

Ka频段6 W固态集成功放的热分析与设计

陈昌明^{1,2}, 徐 军¹, 王天宝²

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 成都信息工程学院通信工程系 成都 610225)

【摘要】热模拟是毫米波中高功率放大器设计中的关键环节之一,可靠的散热结构可确保系统中有源器件工作在额定温度下,而基于有限元方法的数值模拟技术是毫米波功率放大器热分析的重要工具。针对由四块毫米波功率单片合成的Ka频段6 W固态集成功放,采用有限元软件ANSYS建立了其三维热模型,对模型在空气自然对流情况下的温度分布状况进行了模拟和分析,模拟结果与实测值基本吻合,验证了模型的有效性。研究结果对毫米波功率放大器的热设计提供了重要的理论依据。

关键词 有限元法; 毫米波功率放大器; 单片毫米波集成电路; 热设计
中图分类号 T405.97 **文献标识码** A

Design and Analysis of Thermal Performance of a 6 W Solid-State Integrated Power Amplifier at Ka-Band

CHEN Chang-ming^{1,2}, XU Jun¹, WANG Tian-bao²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225)

Abstract Thermal simulation is one of the design problems for millimeter-wave medium-to-high power amplifiers. Good thermal configurations were performed for the system to ensure that the active devices would be operating below their rated maximum operating temperature. Numerical simulation based on finite element method is an important tool in the thermal analysis of millimeter-wave power amplifiers. A three dimensional thermal model of a 6 W solid-state integrated power amplifier which is combined by using 1×4 monolithic millimeter-wave integrated circuit (MMIC) chips at Ka-band was built with ANSYS to calculate the temperature distribution under air free convection condition. Good agreement between simulation and experiment and which demonstrated the effectiveness of the thermal model. The simulated results provide a theoretical basis for thermal design of millimeter-wave power amplifiers.

Key words finite element method; millimeter-wave power amplifiers; monolithic millimeter-wave integrated circuit; thermal design

高功率放大器是微波和毫米波发射机的重要部件之一。在毫米波频段,鉴于单个单片毫米波集成电路(Monolithic Millimeter-wave Integrated Circuit, MMIC)可能提供的功率有限,为获取更大功率电平就需采用功率合成技术。随着合成系统所用单片器件功率容量和数量的增加,将导致MMIC器件发热量加大和温度上升,从而强化器件内部由热驱使所形成的机械、化学和电等诸方面的相互作用。若结构设计或材料选择不合理,MMIC工作时热量不能有效地散发出去,会导致MMIC内外的温度梯度过大,从而在MMIC内部形成过热区或过热点,继而造成器件工作性能下降,严重时甚至烧毁MMIC功率单片,引起整个合成系统失效。因此,毫米波功

率放大器的热设计和散热技术研究具有非常重要的作用。波导基毫米波功率合成器可有效地改善放大器的散热特性^[1-3],对其热模拟研究的效用也通过实验得到了验证^[4-5]。目前针对X波段功率合成器的热分析研究已取得了一些成果^[6-8],然而由于其附加散热装置的使用可能使之在要求结构紧凑、小体积、轻量化的应用场合受限。为此,本文利用有限元模拟软件ANSYS建立了Ka频段6 W功率放大器的三维热模型,模拟分析了合成器的稳态温度分布和散热状况,并将其应用于实际工程。

1 模型的建立

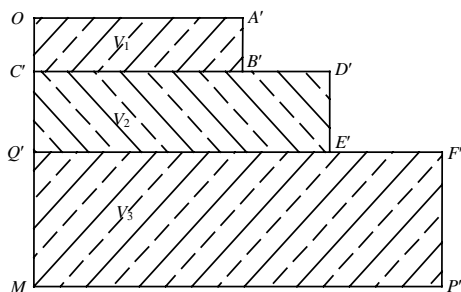
结合所设计的功率合成放大器结构,并根据所

收稿日期: 2006-03-03

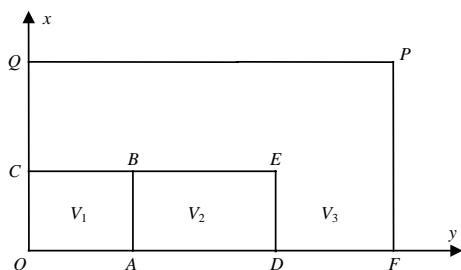
基金项目: 军事电子预研项目

作者简介: 陈昌明(1971-),男,硕士,讲师,主要从事毫米波电路方面的研究。

选用MMIC功率单片的特点及采取的传导散热方式,抽象出需要模拟的热模型。考虑到结构的对称性,只需建立1/4模型,如图1所示。芯片是非常薄的发热元件(约0.1 mm),将其模拟为面热源,如图1中的 V_1 所示,其尺寸与所用单片一致。 V_2 为芯片的热载体,是MMIC功率单片能否正常散热的关键,由于所用单片为数瓦功率电平,因此其材料的选取至关重要。为保证合成器的可靠工作,在国内率先使用一种特殊的导热材料作为MMIC的热载体。 V_2 的长、宽如图1b中的 OD 、 DE 所示,厚度的取值必须兼顾加工的难易和电性能指标进行综合考虑。 V_3 为金属铝,其几何尺寸与合成器腔体实际结构一致,长、宽分别如图1b中的 OF 、 FP 所示。芯片与热载体以及热载体金属铝之间的连接采用很薄的一层焊料焊接,其热阻较小,可忽略不计。



a 纵向剖面图



b 俯视图

图1 功放1/4热模型示意图

芯片所产生的热量主要通过热载体传递至铝腔体,还有一部分是以对流和辐射的方式散逸到周围的环境中去。在热量由芯片结区向外传播过程中主要有:(1)遇到半导体本身的传导热阻。(2)芯片与热载体之间焊接层的传导热阻。(3)热载体和铝腔体以及它们之间的连接层的传导热阻。减小这些环节的热阻,对MMIC器件的散热非常重要。当芯片所产生的热量和向外散去的热量达到平衡时,温度场达到稳定状态。此时的热传导过程是一个稳定的三维热传导问题,它满足三维稳定态的温度场的导热方程:

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

式中 Θ 为温度场变量; ρ 为材料密度; k_x 、 k_y 、 k_z 为材料沿 x 、 y 、 z 方向的热传导系数; Q 为物体内部的热源密度。

图2所示为采用ANSYS建立的三维模型网格划分图。划分网格时考虑以下原则:(1)对所关心部分,如发热芯片,划分网格时采用较密的网格,以保证计算精度。(2)对预测温度梯度较大的部位,如芯片附近,采用较密的网格;而温度梯度较小的部位,如铝腔体部分采用较疏的网格。这样既保证计算精度,又不至于使模型规模过大,占用较多机时。整个有限元模型由1 528 750个单元和11 850个节点组成,模型中热载体材料的热导率为 $260 \text{ W/m} \cdot \text{K}^{-1}$,铝的热导率为 $237 \text{ W/m} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

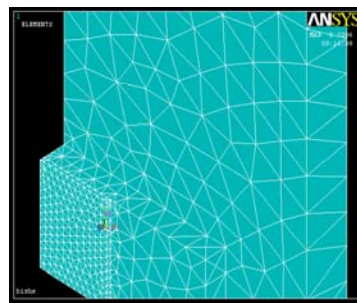


图2 功放1/4模型网格划分

模型的热边界条件如下:(1)热源为芯片功耗,在额定工作条件下,所有MMIC功率单片的总功耗为36.4 W(所建立1/4模型的总功耗为9.1 W)。(2)各材料之间主要通过传导方式进行传热,服从傅立叶传热定律;模型外部通过与空气的对流和辐射进行散热。其中对流传热服从牛顿冷却定律,热辐射则服从斯蒂芬-玻耳兹曼定律。在空气自然对流情况下,取对流传热系数为 $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ 。

2 模拟结果与分析

图3所示为模拟的1/4功放热模型总体温度分布图。从图中可以看出,在稳态情况下,MMICs芯片区最高温度为 100°C ,通过使用特殊导热材料作热载体,能够保证芯片上的热量迅速传递至铝腔体,热平衡后铝板上的温度为 50°C ,可完全保证MMICs的正常工作。图4所示给出了模型在 X 、 Y 、 Z 方向的模拟温度分布图。取图1中的 $O-M$ 作为考察路径,得到 Z 方向温度分布曲线如图4a所示。由图可见,在垂直方向温度变化与热载体和铝板的厚度基本上是呈线性关系(M 点的温度为 50°C),显然,增加热载体

的厚度,有利于有源器件散热。但在实际工程中,必须兼顾到其电性能,机械加工的难易和整个器件的体积、重量等因素而进行折衷考虑。图4b和4c所示为X和Y方向上B'-E', D-E路径的温度分布状况。由图可知芯片在水平方向上的温度变化与热载体几何尺寸呈非线性关系,散热效果比在垂直方向上差。

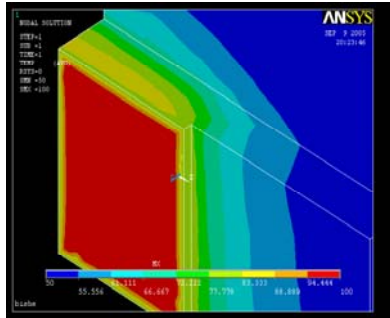
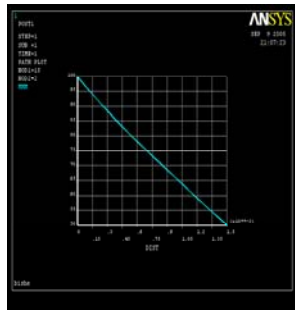
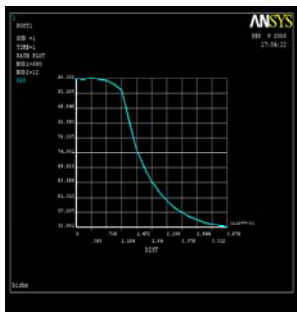


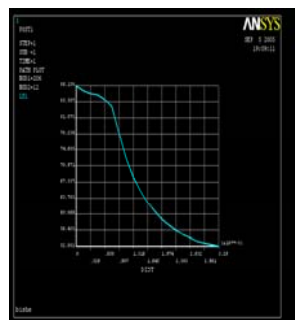
图3 模型温度分布



a. Z方向



b. X方向



c. Y方向

图4 模型在X、Y、Z方向的温度分布图

从传热学的角度考虑,热流总是向着阻力最小的方向流动。由芯片产生的热量,按照一定的扩散角进行传输。传输可以看着由垂直和水平方向分量组成。垂直方向可由芯片扩散至热载体的底面并到达铝板,水平方向可扩散至热载体的侧面。然而从模型的温度分布图3中来看,热量大部分是由芯片向热载体底面传输,这主要是因为由芯片到热载体底面的热通路的热阻较小的缘故。热通路上热阻的分布满足方程^[9-10]:

$$\Delta\theta_i = \sum_j R_{TH_j} P_j \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

式中 $\Delta\theta_i$ 为第 i 个热源区域的表面平均温度增加量; P_j 为功率密度; R_{TH_j} 为热阻。

3 实测结果

为了验证所建热模型的可行性,用温度传感器测试了放大器腔体在初始状态和热平衡情况下的温度,并观察了在MMIC工作频率范围内放大器连续波饱和输出功率随温度的变化情况,其变化曲线如图5所示。图中, T 为腔体温度; t 为放大器的工作时间。由图可知,放大器在连续工作100 min后,腔体温度依然保持恒定($T=55^\circ\text{C}$),与用ANSYS软件的热稳态仿真相差 5°C ,表明了该热模型的准确性。在热稳态情况下功率合成放大器最大饱和功率输出为37.64 dBm(5.8 W)。与功放冷态时37.79 dBm(6 W)相比较,输出功率下降了0.15 dBm,带内下降最多的输出功率也小于0.19 dBm。测试结果表明该功率放大器的散热特性良好,完全可以满足实际工程的需要,同时也验证了所建热模型的可行性和有效性。

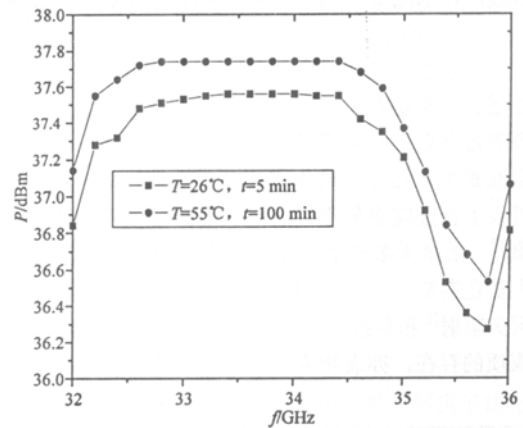


图5 放大器输出功率与温度变化关系

(下转第719)

- medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Low frequency plasmons in thin-wire structures[J]. J. Phys: Condens Matter, 1998, 10: 4785-4809.
- [4] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Trans-MTT, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [5] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [6] ELEFThERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. IEEE Trans-MTT, 2002, 50(12): 2702-2712.
- [7] PARAZZOLI C G, GREGOR R B, LI K, et al. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using snell's law[J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(10): 107401.
- [8] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. Phys Rev B, 2000, 62(16): 10696-10705.
- [9] SILVEIRINHA M G, FERNANDES C A. Homogenization of 3-D-connected and nonconnected wire metamaterials[J]. IEEE Trans-MTT, 2005, 53(4): 1418-1430.
- [10] BREGAR V B, PAVLIN M. Effective-susceptibility tensor for a composite with ferromagnetic inclusions: Enhancement of effective-media theory and alternative ferromagnetic approach[J]. J. App Phys, 2004, 95(11): 6289-6293.

编辑 黄 莘

(上接第715页)

4 结 论

采用一种特殊导热材料作MMICs功率单片的热载体,借助有限元软件ANSYS构建了Ka频段6 W功率合成放大器的热模型,模拟了其在空气自然对流下的温度分布和散热分布状况,表明了热载体材料的选取与设计是MMICs芯片散热的关键。实测结果与模拟值基本吻合,验证了热模型模拟结果的有效性。研究结果对Ka频段中高功率放大器的热设计提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- [1] JIANG X, SEAN C O, AMIR M. A Ka-band power amplifier based on the traveling-wave power-dividing/combining slotted-waveguide circuit[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2004, 52(2): 633-639.
- [2] JEONG J, KWON Y, LEE S, et al. 1.6- and 3.3-W power amplifier modules at 24 GHz using waveguide-based power-combining structures[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech., 2000, 48(12): 2700-2708.
- [3] PENG C J, LEE Y C, ANGELOS A, et al. Multioctave spatial power combining in oversized coaxial waveguide[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2002, 50(5): 1355-1359.
- [4] NAI S C, PENG C J, RENSCH D B, et al. A 120 W X-band spatially combined solid-state amplifier[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47: 2557-2561.
- [5] NAI S C, ANGELOS A A, MICHAEL G C, et al. 40 W CW broad-band spatial power combiner using dense finline arrays[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47:1070-1076.
- [6] BATTY W, CHRISTOFFERSEN C E, YAKOVLEV A B, et al. Global coupled EM-electrical-thermal simulation and experimental validation for a spatial power combining MMIC array[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2002, 50(12): 2820-2833.
- [7] BATTY W, PANKS A J, DAVID S, et al. Electro-thermal modeling and measurement of thermal time constants and natural convection in spatial power combining grid arrays[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2000, 40: 1937-1940.
- [8] BATTY W, PANKS A J, JOHNSON R G, et al. Electro-thermal modeling and measurement for spatial power combining at millimeter wavelengths[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(12): 2572-2586.
- [9] BATTY W, SNOWDEN C M. Electro-thermal device and circuit simulation with thermal nonlinearity due to temperature dependent diffusivity[J]. Electron. Lett, 2000, 36: 1966-1968.
- [10] BATTY W, CHRISTOFFERSEN C E, PANKS A J, et al. Electro-thermal CAD of power devices and circuits with fully physical time-dependent compact thermal modeling of complex nonlinear 3-D systems[J]. IEEE Trans Comp Packag Technol, 2001, 24: 566-590.

编辑 税 红