

基于 ANSYS 的射频功率放大器热特性研究

李 军¹, 尹希雷¹, 代法亮¹, 朱佳垌¹, 刘春秀¹, 应祥岳², 刘太君¹

(1. 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211; 2. 浙江工商职业技术学院, 浙江宁波 315012)

摘 要: 论文首先仿真设计了一款射频功率放大器,接着构建了该射频功率放大器热特性分析模型,并采用有限元方法分析了该射频功率放大器热特性,然后研究了增加过孔以及不同覆铜层厚度、环境温度、耗散功率四种情况对射频功率放大器的温度、热应力和热形变的影响,最后基于上述分析结论加工制作并测试了该款射频功率放大器.在 3.3GHz~3.6GHz 范围内其输出功率不低于 39.2dBm,增益不低于 12dB,功率附加效率为 62.6%~69%;在环境温度为 21℃下,运用红外温度扫描仪进行测试,该款射频功率放大器最高温度达到 90.0℃,测试结果与仿真分析结果相近.论文的研究为未来射频功率放大器的设计及制作提供了重要指导.

关键词: 射频功率放大器;热分析;温度;热应力;热形变

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)12-2487-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.12.026

The Research on Thermal Characteristics of RF Power Amplifier Based on ANSYS

LI Jun¹, YIN Xi-lei¹, DAI Fa-liang¹, ZHU Jia-yang¹, LIU Chun-xiu¹, YING Xiang-yue², LIU Tai-jun¹

(1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo, Zhejiang 315012, China)

Abstract: At first, a design and simulation of a RF power amplifier is presented. Then, the thermal characteristics analysis model of the RF power amplifier is built and the thermal characteristics of the RF power amplifier is analyzed by using the finite element method. After that the effects of increasing the through hole and different copper coating thickness, environmental temperature and dissipative power on the temperature, thermal stress and thermal deformation of the RF power amplifier are studied. Based on the above analysis, the RF power amplifier is fabricated and measured at last. In the frequency range of 3.3GHz to 3.6GHz, power added efficiency is from 62.6% to 69% with output power greater than 39.2dBm and gain larger than 12dB. When the ambient temperature is 21℃, the maximum temperature of the RF power amplifier reaches 90.0℃, and the test results are close to the simulation analysis results. The research of this paper provides important guidance for the design and manufacture of RF power amplifier in the future.

Key words: RF power amplifier; thermal analysis; temperature; thermal stress; thermal deformation

1 引言

随着通信系统的飞速发展,尤其是如今 5G 技术的大力推广,系统对于射频功率放大器(射频功放)性能的要求越来越高.作为通信系统的重要组成部分之一,射频功放消耗了大部分的系统功率,这将导致热量积聚并引起功放温度的变化^[1-3].由于射频功放结构中包含不同的材料,每种材料属性各不相同,温度的变化将会在射频功放结构中产生热应力和热形变,这些都

影响射频功放的整体性能,严重时还可能对功放的结构产生损坏^[4,5].

近年来,美国 CFDRC 公司 M. Turowski 等人采用有限体积元数值方法,提出了一种针对射频电路的温度分析的计算方法,通过将电路密集的互联转化成等效热传导块的方法,使得该方法计算速度很快,计算精度较高;北京大学周润德等人采用解耦迭代法实现了静态电热耦合模拟程序 Etsim,采用多层热阻模型将电路简化为一多层结构构建其数学模型,绘制其版图结构

收稿日期:2019-05-13;修回日期:2020-07-15;责任编辑:梅志强

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61571251);宁波市自然科学基金(No. 2018A610024);宁波市教育科学规划重点课题(No. 2019YZD004)

求解出电路稳态工作温度和该温度下的电路特性;林倩等人通过一系列的实验对射频功率放大器的温度可靠性进行了测试和分析,旨在通过环境温度测试及温度突变测试来研究温度对射频功率放大器直流特性、 S 参数、输出特性和可靠性的影响.实验结果表明,环境温度的升高和突变会引起射频功率放大器性能发生显著退化^[6-9].由此可见,国内外学者对电路温度特性分析展开了相关研究,但针对射频功放热特性系统性分析的研究不多.然而射频功放的热应力及热形变问题亦相当重要,因此针对射频功放开展温度、热应力和热形变的系统性分析具有一定的现实意义.

本论文采用 ADS 软件仿真设计了一款射频功放,并基于 ANSYS 软件对射频功放热特性进行系统性的分析,量化了射频功放的温度、热应力及热形变.分析了加入适量过孔对射频功放热特性的影响,并且进一步研究了在不同覆铜层厚度、不同环境温度和不同耗散功率下射频功放的温度、热应力及热形变分布情况,最后基于分析结论制作并测试了该款射频功率放大器.

2 热分析理论

热应力及热形变的产生主要跟温度的分布、不同材料的热膨胀系数相关,从分析热特性的角度考虑,只要物体的力学响应不会影响到该物体的热性能参数及热边界条件,即可将物体的热分析问题分解为温度分析和结构静力学分析^[10].

在稳态系统中,热传导方程可以用下述方程来表示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = 0 \quad (1)$$

式中, T 是温度, Q 是内部热生成率, ρ 是密度. k_x, k_y, k_z 是 x, y, z 方向的导热系数.

对式(1)化简可以写为:

$$\mathbf{KT} = \mathbf{Q} \quad (2)$$

其中, \mathbf{T} 为传导矩阵,包括导热系数、对流系数等. \mathbf{T} 为节点温度向量; \mathbf{Q} 为节点热流率向量.

热形变分量和热应力分量之间的关系可以用以下公式来描述:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别为 x, y, z 三个方面的热形变, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 三个方向的热应力, E 为材料的弹性模量, μ 为泊松比^[11].

3 射频功放仿真设计

随着微电子技术的不断进步,以 GaN 为代表的第三代半导体工艺因其具有高电子饱和漂移速度、高击穿电压、更高的功率密度等优点.因此,本文中射频功放的设计选用 Cree 公司的型号为 CGH40010 的 GaN 晶体管.仿真设计结果如图 1 所示,在 3.3 ~ 3.6GHz 频带内小信号增益大于 13dB;输出功率大于 41.3dBm,最高可达 42.3dBm;功率附加效率大于 67%,最高可达 71.3%.

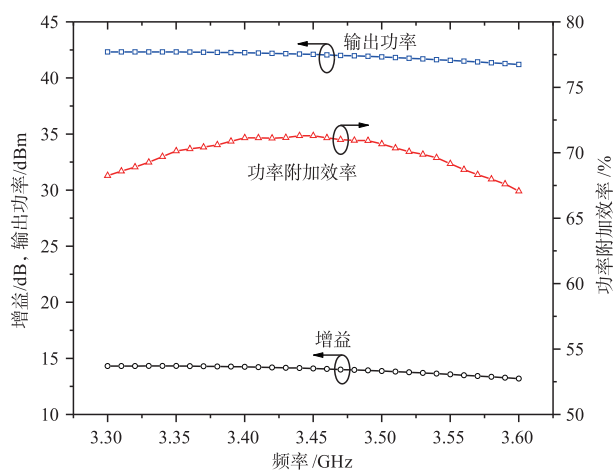


图1 射频功放仿真结果图

4 射频功放热特性分析

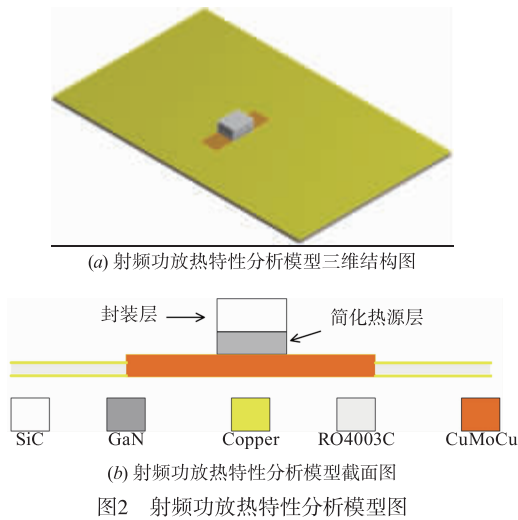
4.1 射频功放三维有限元分析模型

文中分析对象为上述仿真设计的射频功放,其主要包含 GaN 晶体管及高频板材.晶体管的实体模型来源于 Cree 公司生产的 CGH40010 晶体管,将其简化为三层,即封装层尺寸为 5.2mm × 4.2mm × 1.8mm,热源层尺寸为 5.2mm × 4.2mm × 0.7mm,热沉层尺寸为 14.2mm × 4.2mm × 2mm.高频板材选用 RO4003C 板材,其尺寸为 65mm × 40mm × 0.8mm.射频功放热特性分析模型的三维结构及截面图如图 2 所示,模型中各材料的弹性模量、热膨胀系数、泊松比以及热传导系数如表 1 所示^[12,13].

表 1 材料参数

材料	导热系数 W/(m·K)	弹性模量 (Pa)	热膨胀系数 /(°C)	泊松比
Copper	393	1.1×10^{11}	17.5×10^{-5}	0.34
CuMoCu	410	1.0×10^{11}	16×10^{-5}	0.3
GaN	130	1.81×10^{11}	5.45×10^{-6}	0.352
RO4003C	0.71	3.5×10^{11}	14×10^{-5}	0.4
SiC	175	3.45×10^{11}	7.5×10^{-6}	0.29

本文采用美国 Ansys 公司推出的多物理场有限元分析软件 ANSYS 对射频功放进行热特性分析.该软件



涉及结构、热、计算流体力学、声、电磁等学科,能够有效地进行各种场的线性和非线性计算及多种物理场相互影响的耦合分析,其核心热分析模块可以完成建立分析模型、求解计算、可视化后处理、分析报告等功能。射频功放分析模型中的各材料均假设为线性弹性材料,有限元软件后处理中的“Von Mises Stress”为范米塞斯等效应力^[14],本文分析中的热应力、热形变均为范米塞斯等效应力应变。在有限元分析中,环境温度设置为22℃,选取耗散功率作为载荷。所有与空气的接触面添加对流换热条件,且在自然对流的情况下选择空气对流系数 $h = 10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,在射频功放板材底部及四周施加全约束条件^[15-16]。

4.2 射频功放热特性分析

图1的仿真结果表明,射频功放在大信号工作条件下耗散功率约为3W~5W,并选取最大耗散功率作为载荷条件,此时射频功放分析模型中简化热源层的热流密度大小约为 $0.327\text{W}/\text{mm}^3$ 。射频功放温度、热应力及热形变分布结果如图3所示。从图3(a)可以看出,等温度线以热源处为中心呈环状向四周递减,热源处最高温度为95.5℃,射频功放四周最低温度为44.1℃,两者温差接近51.4℃。从图3(b)可以看出,最大界面热应力约为119.3MPa。从图3(c)可以看出,最大热形变约为 $4.77 \times 10^{-3}\text{mm}$,其主要分布在射频功放板材中部。

4.3 添加过孔对射频功放热特性分析结果的影响

为了减弱射频功放板材的变形情况,并且综合考虑微带线布局情况,本文分别增加过直径为1.1mm和0.4mm的过孔,其中孔径为0.4mm过孔间间距为1mm,孔壁覆铜厚度为2oz。设置过孔的目的主要有两个:其一是增加射频功放纵向的热通量;其二是在实际应用中会在1.1mm过孔处增加螺丝来固定射频功放。局部增加过孔后射频功放的温度、热应力及热形变分布如图4所示。从图4(a)可以看出,增加过孔对射频功放最高温度的影响较小,相较图3(a)下降了0.87℃。对比图4(c)和图3(c)可以发现,增加过孔区域的热形变程度有一定的减弱,并且射频功放的最大的热变形改善了约 $4.1 \times 10^{-3}\text{mm}$ 。上述结果表明,增加环形过孔后对射频功放热形变程度有一定的改善作用。

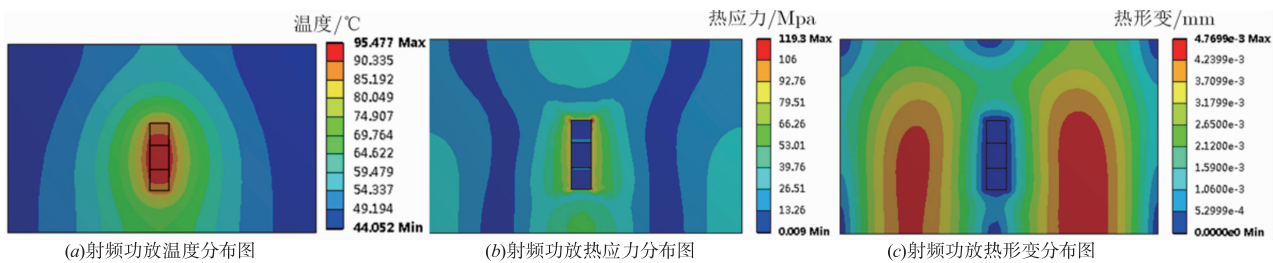


图3 射频功放温度、热应力及热形变分布结果图

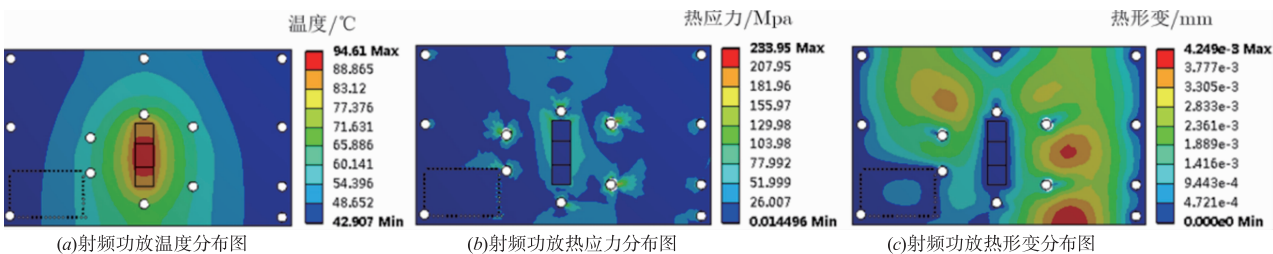


图4 增加过孔后射频功放温度、热应力及热形变分布结果图

4.4 不同覆铜层厚度对射频功放热特性分析结果的影响

在载荷及边界条件不变的情况下,由于铜的导热

系数远大于RO4003C绝缘板层材料的导热系数,射频功放板材绝缘板层厚度的减少量对于射频功放温度、热应力和热形变的影响很小。本文分析了不同覆铜层

厚度对射频功放的温度、热应力及热形变的影响,结果如表2所示.从表中可以看出覆铜层的厚度对射频功放温度、热应力及热形变的分布影响较大.当覆铜层厚度由0.5oz变为1.5oz时,射频功放温度下降25.9℃;热应力减小了约180MPa;热形变减小了 3.26×10^{-3} mm.当覆铜层厚度由1.5oz变为2.5oz时,射频功放温度下降约6.47℃;热应力减小了约47.83MPa;热形变减小了 0.89×10^{-3} mm.由此可见,随着覆铜层厚度的增加射频功放最高温度、最大热应力和最大热形变有明显的下降,但是下降幅度随着覆铜层厚度越厚趋势越缓.在实际应用中,射频功放覆铜层厚度一般不超过2oz.因此,在工艺和成本允许的情况下,可使覆铜层厚度尽可能靠近2oz,综合考虑本文中的射频功放选择覆铜层厚度为2oz.

表2 不同覆铜层厚度下射频功放温度、热应力及热形变的仿真结果

铜厚(oz)	温度(℃)	热应力(MPa)	热形变(mm)	温度差(℃)
0.5	94.003	312.55	5.74×10^{-3}	60.736
1	75.449	185.41	3.47×10^{-3}	37.279
1.5	68.132	131.92	2.48×10^{-3}	27.644
2	64.153	102.58	1.94×10^{-3}	22.329
2.5	61.622	84.086	1.59×10^{-3}	18.933
3	59.14	72.717	1.31×10^{-3}	16.072
3.5	57.879	63.511	1.14×10^{-3}	14.424
4	56.751	53.84	1.01×10^{-3}	12.935

4.5 不同环境温度对射频功放热特性分析结果的影响

在分析不同环境温度对射频功放热特性的影响时,保持射频功放其他参数及仿真求解设置不变的情况下仅改变环境温度,本文选取环境温度的变化范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 进行分析,所得的仿真结果如图5所示.从图5(a)中可以看出射频功放的温度与环境温度的变化呈线性关系,并且射频功放板面上的最大温度差基本不变.同时由图5(b)分析发现射频功放热应力随着环境温度的改变约有7MPa,而热形变的变化微乎其微,可以忽略不计.说明该射频功放不会因为外部环境的恶化而导致其热应力和热形变增加.

4.6 不同耗散功率对射频功放热特性分析结果的影响

在分析不同耗散功率对射频功放热特性的影响时,保持射频功放其他参数及仿真求解设置不变的情况下仅改变耗散功率,本文选取耗散功率的变化范围为2W~6W进行分析,所得的仿真结果如图6所示.从图中可以看出,当耗散功率从2W增加到6W时,温度上升了接近 55°C ,热应力增加了约190MPa,热形变增

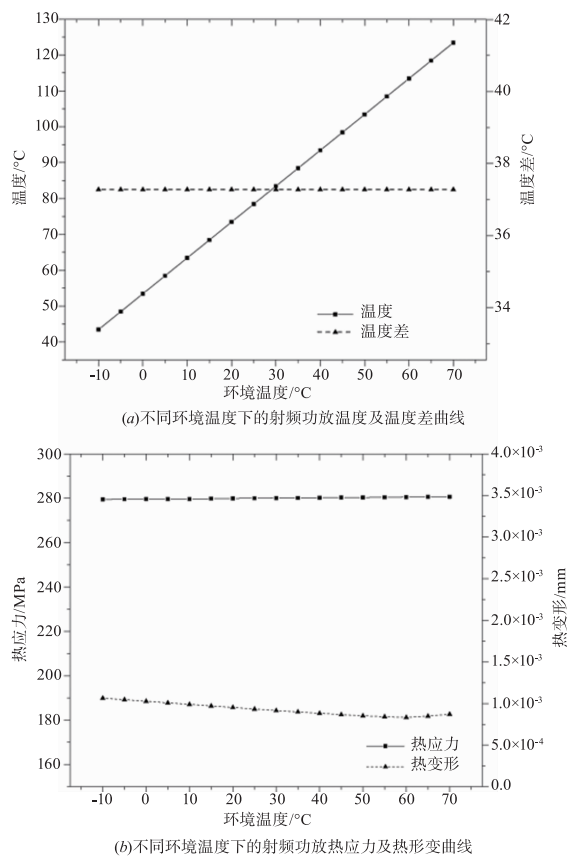


图5 不同环境温度条件下射频功放的温度、热应力及热形变分布结果图

加了约 3.57×10^{-3} mm.随着耗散功率的不断增大,射频功放温度上升较为明显,并且其热应力及热形变变化幅度较大.因此,在射频功放的设计中需要尽可能的降低其耗散功率以保证其具有较高的输出效率.

综合以上结果可以发现,增加过孔后对射频功放的温度分布影响较小但对射频功放热应力及热形变的分布有一定的改善作用.随着覆铜层厚度的增加射频功放最高温度、最大热应力和最大热形变有明显的下降趋势,但是随着覆铜层厚度越厚其下降趋势越缓.射频功放的最高温度与环境温度近似线性关系,随着环境温度的改变其热应力与热形变的变化幅度较小.随着耗散功率的不断增大,射频功放最高温度上升较为明显,并且其热应力及热形变变化幅度较大.对比三组结果可以发现,热应力和热形变的变化主要取决于射频功放的温度梯度,随着射频功放温度梯度的增加,热应力和热形变也相应的增加.

5 射频功放实物制作及测试

根据上述 ADS 仿真设计及热特性分析的结果,实际的射频功放电路制作在介电常数为 3.38、厚度为 30mil、覆铜层厚度为 2oz 的 RO4003C 板材上,射频功放电路的

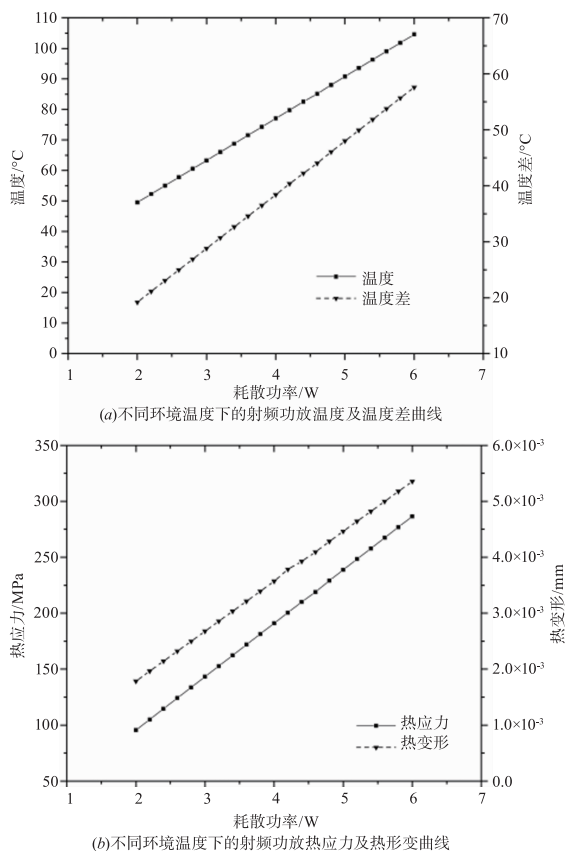


图6 不同耗散功率下射频功放的温度、热应力及热形变分布结果图

实物图如图 7 所示. 在栅极偏置电压为 -2.7V , 漏极偏置电压为 28V 的测试条件下对该射频功放进行测试^[17], 结果如图 8 所示. 测试结果显示, 在 $3.3 \sim 3.6\text{GHz}$ 频段内小信号下增益不低于 12dB ; 大信号下, 输出功率不低于 39.2dBm , 功率附加效率不低于 62.6% . 与仿真结果对比发现, 测试结果同仿真结果相近, 分析产生误差的原因有以下几点: (1) 仿真时软件内的无源器件模型 (如电阻、电容及微带线) 以及晶体管模型与实际器件有一定的区别; (2) 在焊接过程中, 元器件的焊接质量等导致测试结果相较仿真结果有一定偏差; (3) 在射频功放调试时, 可能由于在进行操作时如图 7 所示红色框内两处微带线断口处不平整以及基底板材有断痕导致实验测量数据与仿真数据有一定的误差.

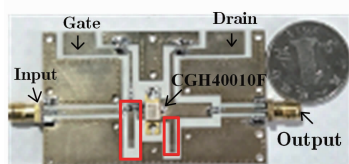


图7 射频功放电路的实物图

在环境温度为 21°C 下, 运用红外温度扫描仪对该款射频功放进行测试, 结果如图 9 所示. 温度最高达到

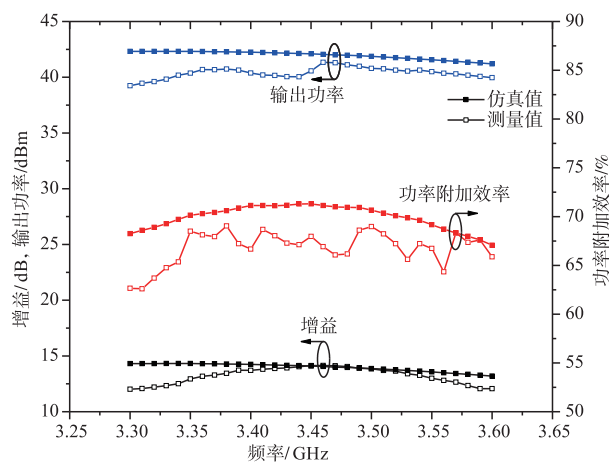


图8 射频功放仿真和实际测量结果图



图9 射频功放实际测量温度分布图

90.0°C , 与分析结果误差为 6.09% . 误差可能由于测量仪器的测量精度有限且实际的室内环境的与仿真环境具有一定的差异性, 该误差在合理范围之内, 基本上可以满足工程需要.

6 结论

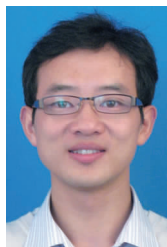
本文在传统的射频功放设计过程的基础上, 考虑了射频功放的热特性, 完成了一款射频功放设计、仿真、加工制作及测试. 论文采用 ADS 软件仿真设计了一款射频功率放大器, 基于 ANSYS 软件对该射频功率放大器的热特性进行了系统性的分析, 量化了射频功率放大器的温度、热应力及热形变, 研究了增加过孔以及不同覆铜层厚度、不同环境温度和不同耗散功率情况下对射频功放的温度、热应力及热形变的影响. 结合上述分析结果, 采用高频板材 RO4003C 板材加工了一款射频功放, 测试结果表明其电性能达到预期的设计要求, 其表面温度与仿真温度相近, 温度误差在 6.09% 以内, 该误差在合理范围之内, 满足工程需要.

参考文献

- [1] Sodan V, Stoffels S, Oprind H, et al. Fast and distributed thermal model for thermal modeling of GaN power devices [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2018, 8(10): 1747 - 1755.
- [2] 蔡惠华, 贾丰锴, 张莉莉, 等. 基于 Ansys Icepak 的负载器

- 热设计与热分析[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(02): 33-37.
- Cai Huihua, Jia Fengkai, Zhang Lili, et al. Thermal design and thermal analysis of load based on ansys Icepak[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(02): 33-37. (in Chinese)
- [3] Yu C, Buttay C, Eric Labouré. Thermal management and electromagnetic analysis for GaN devices packaging on DBC substrate[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(2): 906-910.
- [4] Darwish A, Bayba A J, Hung H A. Channel temperature analysis of GaN HEMTs with nonlinear thermal conductivity[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(3): 840-846.
- [5] 史彭, 陈雅妮, 王占民. 多层圆形组件半解析热分析方法的研究[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1121-1122.
- Shi Peng, Chen Yani, Wang Zhanmin. Research on semi-analytical thermal analysis of multilayer cylindrical electronic module[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1121-1122. (in Chinese)
- [6] 林倩, 陈超. 宽带功率放大器温度可靠性研究[J]. 天津理工大学学报, 2017, 033(001): 35-38.
- Lin Qian, Chen Chao. A study of temperature reliability for the broadband power amplifier[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2017, 033(001): 35-38. (in Chinese)
- [7] 蒋长顺, 谢扩军, 许海峰, 等. 封装中的界面热应力分析[J]. 电子封装, 2006, 6(8): 23-25.
- Jiang Changshun, Xie Kuojun, Xu Haifeng, et al. To encapsulate the interface thermal stress analysis[J]. Journal of Electronics and Encapsulation, 2006, 6(8): 23-25. (in Chinese)
- [8] 王建培, 黄春跃, 梁颖, 等. 基于回归分析和遗传算法的 BGA 焊点功率载荷热应力分析与优化[J]. 电子学报, 2019, 047(003): 734-740.
- Wang Jianpei, Huang Chunyue, Liang ying, et al. Thermal stress analysis and optimization of BGA solder joint power load based on regression analysis and genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 047(003): 734-740. (in Chinese)
- [9] 王金兰, 全良玉, 刘培生, 等. 一种多芯片封装(MCP)的热仿真设计[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 28-31.
- Wang Jinlan, Tong Liangyu, Liu Peisheng, et al. More than a chip package (MCP) thermal simulation design[J]. Computer Engineering and Science, 2012, 34(4): 28-31. (in Chinese)
- [10] Deng Guanqian, Li Zhi, Yan Ning et al. Failure mechanism of interfacial thermal stress of MCM[A]. 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS 2014)[C]. Guangzhou, China: ICRMS, 2014. 257-262.
- [11] Bagnall K R, Wang E N. Theory of thermal time constants in GaN high-electron-mobility transistors[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2018, 8(4): 606-620.
- [12] Wong E H, Lim T B. A more comprehensive solution for tri-material layers subjected to thermal stress[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(1): 54-64.
- [13] Pei J, Fei Y, He S, et al. A 0.25~1.25GHz high-efficiency power amplifier with computer-aided design based on optimized impedance solution continuum[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2018, 28(5): 443-445.
- [14] Lu Tianjian, Jin Jianming. Electrical-thermal co-simulation for analysis of high-power RF/microwave components[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 59(1): 93-102.
- [15] Chen Qian, Amir Mirza Gheitaghy, Fan Jiajie et al. Thermal management on IGBT Power Electronic devices and modules[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 12868-12884.
- [16] Jia Yonghao, Xu Yuehang, Guo Yongxin. A universal scalable thermal resistance model for compact large-signal model of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(10): 4419-4429.
- [17] Paul Saad, Rui Hou, Richard Hellberg. A 1.8~3.8GHz power amplifier with 40% efficiency at 8dB power back off[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(11): 4870-4822.

作者简介



李 军(通信作者) 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为射频器件及天线设计、多物理场分析等.
E-mail: fgstones@163.com



尹希雷 男, 硕士研究生. 主要研究方向为无线通信技术、射频功率放大器设计.
E-mail: yinxilei633@163.com