering, 2007, 4(5): 71-74.
- [15] 邓林, 邓明, 张成伟, 等. 有源相控阵可靠性分析及设计[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 21-37.
DENG Lin, DENG Ming, ZHANG Cheng-wei, et al. Reliable Analysis and Design for Active Phased Array[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(2): 21-37.
- [16] 宋云. T/R 组件的散热设计[J]. 电子机械工程, 2003(5): 5-7.
SONG Yun. Thermal Design of Heat Sink for T/R Module[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2003(5): 5-7.
- [17] 童震松, 沈卓身, 张毓隽. 高导热金刚石/玻璃复合材料的制备和性能研究[J]. 电子元件与材料, 2009(11): 31-36.
TONG Zhen-song, SHEN Zhuo-shen, ZHANG Yu-juan. Preparation and Properties of Diamond/Glass Composite Materials with High Thermal Conductivity[J]. Electronic Components and Materials, 2009(11): 31-36..
- [18] 张梁娟, 钱吉裕, 孔祥举, 等. 基于裸芯片封装的金刚石/铜复合材料基板性能研究[J]. 电子机械工程, 2011(6): 28-30.
ZHANG Liang-juan, QIAN Ji-yu, KONG Xiang-ju, et al. Research on Performance of Diamond/Copper Composite Substrate Based on Bare Die Packaging[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011(6): 28-30.
- [19] 赵妍冰, 刘克明, 陆德平, 等. 金刚石/铜电子封装复合材料的研究状况及展望[J]. 热处理技术与装备, 2013(6): 31-36.
ZHAO Yan-bing, LIU Ke-ming, LU De-ping, et al. Research Status and Prospect of CD/Cu Composite for Electronic Packaging Material[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013(6): 31-36.
- [20] WAYNE N. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis[M]. New York: Wiley, Chichester, 1990.