

# 大面阵光电芯片散热器 CFD 仿真分析

芮骥才, 张少伟, 高文, 史鸣谦  
上海航天控制技术研究所, 上海 201109  
DOI: 10.61369/ETQM.12233

**摘要:** 光电探测器的靶面规模不断增加, 芯片热耗也逐渐增加, 由此导致暗电流噪声过高使信噪比恶化, 利用流体散热器为芯片带走热量为最高效的散热手段。针对某探测芯片, 设计了三种内流道散热器(蛇形、分形、双螺旋), 并基于 CFD 软件分别对三种散热器进行有限元建模并开展流动换热特性进行热仿真。结果表明, 在流动空间和体积流量均相同的情况下, 分形流道具有更低的压力损失, 螺旋式流道具有最优的温度一致性。

**关键词:** 光电芯片; 流体散热器; CFD; 换热系数; 压力损失

## CFD Simulation Analysis of Large Surface Array Photoelectric Chip Radiator

Rui Jicai, Zhang Shaowei, Gao Wen, Shi Mingqian  
Shanghai Institute of Aerospace Control Technology, Shanghai 201109

**Abstract:** The target surface scale of the photodetector is increasing, and the heat consumption of the chip is gradually increasing, which leads to the high dark current noise to worsen the SNR. The fluid radiator is used to remove the heat of the chip as the most efficient means of heat dissipation. For a detection chip, three kinds of internal flow heat sink (snake, fractal, double helix) are designed, and finite element modeling of three radiators and flow heat transfer characteristics are conducted based on CFD software. It is shown that the fractal flow has much lower pressure loss and the spiral flow space and volume flow have optimal temperature consistency.

**Keywords:** photoelectric chip; fluid radiator; CFD; heat transfer coefficient; pressure loss

随着光学探测系统在各领域的广泛适用, 光学系统的体质、波段、功能均由简入繁, 探测芯片的类型和功能也随之升级换代, 在探测波段细分、像元靶面规模、灵敏度等指标全面提升, 而随着功能迭代, 其发热引入的损害也逐渐成为关注重点, 若无法及时将热量排散, 不仅会引入较强的暗电流, 长久的高温状态更可能导致相敏元热失效<sup>[1-3]</sup>。如图 1 所示为某典型光学系统中的焦面组件构成示意图, 探测芯片与转接板通过金属支架安装焊接, 正面为光敏面, 无法用来设置散热器件, 仅有背部引脚中央区域可供设置热沉。利用有限区域构建流体散热器并进行合理优化可使整个组件温度处于合理范围。本文以该探测器为例, 构建合理的散热器结构, 并开展相应的性能分析。

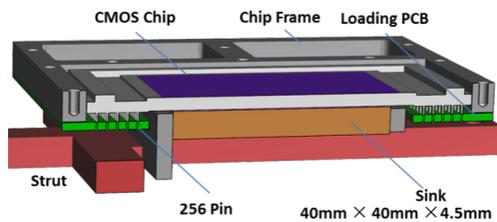


图 1 某焦平面组件截面示意图

### 一、控制方程

散热器内刻蚀微小通道, 并通过泵等增压部件驱动内部单相

液体的流动实现传热, 整个过程遵循 N-S 方程如下<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \rho g_i - F_i &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) &= \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \end{aligned}$$

三个方程分别代表质量、动量和能量守恒。式中  $\rho$  为流体密度,  $t$  为时间,  $u_i$ 、 $u_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的速度分量,  $p$  为静压力,  $\tau_{ij}$  为应力张量,  $g_i$  为  $i$  方向重力分量,  $F_i$  是其它体积力,  $h$  为焓,  $k$  为分子传导率,  $T$  是流体温度,  $k_t$  为湍流传递引入传导率,  $S_h$  为体积热源。

NX软件中的ESC模块是利用集总热容有限差分法对上述NS方程组进行离散,将整个流体域基于能量平衡的原则细分为多个控制体,对每个控制体区域分别适用上述平衡方程并迭代计算<sup>[9]</sup>。

## 二、有限元模型建立

芯片底部针脚中间可用区域仅有40mm×40mm,考虑总重量,设计了三种特征散热器,总厚度均为4.5mm。如图2所示,其中(a)形式为普通蛇形盘管; (b)形式为三级Y状分形,通过制造相同长度路径的支路来实现流阻的一致; (c)形式为双螺旋结构,将入口段与出口段流体高密度耦合,拉平整个空间内的温度梯度。三种散热器共性在于内部流动区域总体积基本一致,均控制在1.5mL左右,这样散热器的重量也会保持相同,为方便将散热器分别编号1~3。

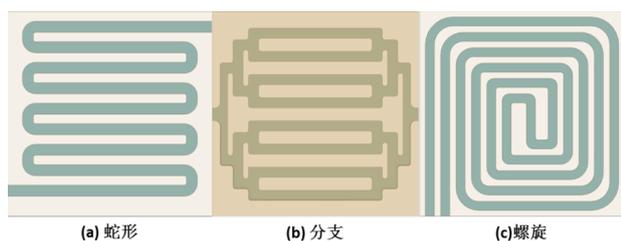


图2设计的三款散热器界面示意图

对三维模型进行必要的处理,如清理螺钉安装孔以及忽略必要的倒角等细节后,建立有限元模型如图3所示,所有流体区域均对曲率半径较小的地方如转弯或者直径突变的部分进行加密,按照1s排空域内体积估算,充分发展流动区域雷诺数Re为100~1000,均处于层流状态,进一步估算得到,边界层厚度约为0.1mm量级,因此对所有壁面边界层网格进行预加密,初始厚度为0.01mm。最终得到的三个有限元网格单元数量分别为47万,53万与49万,无量纲距离 $y^+$ 均为30。

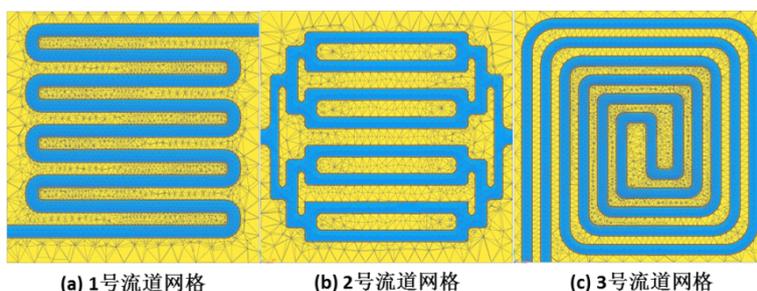


图3散热器与流道的有限元网格划分

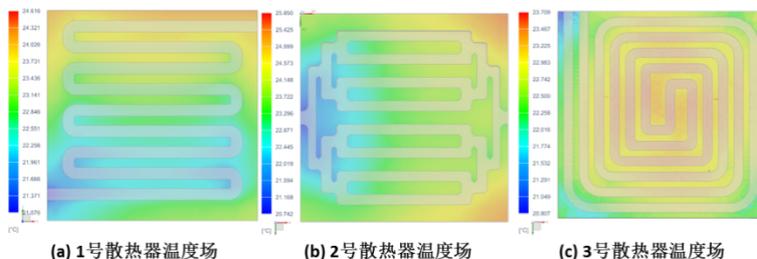


图4各散热器温度场分布

## 三、数值计算方法与边界条件

基于NX中的流求解器对散热器和液体流动区域进行热-流耦合计算,湍流部分采用 $k-\epsilon$ 模型。其中入口部分为恒定体积流量入口,均为0.1L/min,出口设置为开。为凸显流体换热效果的作用占比,将散热器金属部分选取为热导率较低的结构钢(热导率为 $55\text{W/m}\cdot\text{K}$ )而非非常规的纯铜,流体工质选为纯水,光电芯片的热负载均按实际值取20W,均匀施加在散热器+Z面上。仿真类型设定为稳态,迭代时间步长选为0.5s,流动残差收敛精度为 $10^{-4}$ 。

## 四、仿真结果与分析

收敛后的散热器流场温度与速度分布如图4图5所示,将温度和流动数据汇总后如表1所示,从各图表中的相关数据可以得出:

(1) 各流体管路对流动覆盖区域的固体温度降低效果明显,单由于选用的是结构钢作为基板材料,其自身热导率的不足会使整个散热器的厚度以及面向梯度增大,2号换热器的边角区域温升超过 $1^\circ\text{C}$ ,该处温升可通过选用高热导率基材得到抑制。

(2) 整体降温效果最好的为3号(螺旋)散热器,其拓扑分布相当于将1号换热器的冷端和热端施加加热回热效果,拉低了整个芯片安装面上的温度梯度,将 $3.5^\circ\text{C}$ 的温差降低至2.6

(3) 由于总流体区域体积一致且流量相同,因此2号并联换热器的流速度显著低于单管换热器,表1中的压差也很好地反映该结论,且2号换热器的压力损失仅约0.3kPa低于1、3号一个数量级。

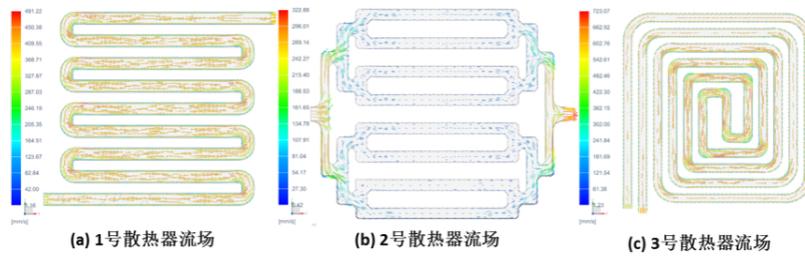


图 5 各散热器流场分布

表 1 仿真结果汇总

	热流面最高温 / $^{\circ}\text{C}$	热流面最低温 / $^{\circ}\text{C}$	压力差值 /KPa
1号散热器	24.6	21.1	2.34
2号散热器	25.8	20.7	0.298
3号散热器	23.7	21.7	6.94

## 五、结论

本文对特定的一款光电芯片通过控制总的流速设计了不同构

型的3款换热器，并基于NX流体模块对其进行了流动和温度仿真，分别对实际散热器的温度分布以及流动特性进行相应分析后得出以下结论。

(1) Y型分支形式的2号散热器具有最低的阻力特性，最适合需要大流量的高热流密度场合，因流道分流而引入的基板覆盖不全可通过选用高导热基板或粘贴高导热界面填料弥补；

(2) 螺旋型散热器具有最优的温度一致性，适合于高温梯度要求的场合，如对焦平面形变一致性要求较高的干涉式测量敏感器。

## 参考文献

- [1]熊平.CCD与CMOS图像传感器特点比较[J].半导体光电,2004,(01):1-4+42.DOI:10.16818/j.issn1001-5868.2004.01.001.
- [2]刘芳,杨志鹏,袁卫星,等.电子芯片散热技术的研究现状及发展前景[J].科学技术与工程,2018,18(23):163-169.
- [3]纪献兵,徐进良,薛强.适用于大功率光电芯片散热的一体化平板热管[J].光电子·激光,2012,23(09):1669-1675.DOI:10.16136/j.joel.2012.09.013.
- [4]李兆,王从思.基于S型与Z型流道冷板的有源相控阵天线热设计研究[B].西安:西安电子科技大学,2014.
- [5]张红兵.基于1-DEAS ESC的微波芯片散热仿真[J].机械设计与制造,2008,(07):31-32.
- [6]赵海涛,李士刚.低温环境下红外辐射标定技术研究[J].飞控与探测,2023,6(01):75-79.
- [7]谈小超,易飞.基于光学天线的多光谱窄带热探测器及其应用[J].飞控与探测,2021,4(02):36-50.