

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0087-04

微通道冷却器的数值分析*

刘婷婷^{1,2}, 高 杨², 李磊民¹, 胡 莉¹

(1. 西南科技大学 信息与控制工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 微通道热沉是制作在硅芯片基底背面的微细通道,其水力直径范围为 $10\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。微通道具有高表面积-体积比、低热阻、低流量等特点,是一种高效散热的解决方案。一个典型应用是激光二极管阵列的致冷。然而,微通道里流体的状态和传热与宏观状态相比有很大不同,有必要开展进一步研究。论文采用商业软件 CoventorWareTM 建立一个平板式微通道的有限元模型,据此对微通道中流体状态及传热进行了数值计算,获得了单个微通道中流场和温度的分布。结果表明,对于 $2\,000\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ 的微通道,能够对 $500\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的热通量快速散热,热阻仅有 $0.042\ 3\ \text{K}/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$ 。

关键词: 微电子机械系统; 微通道; 冷却器

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A

高功率固体激光器在卫星激光通信、材料微细加工、医学科学、大气监测、跟踪侦察和图像信息处理等方面有广泛应用^[1]。20 世纪 80 年代后,随着高功率、高效率激光二极管及其列阵的发展,单个激光二极管的阈值电流大大降低,输出功率成 10 倍增长、使用寿命大大延长,使得激光二极管泵浦固体激光器的研究上了新台阶。激光二极管(LD, Laser Diode)列阵大大提高了输出功率,但是列阵组合的密集程度受到 LD 热效应的限制。

LD 列阵作为泵浦光源,峰值功率密度高,产生的峰值热源也很大。为了对准峰值吸收波长,LD 列阵必须稳定在室温附近工作。LD 列阵的热管理对冷却器提出了极高的要求。1981 年, Tuckerman 提出了微通道冷却器的概念^[2]。微通道热沉含大量高深宽比(HAR)的微通道,冷媒流过微通道时,通过热传递和流体的流动带走激光器件或者电子器件发热产生的废热,可高效致冷,应用于高速电脑芯片、激光二极管列阵、无线电与微波频率放大器等高功率电子器件的热管理。

理论和实验研究结果表明,大多数从宏观尺度得到的流体力学理论,需要经过很大的修改才能用于微流体。传统输运理论并不能解释许多与微尺度流动关联在一起的现象,一种可能的原因是界面效应^[3]。另外,由于 MEMS 的复杂几何形状、加载和边界条件等原因,通过解析方法求封闭解非常困难,因此,有限元法(FEA)被广泛用于 MEMS 的设计分析仿真。本文采用商业软件 CoventorWareTM 建立一种平板式微通道的数值模型,据此对该微通道中流体的状态及传热进行了数值计算,获得了单个微通道中流场和温度的分布。

1 仿真软件

Coventor 公司是全球第一家提供商业化 MEMS 设计软件的公司。2001 年,软件产品更名为 CoventorWareTM。CoventorWareTM 含四个软件模块, ARCHITECT, DESIGNER, ANALYZER 和 SYSTEM BUILDER, 提供了 MEMS 产品设计过程所需的全部功能,软件的特点如下: 模块配置灵活; 可选 Top-Down 或 Bottom-Up 设计流程; “原理级描述仿真”的系统级设计方法; 多能量域耦合分析; 界面友好, 文件管理规范; 支持小组协同设计。

2 物理和数学模型

平板式微通道为单晶硅材料,上盖板为玻璃,选用去离子水(DI water)为冷媒。设微通道为如图 1 所示的矩形截面:高度为 H ,

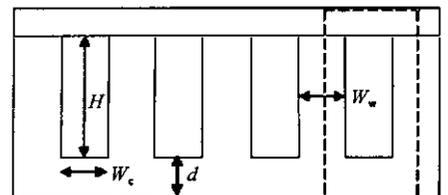


Fig. 1 Physical model of a microchannel.

图 1 微通道的物理模型

* 收稿日期:2004-11-22; 修订日期:2005-01-20

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题(K1303060115);国家 863 计划项目资助课题

作者简介:刘婷婷(1981—),女,四川乐山人,硕士研究生,现从事微通道热沉的设计工作。

高 杨(1972—),男,四川绵阳人,博士后,副研究员,硕士生导师,现从事 MEMS 研发工作。

长度为 L , 宽度为 W_c , 鳍片宽度为 W_w , 鳍片厚度为 d 。其他假设包括: 层流流动、连续介质、均匀的热通量、均匀的入口速率。

利用对称条件, 计算区域包括整个微通道和半个鳍片, 如图 1 中虚线范围所示。在计算区域的底部加上均匀的热通量, 工作温度为室温。

CoventorWare™ 采用流体的控制方程求解流体状态。设流体速度矢量 \mathbf{v} 在三个坐标方向的分量分别为 v_x, v_y, v_z , 压力为 p , 流体的密度为 ρ , 则流体的控制方程如下^[4]。

(1) 连续性方程: 流体流动的连续性方程被用来计算体积流动速率。

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程: 动量方程可用来计算流体作用在固体上的力。

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} = \text{div}(\eta \text{grad } v_x) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z} = \text{div}(\eta \text{grad } v_y) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = \text{div}(\eta \text{grad } v_z) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2c)$$

式中: η 为流体的动力粘度。

(3) 能量守恒方程: 流体动力学中的运动方程是用来计算流体运动与所需驱动力(即压力)之间的关系。

$$\frac{\partial(T)}{\partial t} + \text{div}(UT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \text{grad } T\right) + \frac{S_T}{\rho} \quad (3)$$

固体和流体界面的边界条件是温度和热通量在固流界面上具有连续性, 即

$$T_f = T_s \quad (4)$$

$$k_f \frac{\partial T}{\partial n} = k_s \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

式中: k 是热传导系数, 下标 f 和 s 分别代表流体和固体。

表 1 给出了数值计算模型选用材料的属性。表 2 给出了微通道的几何尺寸。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

property	water	glass	silicon
$\rho/(\text{kg} \cdot \mu\text{m}^{-3})$	9.9982×10^{-16}	2.2250×10^{-15}	2.5000×10^{-15}
$u/(\text{kg} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.0020×10^{-9}	—	—
$k/(\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	5.9840×10^5	1.4000×10^6	1.4800×10^8
$c_p/(\text{pJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	4.1800×10^{15}	8.3500×10^{14}	7.1200×10^{14}

表 2 微通道的几何尺寸

Table 2 Microchannel geometry

	$L/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$W_c/\mu\text{m}$	$W_w/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$
microchannel	2000	500	50	50	50

本文采用的 FEA 计算网格单元类型为 Manhattan bricks。该型网格单元主要用于矩形实体。根据微通道的尺寸, 设定网格大小为 $100 \times 2.5 \times 50$, 微通道 FE 网格化后, 总结点数 11 193, 单元数 9 600。FEA 模型的边界条件是: 在 x 方向上施加 6 m/s 的入口速度, 进入通道的水温为 10°C , 在计算区域的底部施加一个均匀的热通量, 大小是 500 W/cm^2 。对模型加上边界条件后, 使用 CoventorWare™ 的 FEA 求解器求解。

3 仿真结果讨论

图 2 是该模型的速度分布。图中可见, 紧挨微通道壁的流程最低, 接近于 0, 微通道中间的流程最高, 出口处平均速度与入口处相等。速度在 z 平面呈抛物线分布。

图 3 显示了整个模型的温度分布。流体在微通道中流动, 带走来自底部的热量。由于入口处水温较低, 带走的热量要多些, 所以底部温度较低; 沿流线方向, 随着冷却水温度的增加, 带走的热量越来越少, 对底部的致

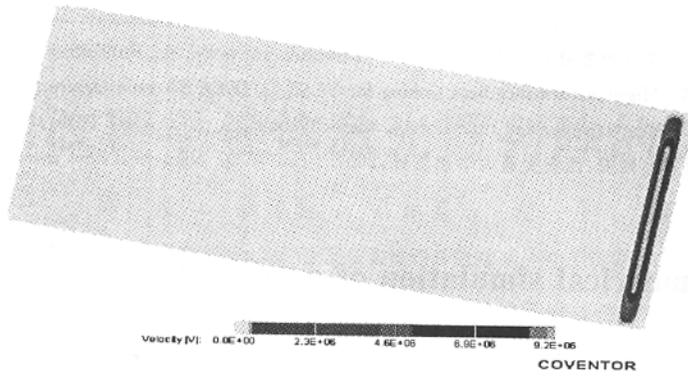


Fig. 2 Velocity distribution of the model along the channel

图2 模型沿着通道的速度分布

冷效果逐渐下降,底部温度随之越来越高。如图3所示,最高温度为314.153 K,发生在模型底部的出口点;该段微通道底部温度共计增长了21.153 K,鳍片与水之间的热阻 $\theta=0.0423 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。

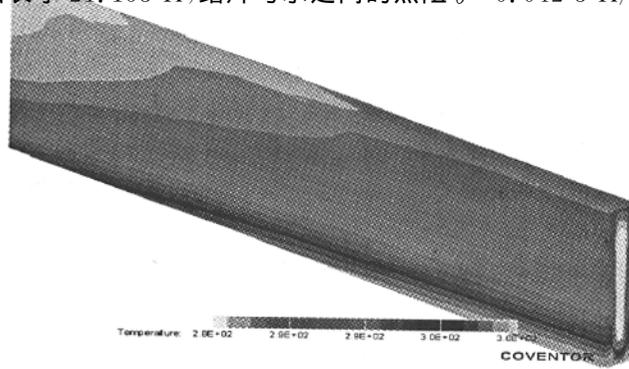


Fig. 3 Isotherm distribution of the model along the channel

图3 模型沿着通道的温度分布

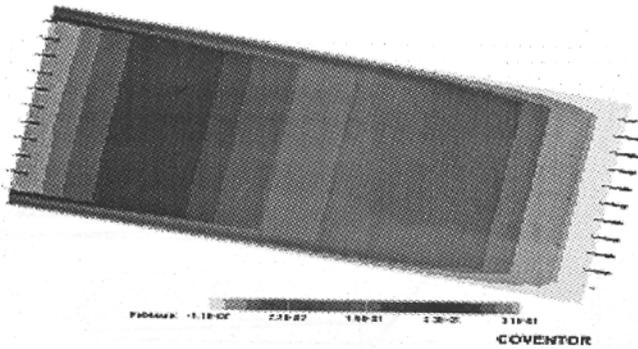


Fig. 4 Coolant pressure contour plot along the channel at $y=50$

图4 冷媒在 $y=50$ 处的压力分布

在研究微通道性质时,压力降是一个比较重要的物理量。图4显示了 $y=50$ 处(即微通道中心截面)流体压力分布的计算结果。可以看出,微通道中的压力降非常小;流体沿流线方向压力逐步减小。

4 结论

根据本文建立的平板式微通道(微通道的几何尺寸是 $2000 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$,鳍片宽度为 $50 \mu\text{m}$,基底厚度为 $50 \mu\text{m}$)模型,FEA 计算结果表明:采用 10°C 的去离子水作为冷媒,以 6 m/s 的速度流入微通道,能够对 $500 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的热通量快速散热,并且硅底部的温升只有 21.153°C ,流体与固体间的热阻也很小,仅有 $0.0423 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$,能够满足大多数器件的散热要求。

对于某些散热要求特别高的器件,例如激光二极管阵列,可以调整微通道的几何尺寸、入口速度、入口水温等参数来调整微通道的性能,以满足激光二极管阵列的散热要求。

参考文献:

- [1] 江剑平. 半导体激光器[M]. 电子工业出版社, 2001. (Jiang J P. Semiconductor laser[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2001)
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 2: 126—129.
- [3] Mala G M, Li D and Dale J D. Heat transfer and fluid flow in microchannels[J]. *Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 3079—3088.
- [4] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (Tao W Q. Numerical heat transfer. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001)

Numerical simulation of a microchannel cooler

LIU Ting-ting^{1, 2}, GAO Yang², LI Lei-min¹, HU Li¹

1. *Information and Control Engineering College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;*
2. *Institute of Electronic Engineering, CAEP, P. O. Box 919-512, Mianyang 621900, China)*

Abstract: Microchannel heat sinks are minute channels fabricated onto the back of the thin silicon chip substrate with hydraulic diameter ranging from 10 to $10^3 \mu\text{m}$. Microchannels have the advantage of large surface area to volume ratio, low thermal resistances and low flux, so they are thought to be an effective solution in dissipating thermal. One typical application is the cooling of the laser diode arrays. Because flow and heat transfer in microchannel are different from those in macro one, further research is necessary. An FEA (finite element analysis) model of a flat plate microchannel is set up in this paper using commercial software CoventorWareTM to investigate the localized flow and heat transfer in a single microchannel, computation results are also presented and analyzed. Microchannel is 2 000 μm long, 50 μm wide and 500 μm high. It can dissipate heat flux of 500 W/cm^2 fast and the thermal resistance is only 0.0423 $\text{K}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$.

Key words: Micro Electromechanical System; Microchannel; Cooler

