

模块级硅基微流道热仿真与验证

[李阳阳*、卢茜、向伟玮、张剑、蒋苗苗、张晏铭]

[西南电子设备研究所, 610036]

[摘 要] 在航空航天领域,微波模块集成密度越来越高,功能越来越复杂,高增益下的功率密度也大幅提升。为满足该需求,在第三代半导体技术发展的带动下,GaN 芯片已被广泛应用于 TR 模块和功放模块中,导致功耗和热流密度也急剧上升。传统的散热方式,如风冷、接触式热传导等不能高效的移除热量,而主动型液冷散热技术作为一种选择值得尝试。本文采用 Ansys CFX 进行 CFD 建模仿真,通过仿真设计对比研究了不同微通道结构的散热能力、流阻特性(包含直通微流道和变截面微流道),采用深硅刻蚀工艺和硅-硅键合工艺完成微通道散热器的制作。本文中的模块主要发热源为 GaN 开关和 GaN 功放芯片,仿真时简化为均匀块体热源。为了研究流动状态对微通道散热特性的影响,本文考虑了层流和湍流两种状态,通过自行搭建热测试系统,对实物样件(两种不同的微通道散热结构)进行表征测试。对比发现,测试结果和仿真结果一致性高,结果表明,变截面微通道散热器有散热能力更胜一筹,且层流模型更符合实际应用状态。

[关键词] 航空航天,微波模块,Ansys CFX,硅基微流体散热,热表征

Simulation and Characterization of Si-based Micro-channel for Module Level Cooling

[Yangyang Li, Qian Lu, Weiwei Xiang, Jian Zhang, Miaomiao Jiang, Yanming Zhang]

[Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, 610036]

[Abstract] In the field of Aerospace, Microwave modules have been increasingly complex and highly integrated, while power dissipation and signal gain increased accordingly. To satisfying this requirement, the third generation semiconductor high performance ICs, such as GaN chips, have been widely used in arrayed T/R unit and power amplifier modules, leading to sharply rise in power consumption and heat flux. Traditional cooling technologies such as natural convection and contact-type heat conduction cannot remove heat effectively, therefore, the forced highly efficient liquid cooling technique has been adopted. In this paper, three dimensional computational fluid dynamic (CFD) models are developed in Ansys CFX to understand the flow resistance characteristics, heat dissipation capacity of different kind

microfluidic structures (Two kinds of microfluidic structures had been designed and simulated, respectively, straight-through channel and variable cross-section channel), all simulated microfluidic structures have been manufactured by using deep silicon etching and Si-Si bonding. The GaN switch chip and power amplifier chip in this simulation are simplified to block heat generation with uniform heat source surface. In order to determine the flow state, turbulence and laminar flow effect have been taken into consideration respectively, which were verified by thermal characteristic. To verify the simulation results, power amplifier modules with different microfluidic structure integrated have been designed and assembled, the liquid cooling experimental setup have been built to characterize different kinds of microfluidic structures. The test results make a good agreement with our simulations, proving that the CFD modeling and simulation are reasonable.

[**Keyword**] Aerospace, Microwave module, Ansys CFX, silicon-based microfluidic cooling, thermal characterization.

1 前言

众所周知，功放是射频电路中的关键组成部分。由于其小尺寸、高速、高功率、高瞬时带宽，GaN 功率器件在许多商业和军用电子装备中被广泛采用。然而，小尺寸和高集成密度，再加上设备功率的增加，给热管理带来了新的挑战。为了跟上并充分利用电子技术和半导体领域的进步，需要进一步完善和升级热管理技术。在实际工程应用中，有两种主流的散热方式被采用：氮化镓-金刚石异构集成散热和碳化硅基氮化镓微流道散热。其中，微流道散热技术已被广泛研究。

T. Dang 开展了微通道换热器稳态和时变条件下的数值模拟工作.[1] M. A. Arie 对单向和层流状态下的微通道平板换热器中的基本单元歧管进行了多目标优化仿真与测试研究.[2] 还有研究对不同针-翅微结构进行了流体散热分析，并对其热力性能进行了评价。[3] 近来，DARPA 的嵌入式冷却研究项目正在建立一种新的芯片内/芯片间热管理模式，即在芯片、基板和封装中内置主动冷却结构来直接冷却芯片热点。[4] John Ditre et al. 研究了一种利用分布式微流控射流的嵌入式电子冷却方式，该微喷射结构采用一种灵活的三维光刻加工工艺实现。[5]

本文开展了硅基微通道散热器在模块级散热的仿真与测试工作。采用 3D 流体动力学建模仿真来描述不同微流道结构下的流动状态、流阻、散热能力变化规律。文中的功放模块采用微组装机工艺实现。为了对微流体冷却系统的热性能进行表征，搭建了一种定制化的冷却循环系统。

2 建模与仿真

2.1 模型信息

分别对直通流道和变截面流道进行建模，如图 1 所示，每种流道结构的尺寸如图 2 所示，流道特征尺寸 $25\text{ }\mu\text{m}$ ，深度约 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。

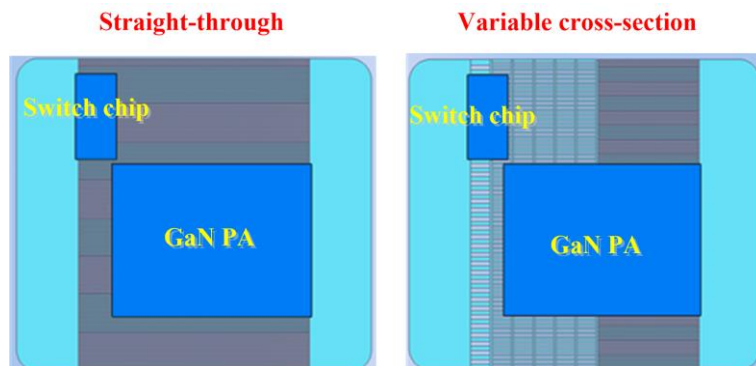


图 1. 微流道结构模型示意图

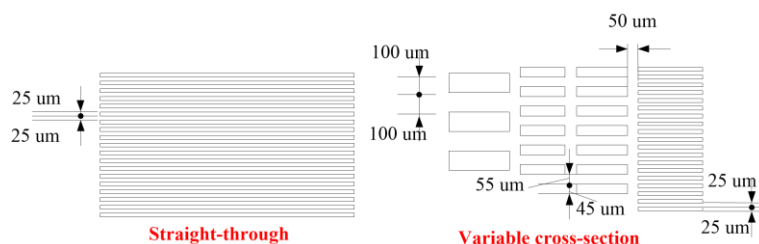


图 2. 微流道结构的尺寸信息

2.2 建模和边界条件

对比分析过程中，由于微流体扰动的复杂性，需要进行大量的 CFD 模拟。而该功放模块中的芯片分布不具有对称性，本文采用全模型进行仿真。仿真的聚焦的内容: (a) 研究在特定结构下流动状态对散热性能的影响; (b) 研究在特定流动状态下，不同微通道结构的散热性能和流阻特性。本研究中的微流体散热采用单向流，不考虑相变。

几点假设：

- 功放芯片表面热流密度视为均匀;
- 功放芯片和微流道散热器之间键合界面热阻视为常数;
- 流道结构完整，无对位偏差.

CFD 模型中包含微流道结构、冷却液、芯片及键合层。模型复杂度高，存在跨尺度现象，网格划分难度高。本文对模型进行适当的切割，主要适应流道中的小尺寸翅片结构，如图 3。

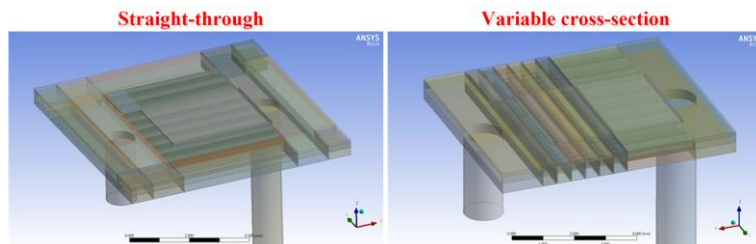


图 3. 模型切割

流体仿真分析需要高质量的单元网格来确保计算效率和计算精度，因此本文采用结构化的网格，如图 4。针对直通流道和变截面流道，网格总数分别控制在 190 万和 460 万。

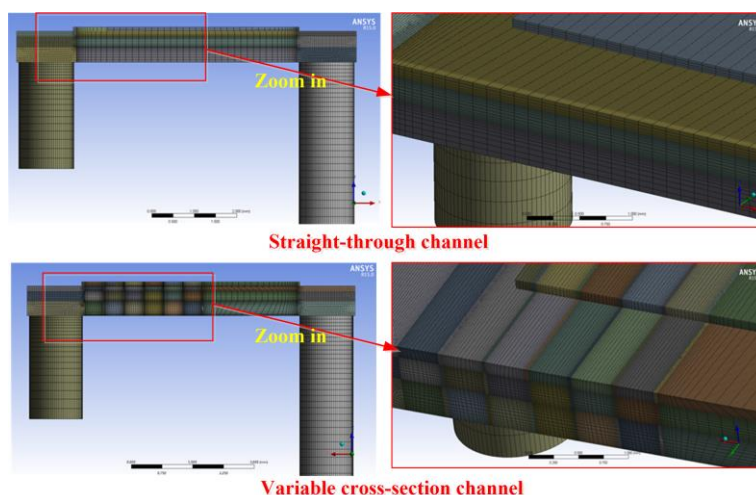


图 4. 网格划分

根据 GaN 芯片的工作状态，换算的等效热流密度 $114\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $332\text{W}/\text{cm}^2$ 分别施加在开关芯片表面和功放芯片表面作为热源。仿真和实验中的冷却工质采用去离子水，进口温度 25°C ，采用压力出口边界，外部压强 1atm 。仿真中的材料参数采用与时间相关的函数，以便精确模拟整个系统的温度行为。为了研究流动状态对散热和流阻性能的影响，本文对层流和湍流状态分别进行了仿真分析。

3 实验

3.1 测试样件组装

3.1.1 微通道制作

采用光刻和深硅刻蚀工艺实现硅基微流道的制作，最终的闭合流道采用硅-硅键合工艺完成。采用激光打孔实现 1mm 的冷却液进出口。图 5 为两种不同微流道结构的 X 光照。

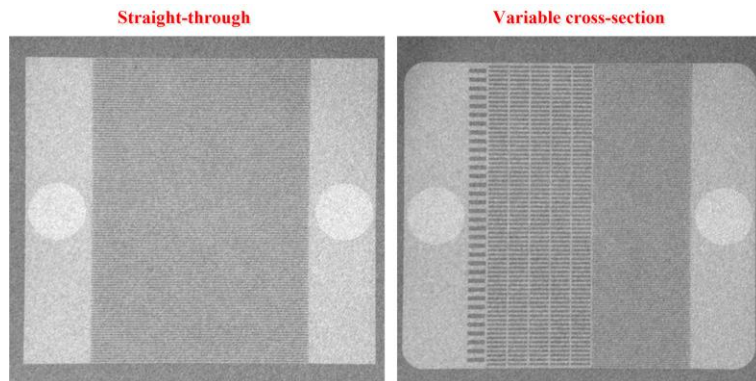


图 5. 直通和变截面微流道 X 光照

3.1.2 样件组装

硅基微流道散热器通过共晶焊接方式集成在金属盒体中，GaN 芯片采用高导热导电胶粘结在散热器表面。采用接触式传感器进行温度测试。该传感器采用 W 材料，TCR 与温度线性相关且足够灵敏，组装样件实物如图 6。

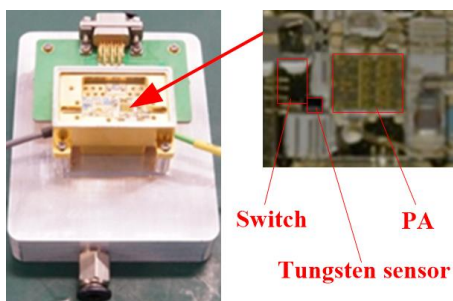


图 6. 组装实物图

3.2 热测试系统

自行搭建的液冷测试系统循环回路原理图如图 7 所示，功放模块中的 GaN 芯片温度测试是通过间接测试 W 传感器电阻（采用四线法测电阻）及两端的电压变化而实现的。整个冷却循环系统进液流量控制在 110mL/min，通过调节 GaN 芯片的接入电压来控制其增益和功率输出，所有的温度和压力测试均在液冷系统稳定状态下进行。

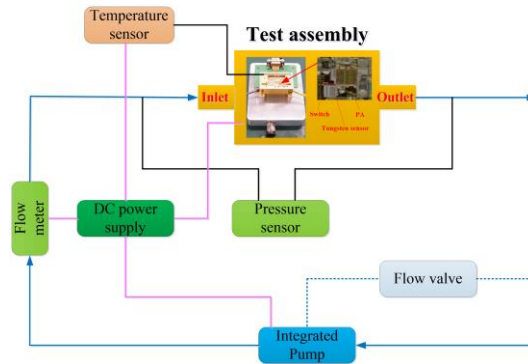


图 7. 液冷循环系统原理图

4 结果与讨论

4.1 仿真结果分析

该仿真中直通流道和变截面流道的输入流量均设定为 110mL/min, 界面热阻测试值为 $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. 仿真结果中温度梯度和压降分布如图 8 和 图 9 所示, 具体数值如表 1 所示。可以看出, 变截面流道冷却条件下, 芯片表面温度分布更加均匀, 在同样流量的情况下, 变截面流道冷却情况下芯片表面温升相比直通流道冷却情况得到了较好的控制。(层流状态下 2.9℃, 湍流状态下 4.6℃)。

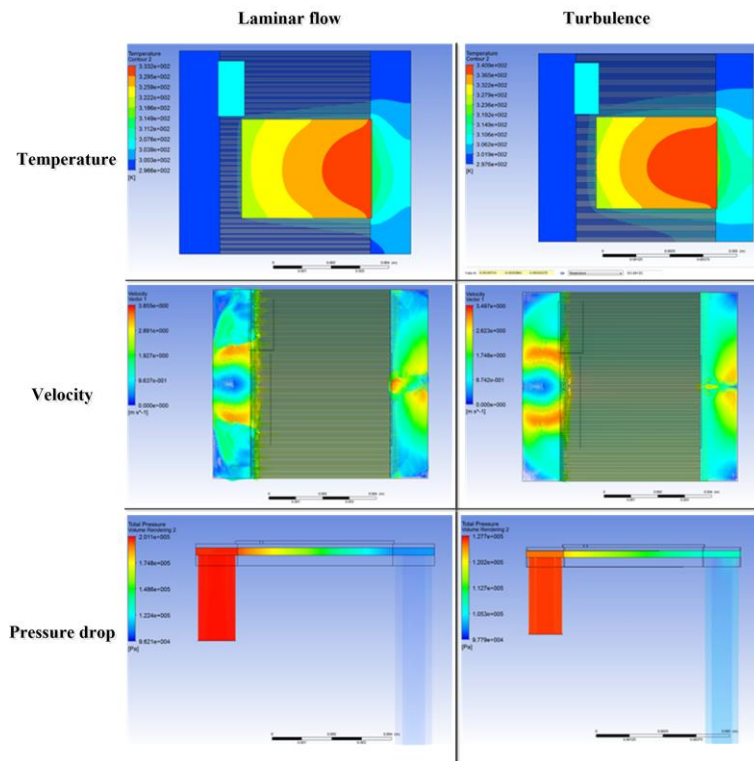


图 8. 直通流道仿真结果

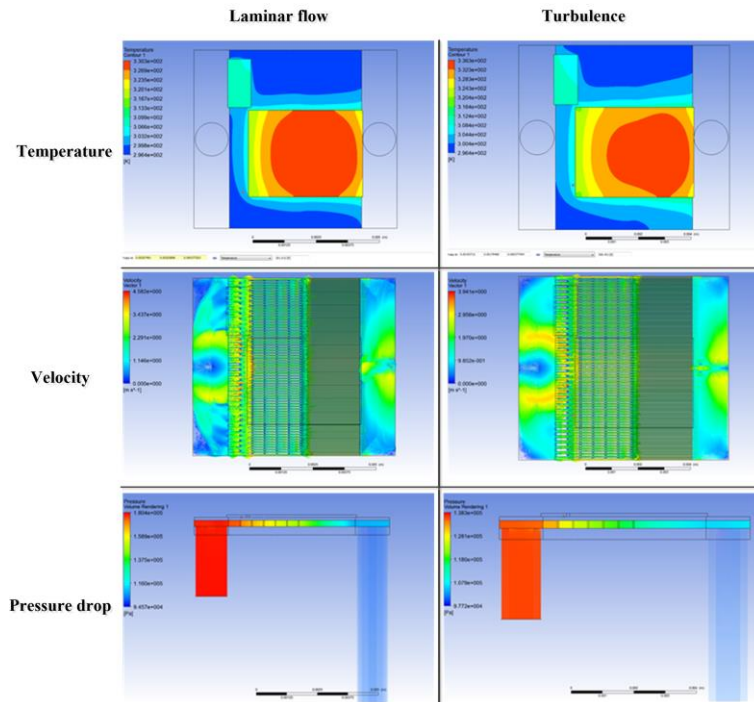


图 9. 变截面流道仿真结果

对流阻而言，不同流动状态下的变化规律不尽相同。相比于直通流道，层流状态下变截面流道进出口压降下降 19.06 KPa，但在湍流状态下，压降又上升了 10.67 KPa。层流状态下的热仿真结果要优于湍流状态，但冷却液进出口又明显的压降增量。

表 1. 两种流道结构的仿真数值

结构和流态	芯片上最大温度 (°C)	芯片温升 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	压降 ΔP (KPa)	流速 (m/s)
直通-湍流	67.9	43.3	29.91	3.497
直通-层流	60.2	35.6	104.89	3.855
变截面-湍流	63.3	38.7	40.58	3.941
变截面-层流	57.3	32.7	85.83	4.582

4.2 实验结果

为了对比仿真结果并进一步确认实验中的流态，对直通和变截面微通道集成模块样件进行热测试。事先对 W 电阻传感器进行标定，并贴装在功放芯片附近，采用四线法进行电阻测试并通过标定曲线读取温度信息，同时提取模型中相同位置的温度仿真结果。对比如表 2。

表 2. 仿真与实测对比

项目	直通流道		变截面流道	
	测试结果	仿真结果(层流)	测试结果	仿真结果(层流)
传感器温度 (°C)	32	34.06	27	28.012
压降 (KPa)	107	104.89	88	85.83

通过对比发现,实验所测的温度和压降与层流状态下的仿真结果是高度一致的。也可以用雷诺系数的数值范围对此进行解释。雷诺系数 Re 和微通道结构的水力直径 ($D = 300\mu m$)、流道内的液体流速(V) 相关，公式如(1)：

$$Re_D = \frac{VD}{\mu} \quad (1)$$

式中 μ 代表流体的运动粘度。通过计算，本研究中雷诺系数范围 Re 约为 $1.5 \sim 1.8$ ，整个流动过程是层流状态占优的情况。 [5]

4.3 讨论

在工程应用中，微流道散热器两端的压降是一项关键指标。本研究中，层流状态下的压降实测结果和仿真结果高度一致,进一步验证了我们的猜想。变截面微流体结构相比于直通流道结构，获得了很好的散热性能。这归功于变截面流道结构中的周期性扰流效应。微流道壁面的周期性扰流结构打破了原本直通状态下流动方向的连续边界，换热面积增大且流阻降低，提高了热源和流动工质的换热效率。

5 结论

该项研究是模块级应用中高效热管理领域的初步尝试。研究结果表明，硅基微流道散热技术是切实可行的。本研究总结如下：

(1) 为了对比不同流道结构下的热特性，本研究中针对不同的微流道结构建立了 CFD 仿真模型，结果表明，在相同的流动状态下，变截面微通道的散热能力要优于直通流道，此外，流阻特性也得到了明显改善。

(2) 相比于湍流状态，层流状态下两种结构的冷却液与微通道壁面换热性能更加优异。

(3) 仿真和测试结果证明，具有层流效应的变截面微流道结构可实现高效散热，实际应用中其压降也可以接受，因此文中的流道结构可用于模块级的三维集成电路热管理。

[参考文献]

- [1] Thanhtrung Dang and Jyh-tong Teng, “Numerical Simulation of a Microchannel Heat Exchanger Using Steady-state and Time-dependent Solvers”, Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada, November 12-18, 2010, IMECE2010-37420.
- [2] M. A. Arie, A. H. Shooshtari, S. V. Dessiatoun, M. M. Ohadi and E. Al Hajri, “Simulation and Thermal Optimization of a Manifold Microchannel Flat Plate Heat Exchanger”, Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Houston, Texas, USA, November 9-15, 2012, IMECE2012-88181.
- [3] Abas Abdoli, Gianni Jimenez, George S. Dulikravich, “Thermo-fluid Analysis of Micro pin-fin Array Cooling Configurations for High Heat fluxes with a Hot Spot”. International Journal of Thermal Sciences, vol. 90, 2015, pp. 290-297.
- [4] A. Bar-Cohen, J. J. Maurer, J. G. Felbinger, “DARPA’s Intra/Interchip Enhanced Cooling(ICECool) Program”, Proceedings of CS MANTECH Conference, New Orleans, Louisiana, USA, May 13-16, 2013, pp. 171-174.
- [5] J. Ditri, J. Hahn, R. Cadotte, M. McNulty, D. Lupp, “Embedded Cooling Of High Heat Flux Electronics Utilizing Distributed Microfluidic Impingement Jets”, Proceedings of the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, San Francisco, California, USA, July 6-9, 2015, IPACK2015-48689.