

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260525002

一种多尺度热沉分流均匀性及微通道散热能力研究

周翔宇 黄巍 刘启航 秦小晋

(中国电子科技集团公司第三十研究所 成都 610041)

摘要 为解决高热流密度散热及多目标热源的分流均匀性问题,设计了一种集成厘米、毫米尺度量级以及微通道的多尺度热沉,对热沉进行了分流均匀性和散热能力研究。本文使用ANSYS Icepak 散热仿真软件分析了在一定进液流量条件下,不同矩形流道截面高度、宽度尺寸对系统压差及分流均匀性的影响,将数值分析得到的分流均匀性最优的几何设计参数加工制备多尺度热沉样件,开展热性能与流体特性实验测试及结果分析,并提出一种简易高效的流道分流均匀性测试方法,完成流体分配一致性的量化表征与实验验证。结果表明:相同的热沉结构形式,当供液流量降至额定值的83%时,压差最大差异率<3.5%,当流量降至额定值的67%时,压差最大差异率<5%,分流均匀性与供液流量呈正相关。在液体冷却的热沉形式中,辐射传热占比很小,循环冷却工质可带走系统近90%的总热量。当热源热流密度为 33.2 W/cm^2 时,热源测点温度与进液温度的温升仅为 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明微通道换热能力强,多尺度热沉具有优良的散热效果,研究结论及实验数据可为多尺度热沉的设计提供相关参考。

关键词 多尺度;热沉;液冷;微通道;分流均匀性

中图分类号: TB657.5;TN06;TK172

文献标识码: A

Flow-Distribution Uniformity of Multiscale Heat Sink and Heat-Dissipation Capacity of Microchannels

Zhou Xiangyu Huang Wei Liu Qihang Qin Xiaojin

(The 30th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract To address high heat-flux dissipation and ensure uniform flow distribution across multiple heat sources, a multiscale heat sink integrating centimeter-, millimeter-, and micro-scale channels is designed in this study. The ANSYS Icepak thermal simulation software is used to analyze the effects of varying rectangular cross-sectional heights and widths on flow-distribution uniformity and system pressure drop under a specified liquid flow rate. Optimal geometric parameters obtained from numerical analysis are applied to fabricate the multiscale heat-sink prototypes, which are subsequently subject to performance testing and comprehensive analysis. Additionally, a simple and efficient method is designed to test flow-distribution uniformity. Results show that, for identical multiscale heat sinks, flow-distribution uniformity correlates positively with the liquid-supply flow rate. Specifically, when the flow rate is reduced to 83% of the rated value, the maximum difference of pressure drop remains below 3.5%; at a 67% reduction, this difference remains under 5%. In liquid-cooling heat-sink configurations, radiative heat transfer accounts for only a minor proportion of the total heat dissipation, while almost 90% of the heat is removed by the working fluid. When the heat flux of the heat source is 33.2 W/cm^2 , the temperature difference between the heat source and inlet liquid is merely $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, which demonstrates the outstanding heat-transfer capability of the microchannel and the excellent heat-dissipation performance of the multiscale heat sink. The results and test data derived from this study may facilitate the optimal design of multiscale heat sinks.

Keywords multiscale; heat sink; liquid cooling; microchannel; flow-distribution uniformity

随着通信电子设备不断优化迭代,先进电子装备系统的发展需要使用大功率电子器件,而半导体工艺制程的缩小和性能的提升使得核心芯片的热流密度逐年增大,芯片的温升若不加以控制,很容易造

成损坏,进而影响功能实现。根据电子装备可靠性统计,温度引起元器件失效占55%^[1],在装备全球化作战的形势下,装备的可靠性提升需要先进的散热方式。

微通道换热技术在20世纪80年代初,由美国学

收稿日期:2026-05-25;修回日期:2026-07-02;录用日期:2026-07-07

责任编辑:王亚薇



移动阅读

者 D. B. Tuckerman 等^[2]提出,他们在 1 cm×1 cm 硅板上设计了一系列宽为 50 μm,深为 302 μm,间隔为 50 μm 的微槽,以水为工作介质进行流动与换热实验,在温升为 71 °C,压降为 213 kPa 的条件下获得了 790 W/cm² 热流密度的散热效果。微通道一般指水力直径为 50~600 μm 的通道^[3-4],由于微通道强大的换热能力及优良的散热性能,国内外学者对微通道散热进行了大量的研究,陈显才等^[5]对硅基微通道热沉与液冷散热性能进行了研究,制备了一种分段式平直流道硅基微通道热沉,采用数值模拟方法研究了冷却液种类、流道槽宽和槽深对热沉散热性能和流动特性的影响。谭慧等^[6]研究了叶脉型微通道热沉及其优良散热性能,同时对多热源阵面温度的均匀性进行了设计优化及测试。张割等^[7]对微通道液冷冷板进行了设计和仿真分析,得到了在不同功耗下系统所需的流量及对应的芯片温度和冷板压损。袁培等^[8]通过对 2 种不同结构微通道换热器进行数值模拟,研究分流板及进口速度的变化对平行流换热器中单相流体流量分配的影响规律。本文从工程应用角度出发,设计了一种集成厘米、毫米尺度量级以及微通道的多尺度热沉进行设计研究,并对多目标热源的分流均匀性进行了设计探索与实验数据测试。

1 多尺度热沉设计

1.1 热沉结构设计

常用的微通道热沉的基座材料有不锈钢、硅、铝、铜,常用的冷却流体工质有去离子水、乙二醇、水和丙三醇的混合溶液等,通过高精度数控机加、刻蚀、微电铸、金属键合、真空镀膜等工艺进行微通道的加工与散热系统的实现,可有效解决通信电子设备中高热流密度器件或高热系统的散热问题。

根据传热学^[9]理论,通道当量直径 D_h 为:

$$D_h = 2b_c D / (b_c + D) \quad (1)$$

对流传热系数为:

$$h = Nu \lambda_f / D_h \quad (2)$$

式中: b_c 为流道宽度, mm; D 为流道高度, mm; Nu 为努塞尔数; λ_f 为流体导热系数, W/(m·K)。

考虑加工工艺可行性,多尺度热沉中微通道选择矩形流道,通过高精度数控铣削加工,在 3A21 铝合金的基座上加工微通道样件, $b_c = 0.2$ mm, $D = 0.5$ mm,此时 $D_h = 0.286$ mm,通道当量直径在 50~600 μm 内,满足微通道定义的尺寸范围,矩形微通道冷板剖切面如图 1 所示,在微通道内,工质多处于层流状态,无量纲参数 Nu 可认为是定值,微通道的对流

传热系数与通道当量直径成反比^[10],因此,较小的当量直径可以获得较大的对流传热系数,紧凑的结构特点与高散热能力在高热流密度电子芯片散热技术中具有很大的技术发展潜力。

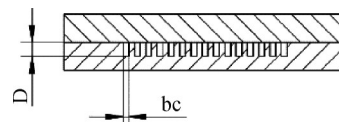


图 1 微通道液冷冷板剖视图

Fig.1 Cross-section view of microchannel liquid cooling plate

自然界中流体的分叉结构形式较为常见,如植物中树叶的分叉结构,流体遵循水压和最小能量损失原则,受自然界中分叉结构的启发,大量学者对流体分形分叉结构形式进行了研究,徐依钊等^[11]对分形结构于流动换热起强化作用进行了阐述,武瞳等^[12]提出了分形理论能有效提升换热器传热效率,减小阻力损失,马欣荣等^[13]研究了 Y 型分叉仿生微通道换热性能,研究表明,分形分叉流道具有更好的换热性能,强化了液体的流动换热能力,分形网络在提高散热量的同时降低了泵功耗。基于仿生学分叉结构研究,在设计毫米级分流网络时,考虑加工易实现,采用分形分叉中较为简单的 T 型结构来实现多尺度热沉较小的压降及供液的均匀性。

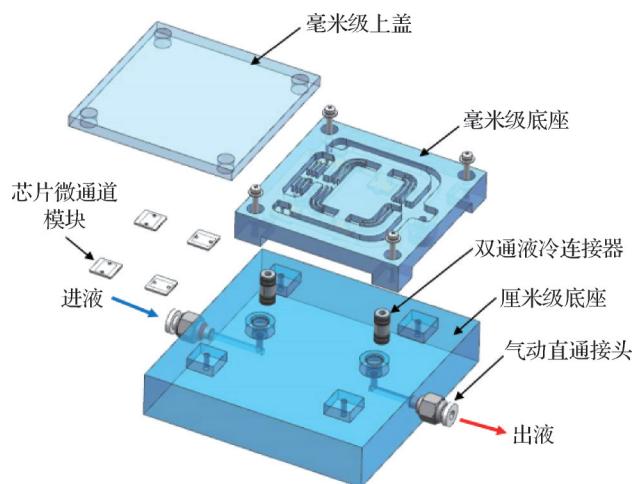


图 2 多尺度热沉结构分解图

Fig.2 Exploded view of multi-scale heat sink

多尺度热沉的设计将微通道与毫米级、厘米级的宏观散热系统相结合,热量传递方式涉及空气对流传热、流体对流传热及热传导和热辐射,主要考虑达到热平衡后的稳态各项温度、流量、压差的平衡关系。冷却流体经过 3 个尺度的散热系统,通过毫米级分流网络的设计,最终需要实现散热系统中 4 处微通道散热器的供液均匀性。多尺度热沉结构分解图如

图2所示,该热沉结构紧凑,可为紧凑型集成电路中多目标热源的高热流密度散热问题提供一种设计解决方案。

1.2 液冷散热原理

液冷散热系统一般由散热器、驱动泵、水箱、管道和冷却流体组成。工作原理是由驱动泵形成驱动力,推动散热器中的冷却流体循环流动,发热芯片通过热传导将高热量传递到散热器上,冷却流体在散热系统中循环并带走热量进行散热,如此周而复始。

在研究多尺度热沉的散热性能时,采用气动直通接头、PU管、水箱及外置驱动泵串接形成液冷循环系统。散热器是散热系统的核心部分,主要作用是进行热量的传递并散热,将发热芯片产生的热量与冷却液进行充分的热交换,进而降低芯片的温度。流动的冷却工质具备优良的传热特性,冷却工质的比热容越大,吸收或散热能力越强,在恒定热载荷工况下,热沉的换热性能与冷却介质流速呈正相关,但流速提升同时也会造成系统流阻增加。

1.3 工艺方案及加工

多尺度热沉中毫米级和厘米尺度冷板通过双通液冷连接器及螺钉组件相连接,厘米尺度冷板定位为提供液体工质的进出液通道,设计中应重点考虑微米级、毫米级分流网络的焊接工艺性,该处设计主要由毫米级流道底座、上盖及芯片微通道模块、可伐垫片4部分组成。

毫米级流道底座及上盖材料采用3A21铝合金,表面镀镍,由于铝对氧的亲合力较强,在焊接过程中表面很容易产生一层致密、高熔点的氧化铝膜,最终影响焊接质量,在焊接工艺的设计过程中,应充分考虑该问题,通过钎剂或真空方法清除表面氧化物以保障焊接质量,该工艺变形小,工艺方法成熟稳定。由于可伐合金的热膨胀系数能与半导体材料匹配,可减小热应力风险,芯片微通道模块采用可伐4J29合金(表面镀金处理)通过共晶焊的方式与底座连接,底座安装凹槽处采用局部镀金工艺,因所用材料不同,为保证各零件焊接可靠性,工艺上选择了具有温度梯度的焊接方式,毫米级底座与上盖形成的组件采用钎焊,焊接温度为580℃,芯片微通道模块与可伐垫片,可伐垫片与冷板组件采用共晶焊接,焊接温度为320℃。

2 热沉数值仿真分析

2.1 仿真模型

在三维设计软件UG NX中建立多尺度热沉的数

字模型,提取热沉中流体进行网格加密,流体网格划分见图3,结合ANSYS ICEPAK软件对热沉进行散热及流场的仿真分析。在进行液冷仿真模拟时,为使仿真计算有效进行,作如下理想假设:流体为体积连续、不可压缩、恒定黏性流动;忽略流体工质随温度变化而产生的物性改变;冷却液为单相流体;忽略质量力,不考虑辐射散热。

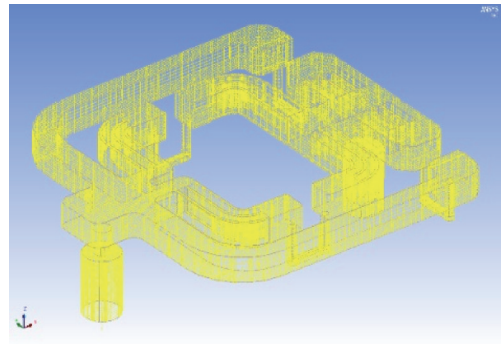


图3 流体网格划分

Fig.3 Meshing of the fluid computational domain

2.2 仿真分析

仿真的边界条件设置为,环境温度20℃,毫米级分流网络进、出水口孔直径为3mm,入口流量为600 mL/min,流道为层流状态,热沉金属材料选择为铝合金,流体工质选择去离子水,水的物理属性稳定,体积连续且不可压缩,迭代步数设置为600,连续性和速度残差为 1×10^{-3} ,能量残差为 1×10^{-7} ,调整松弛因子,设置温度监测点,多核计算。

在流体力学理论中,支管的流量主要取决于管路两端的静压差^[14],流体在微通道中的流动由压差表征,压差是评价流量均匀性分析的重要参数^[5,14-17],对于充分发展的层流,由达西方程^[9]得:

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V_m^2}{2} \quad (3)$$

式中: f 为摩擦阻力因数(无量纲); L 为流道入口段长度,m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; V_m 为通道平均流速,m/s。

在Icepak热仿真平台中,分析不同矩形截面高度尺寸及不同流道宽度对宏观分流均匀性、系统压差的影响。考虑流道加工性,选择相同流道宽度不同截面高度及相同截面高度不同流道宽度的几组数据作为流道均匀性仿真分析的几何输入参数:

- (a)流道矩形截面高度为2 mm,流道宽度为1 mm;
- (b)流道矩形截面高度为3 mm,流道宽度为1 mm;
- (c)流道矩形截面高度为4 mm,流道宽度为1 mm;
- (d)流道矩形截面高度为3 mm,流道宽度为0.8 mm;

(e) 流道矩形截面高度为 3 mm, 流道宽度为 1.2 mm。

按图 4 所示布设多尺度热沉在分流网络中的压力测试点, 便于采集流道对应测点的压差。

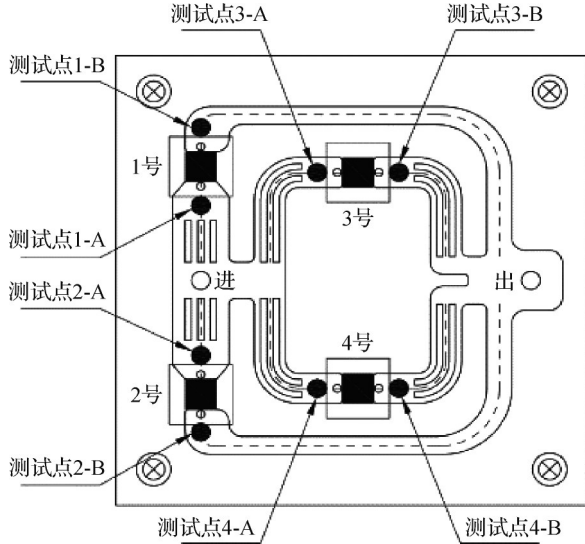


图 4 分流网络压力测试点

Fig.4 Pressure test points of distributed flow network

根据(a)~(e)不同流道参数的设置及仿真后处理结果中的流道切面压力云图,如图5所示,整理出在1号~4号微通道模块的进出液口,共计8处测试点的数据,以此来对比不同流道中的压差大小,分析流道的变化引起流道均匀性的变化趋势,通过数值对比,分析流道的设计方案对多尺度热沉耦合散热能力的影响。

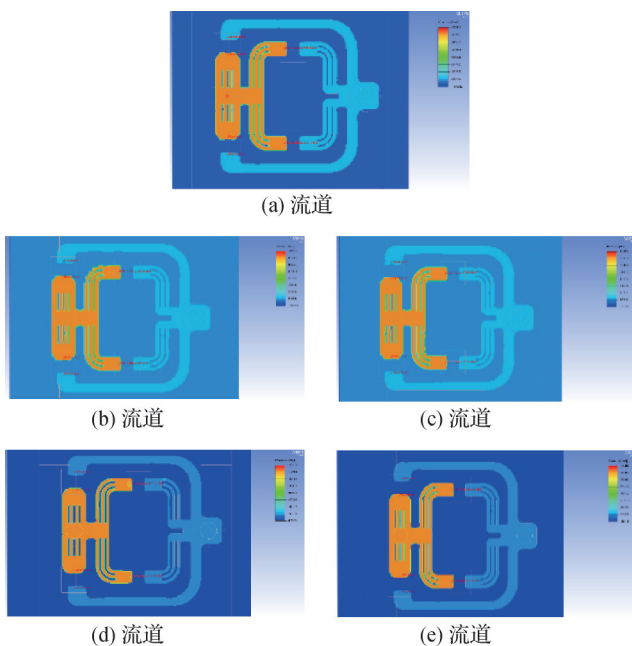


图 5 (a)~(e) 流道压力云图

Fig.5 Pressure contour of (a)~(e) flow channel

表 1 列出了不同流道的压差数据值,按照数据统计分析原理,将所有压差值进行均值分析,用算术平均值 E 及标准差 $\bar{E}$ ^[6,18-19] 衡量数据相对于其平均值的离散程度,计算如式(4)和式(5)所示,流道均值分析统计如表 1 所示。

$$E = \frac{\sum \Delta p}{4} \quad (4)$$

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta p - E)^2}{4}} \quad (5)$$

表 1 (a)~(e) 流道压差及均值分析

Tab.1 Differential pressure data and analysis on mean differential pressure of flow channel

流道	$\Delta p_1/\text{kPa}$	$\Delta p_2/\text{kPa}$	$\Delta p_3/\text{kPa}$	$\Delta p_4/\text{kPa}$	E	$\bar{E}$
a	17.03	17.01	16.19	16.22	16.61	0.41
b	16.89	16.87	16.49	16.51	16.69	0.19
c	16.78	16.78	16.56	16.60	16.68	0.10
d	15.72	15.50	14.76	14.91	15.26	0.40
e	17.92	17.93	17.75	17.79	17.85	0.08

分析表 1 可知,(a)~(e)中,流道(e)的标准差最小,离散程度最低,分流均匀性最好。

3 多尺度热沉散热性能实验研究

3.1 测试验证平台

在仿真分析的基础上,为验证设计方案的可行性与分流网络的均匀性,更好地测量数据参数,从而获得多尺度热沉耦合散热能力的传热特性,进而与仿真分析数据进行验证对比。传统的流量测量方法是在流道中串入流量计进行测试,对系统的流阻特性会造成较大影响,本实验基于文献中提到的小静压测孔布设方式^[20],最小化系统流阻特性,设计了一种简单高效的测试分流均匀性的方法,搭建了实验测试平台,如图 6 所示,测试平台主要包括以下 3 个部分:

1) 驱动部分。外置供液泵,通过泵施加动力,驱动液体在液冷系统的管道内流动,为实验平台提供驱动动力,满足多尺度热沉的入口流量为设定值。

2) 实验部分。通过微型氧化铝高温陶瓷加热片对微通道散热器的基底面进行加热,模拟发热源,进而模拟多尺度热沉冷却散热的过程。

3) 测量部分。主要有多尺度热沉中各测试点所串接的压力计、各温度测试点布局的温度测量仪。

3.2 分流均匀性测试

根据流道总压与流量的映射关系,在讨论分流

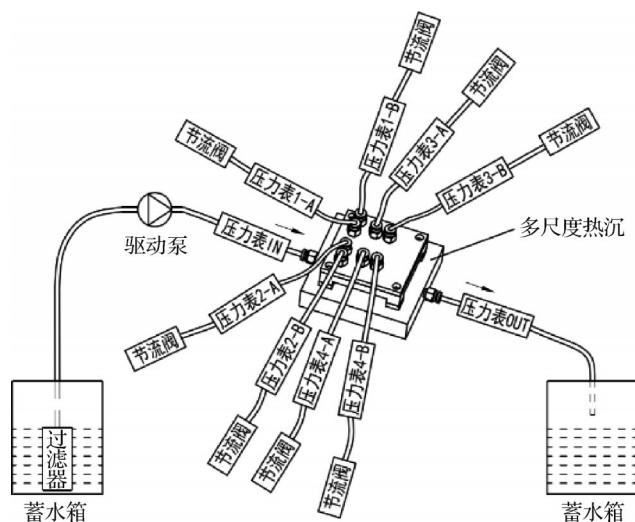


图6 实验测试平台原理

Fig.6 Principle of experimental test platform

网络的分流均匀性时,可以通过4处微通道散热器进、出口处的压差均匀性来进行判断。按测试平台原理搭建液冷循环系统,如图7所示,驱动泵流量设置为 600 mL/min,等流道系统压力平衡后,读取毫米流道上盖布局的微通道进、出口处压力测试点的8处数据,取其差值进行流阻分析。以流道(e)的几何尺寸加工的毫米级、微米级流道零件实物如图8所示。为进一步验证毫米级分流网络的分流均匀性,设置供液泵的流量分别为 500、400 mL/min 进行测试,实测数据如表2所示。

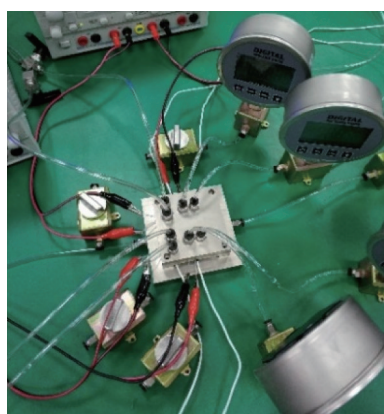
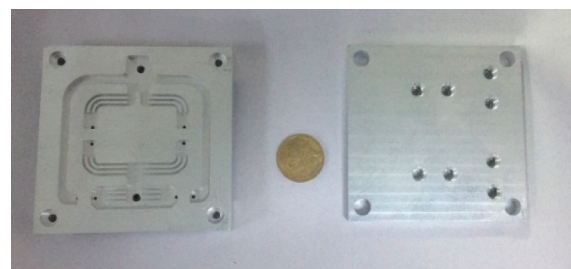


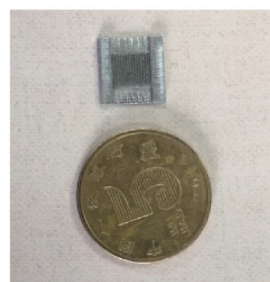
图7 实验测试平台

Fig.7 Photograph of the experimental test platform

从实测数据可知,当热沉进液口流量为 600、500 mL/min 时,4处微通道进、出口压差的最大差异率<3.5%,当流量为 400 mL/min 时,压差的最大差异率<5%。由于数值仿真模型基于理想光滑壁面,未考虑制造粗糙度、焊接易产生的焊料溢料、实验压力表前端供液软管等带来的各类流动损耗,实测压差比仿真压差值略大。从数值变化可知,在供液泵的流



(a) 毫米级流道零件



(b) 微米级流道零件

图8 流道零件实物

Fig.8 Photograph of flow channel component

表2 压差数据测试值

Tab.2 Operation parameters of the air conditioning system in fixed load

流量/ (mL/min)	压差/kPa			
	测点1	测点2	测点3	测点4
600	21.41	21.43	21.01	20.72
500	15.80	15.62	15.53	15.41
400	10.94	10.97	10.55	10.78

量分别为 500、400 mL/min 时,即降为额定值的 83%、67% 时,毫米级流道分流网络的分流均匀性依然很好,但随着供液泵供液流量的减小,流道的分流均匀性会进一步降低。

3.3 温度测试

为验证多尺度热沉样件的散热特性,在整个液冷网络运转的过程中,采用直径为 5 mm 的微型氧化铝陶瓷发热片作为模拟热源,微通道冷板全覆盖4处加热源,通过调节直流稳压电源不同通道的电压^[21],对模拟热源进行供电设定,模拟热源和热电偶采用热电偶胶黏接在对应位置,以减小测量误差^[22],热平衡后,通过微通道处布设的热电偶采集温度数据。模拟热源及热电偶布设实物如图9所示,热电偶测点位置如图10所示。

多尺度热沉入液流量设为 600 mL/min,流体(去离子水)进液温度测为 22℃,环境温度为 22.6℃,对4处热源分别加载电流、电压,测试点温度值如表3所示。

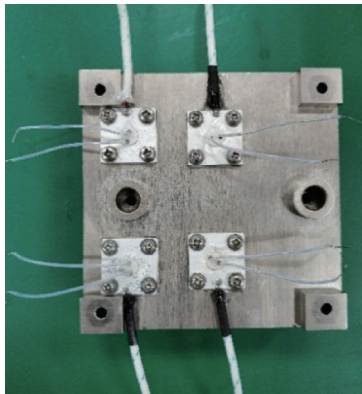


图9 模拟热源及热电偶布设

Fig.9 Layout of simulated heat sources and thermocouples

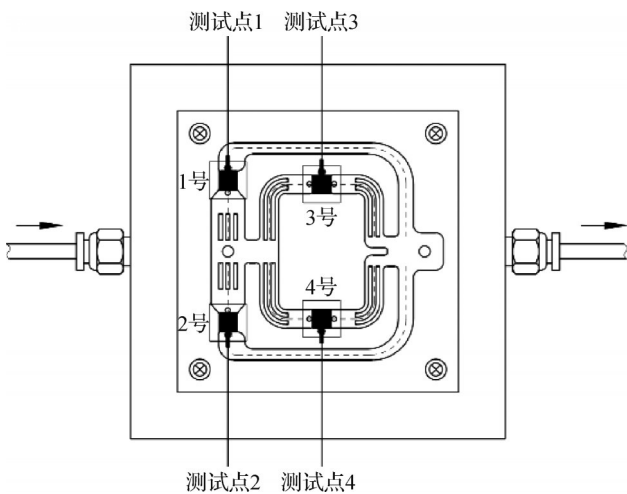


图10 热电偶测点位置

Fig.10 Layout of thermocouple measurement points

表3 温度测试数据

Tab.3 Temperature data under different supply voltages

测试点	电压/V	电流/A	功耗/W	热流密度/ (W/cm ²)	模拟热源 温度/℃
1	2.00	1.53	3.06	15.59	23.01
	2.50	1.86	4.65	23.69	23.22
	3.00	2.13	6.39	32.56	23.51
2	2.00	1.38	2.76	14.06	22.85
	2.50	1.60	4.00	20.38	23.22
	3.00	1.98	5.94	30.27	23.33
3	2.00	1.38	2.76	14.06	22.94
	2.50	1.80	4.50	22.93	23.33
	3.00	2.17	6.51	33.17	24.40
4	2.00	1.40	2.80	14.27	23.24
	2.50	1.60	4.00	20.38	23.53
	3.00	1.95	5.85	29.81	24.11

由表3可知,当热源热流密度最高为33.17 W/cm²时,热沉测试点处稳态温度为24.40℃,测点温度

与进液温度22℃的温差较小,证明该多尺度微通道热沉具有优良的散热效果。选择4处测试点电压分别为2.0、2.5、3.0 V测试组的数据进行分析,4处测试点模拟热源计算功耗分别为11.38、17.15、24.69 W,对应热沉出水端温度分别测得为22.26、22.39、22.52℃,根据热量公式计算流体吸收的热量。

$$Q=Cm\Delta t \quad (6)$$

式中: Q 为热量,J; C 为物质比热容,J/(kg·℃); m 为质量,kg; Δt 为进出液端温差,℃。

在标准大气压下,22℃水的比热容约为4.18×10³ J/(kg·℃),密度约为997.77 kg/m³,整个热沉进口流量为600 mL/min,单位时间的能量为功率,即1 W=1 J/s,可以计算出3种工况下流体带走的热功率分别为10.84、16.27、21.68 W,综合考虑测温设备测量误差及辐射传热等因素影响,可认为计算的热功率与热源设置的总功率接近,循环冷却工质可带走系统近90%的总热量。

4 结论

通过对多尺度热沉的分流均匀性及散热能力进行研究,综合热沉样件在液冷散热系统的实际数据测试,验证了热沉分流网络的均匀性及实际冷却效果。根据仿真及实测数据呈现出的规律,得到如下结论:

- 1)仿真分析中流道压力云图的分析能有效指导液冷分流网络分流均匀性的设计。
- 2)分流均匀性与供液泵供液流量相关,供液泵供液流量减小,流道的分流均匀性会有所降低,为保证分流网络的分流均匀性,整个液冷网络需要保证一定的供液流量。
- 3)在采用液体冷却的热沉形式中,辐射传热占比很小,循环冷却工质可带走系统近90%的总热量。
- 4)微通道冷却热源的测点温度与冷却流体温度温差较小,表明微通道换热能力强,多尺度热沉冷却效果明显。

参考文献

[1] Anandan S, Ramalingam V. Thermal management of electronics: a review of literature [J]. Thermal Science, 2008, 12(2): 5-26.

[2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.

[3] Mehendale S S, Jacobi A M, Shah R K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to

- heat exchanger design [J]. Applied Mechanics Reviews, 2000, 53(7): 175-193.
- [4] Kandlikar S G. Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in minichannel flow passages of compact evaporators [J]. Heat Transfer Engineering, 2002, 23(1): 5-23.
- [5] 陈显才, 林佳, 钟凯超, 等. 硅基微通道热沉制备与液冷散热性能研究[J]. 低温与超导, 2024, 52(9): 52-57. (Chen Xiancai, Lin Jia, Zhong Kaichao, et al. Fabrication of silicon-based microchannel heat sink and study on its heat transfer performance [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2024, 52(9): 52-57.)
- [6] 谭慧, 宗宽, 熊长武, 等. 叶脉型微通道热沉设计及散热特性分析[J]. 工程设计学报, 2019, 26(4): 477-483. (Tan Hui, Zong Kuan, Xiong Changwu, et al. Design and heat transfer performance analysis of leaf vein-shaped microchannel heat sink [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(4): 477-483.)
- [7] 张割, 问建. 微通道液冷冷板的设计与仿真分析[J]. 机械制造, 2019, 57(11): 10-11. (Zhang Ge, Wen Jian. Design and simulation analysis of microchannel liquid cooling cold plate [J]. Machinery, 2019, 57(11): 10-11.)
- [8] 袁培, 常宏旭, 李丹, 等. 微通道平行流换热器流量分配均匀性研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 44-48. (Yuan Pei, Chang Hongxu, Li Dan, et al. The flow distribution uniformity research on the microchannel parallel flow heat exchanger [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(3): 44-48.)
- [9] Pitts D, Sissom L. 传热学[M]. 葛新石, 叶宏, 陈则韶, 译. 2版. 北京: 科学出版社, 2002. (Pitts D, Sissom L. Schaum's outline of theory and problems of heat transfer [M]. Ge Xinshi, Ye Hong, Chen Zeshao, Trans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002.)
- [10] 宋正梅. 有源相控阵天线微通道冷却技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013. (Song Zhengmei. Analysis of cooling performances of microchannel cold plate and its application to active phased array antennas [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.)
- [11] 徐依钒, 郑伟佳, 单明森, 等. 分形结构中流体流动及传热研究综述[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 11-15. (Xu Yifan, Zheng Weijia, Shan Mingsen, et al. Review on fluid flow and heat transfer in fractal structures [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 11-15.)
- [12] 武瞳, 刘益才, 雷斌义. 分形理论及其传热研究现状[J]. 真空与低温, 2015, 21(5): 249-254. (Wu Tong, Liu Yicai, Lei Binyi. Fractal geometry theory and research status in heat transfer [J]. Vacuum and Cryogenics, 2015, 21(5): 249-254.)
- [13] 马欣荣, 白鸿武. 双层Y形分叉仿生微通道换热性能及优化设计[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 112-117. (Ma Xinrong, Bai Hongwu. Heat transfer performance and optimization design of double-layer Y-shaped bifurcation biomimetic microchannel [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 112-117.)
- [14] 别玉, 胡明辅, 毛文元, 等. 并联管组内流量均匀分布的数学模型[J]. 动力工程学报, 2011, 31(4): 279-284. (Bie Yu, Hu Mingfu, Mao Wenyan, et al. Mathematical model for uniform flow distribution in manifolds [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2011, 31(4): 279-284.)
- [15] 唐永乐, 黄华, 胡伟东, 等. 数据中心用分流管流量均匀性及阻力特性的数值研究[J]. 制冷与空调(北京), 2022, 22(4): 78-85. (Tang Yongle, Huang Hua, Hu Weidong, et al. Flow uniformity and resistance characteristics of shunt used for data center [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2022, 22(4): 78-85.)
- [16] 任恒. 某相控阵雷达天线阵面热设计及流量分配研究[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(1): 55-59. (Ren Heng. Thermal design and flow rate distribution of antenna array of phased array radar [J]. Fire Control Radar Technology, 2017, 46(1): 55-59.)
- [17] 赵亮, 田泮, 杨明明, 等. 机载液冷电子设备流量分配计算模型研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(5): 132-134. (Zhao Liang, Tian Feng, Yang Mingming, et al. Research on flow distribution calculation model for airborne electronics equipment with liquid cooling [J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(5): 132-134.)
- [18] 谭慧, 陈加进, 吴龙文, 等. 多热源相控阵天线微通道冷板拓扑结构设计[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(1): 150-155. (Tan Hui, Chen Jiajin, Wu Longwen, et al. Topology design of microchannel heat sink for phased array antenna cooling with multiple sources [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(1): 150-155.)
- [19] 刘亚龙, 陆玥, 张发洋, 等. 相控阵反向并行流道液冷冷板设计与热仿真[J]. 制导与引信, 2020, 41(1): 7-11. (Liu Yalong, Lu Yue, Zhang Fayang, et al. Design and thermal simulation of liquid cooling plate with opposite-parallel flow channel for phased array radar [J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(1): 7-11.)
- [20] 关宏山. 某相控阵雷达液冷流量分配系统研究[J]. 电子机械工程, 2011, 27(4): 9-12. (Guan Hongshan. Study on flow distribution of liquid cooling system for a phased array radar [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(4): 9-12.)

- [21] 王锐, 魏涛, 黄豪杰, 等. 自循环微冷却系统的设计与测试[J]. 现代雷达, 2022, 44(9): 104-107. (Wang Rui, Wei Tao, Huang Haojie, et al. Design and test of self-circulating micro-cooling system[J]. Modern Radar, 2022, 44(9): 104-107.)
- [22] 曹红, 吕倩, 韩宁. 强迫风冷电子设备的热仿真与热测试数据对比分析[J]. 电讯技术, 2008, 48(7): 109-112. (Cao Hong, (Lü Qian, Han Ning. Comparative analysis of heat simulation and heat test data of a forced air cooling electronic equipment[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(7): 109-112.)

通信作者简介

周翔宇, 女, 高级工程师, 中国电子科技集团公司第三十研究所, 13880992129, E-mail: zxy_workincd@163.com。研究方向: 电子设备结构设计及仿真分析工作。

About the corresponding author

Zhou Xiangyu, female, senior engineer, The 30th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 86-13880992129, E-mail: zxy_workincd@163.com. Research fields: electronic equipment structural design and simulation analysis.