

# 高功率半导体激光器微通道热沉的模拟优化

张冬云, 谢印开, 李丛洋, 曹玄扬, 徐仰立

北京工业大学激光工程研究院, 北京市数字化医疗 3D 打印工程技术研究中心, 北京 100024

**摘要** 针对原 curamik 微通道热沉因进水通道流量不均而导致散热不均匀的现象, 基于 FLUENT 软件对其进行数值模拟。从内部结构及热沉材料方面提出优化方案, 并进一步获得在热沉高度和进出口宽度为固定值的条件下, 微通道宽度、间距及通道脊长度 3 个因素分别对芯片表面温升和压降的影响规律。根据优化的参数, 通过选区激光熔化技术制备获得纯镍微通道热沉并进行芯片封装测试。结果显示, 微通道热沉散热均匀, 热阻为 0.39 K/W, 压降为 140 kPa, 能够满足输出功率为 80 W 的半导体激光器单巴条芯片的散热要求。

**关键词** 激光光学; 微通道热沉; FLUENT 软件; 散热性能; 纯镍粉

**中图分类号** TN248.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0202008

## Simulation and Optimization of High Power Semiconductor Laser Microchannel Heat Sink

Zhang Dongyun, Xie Yinkai, Li Congyang, Cao Xuanyang, Xu Yangli

Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China

**Abstract** Aiming at the uneven heat dissipation induced by the uneven water channel flow of microchannel-heat sink for original curamik, the numerical simulation based on FLUENT software is carried out. Optimization scheme is proposed from the aspect of internal structure and the heat sink material. The influence of the microchannel width, interval and microchannel ridge length on the chip surface temperature rise and pressure drop are obtained, when the heat sink height and the width of the import and export are invariant. Based on the optimized parameters, the pure Ni microchannel heat sink is manufactured by selective laser melting technology, and the chip is packaged and tested. The results show that thermal resistance of microchannel heat sink reaches 0.39 K/W, the pressure drop reaches 140 kPa, which can meet the need of 80 W semiconductor laser cooling requirements.

**Key words** laser optics; microchannel heat sink; FLUENT software; thermal performance; Ni alloy

**OCIS codes** 140.3320; 140.6810; 140.5960

## 1 引言

高功率半导体激光器具有转换效率高、体积小、寿命长、可靠性高等优点, 广泛应用于激光医疗、航空航天及工业加工等领域<sup>[1-3]</sup>。在其工作过程中, 高散热量如不及时排出, 会导致阈值电流升高, 效率降低, 激光波长发生温漂等现象, 从而影响到激光的光束质量<sup>[4]</sup>。解决芯片散热问题是半导体激光器发展的一个重要研究内容, 微通道热沉因具有结构简单、紧凑、单位体积散热能力强等特点, 已成为高功率半导体激光器高性能工作的关键器件<sup>[5-6]</sup>。

目前国内外对于微通道热沉的研究主要集中在热沉内部结构的优化、微通道的流场流动传热特性及微通道热沉材料等方面<sup>[7-10]</sup>。Bejan 等<sup>[11]</sup>对应用在电子散热器上的平行平板组合热沉结构进行理论分析, 提出最优的通道长度与间距比值及单位体积最大换热量的表达式。Yilmaz 等<sup>[7]</sup>对等边三角形、方形、圆形及其平行平板等几何结构管道进行了分析并提出了相应的最佳截面形状经验公式。虽然上述研究采用计算

收稿日期: 2016-09-29; 收到修改稿日期: 2016-11-25

作者简介: 张冬云(1969—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事金属 3D 打印方面的研究。E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

流体动力学(CFD)有限元方法、热力学方法等模拟计算得出大量的微通道热沉优化结构,但是鉴于其复杂性,利用传统的制造方法如激光切割、线切割、微电子机械系统(MEMS)、叠片焊接以及化学腐蚀等,很难将其付诸于实物制造,文献中也很少提及实际的冷却效果<sup>[12]</sup>。而且受传统加工方法制造能力的限制,在实际的微通道结构设计中,大部分都采用通道间距与通道宽度相同的思路,单因素对微通道热沉冷却能力的影响研究较少,从而限制了结构设计的灵活性。此外考虑到冷却能力和可加工性的要求,热沉材料大多选为无氧铜类,其他材料研究较少。选区激光熔化技术(SLM)的发展,不仅为成形制造具有复杂内腔结构的微通道热沉提供了可能,而且可以加工传统方法难以熔化的金属材料,由此摆脱了传统加工方法对复杂热沉结构设计、制造的束缚,同时也促进了对其他新型热沉材料的研究。

以纯镍为微通道热沉材料,基于FLUENT软件对现有的 curamik 热沉进行数值模拟并优化,得到在微通道高度及进出口宽度为固定值的条件下,微通道宽度、微通道间距及通道脊长度等三个单因素对芯片表面温升、压降以及散热性能的影响规律。最终获得优化的热沉参数、结构并进行了热沉的制造及冷却性能的检测。

## 2 微通道热沉结构模型的建立及网格划分

目前发展比较成熟的微通道热沉,通常由具有高热导率的无氧铜片制成,包含十几个尺寸为  $10 \sim 1000 \mu\text{m}$  的通道,冷却剂在微通道内部流动换热,将贴在热沉上的半导体激光芯片产生的热量带走,使其冷却<sup>[13-14]</sup>。本文研究的半导体激光器芯片 curamik 微通道热沉如图 1 所示,其外形尺寸为  $21.6 \text{ mm} \times 11.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ,共分为 5 层:上下盖板、进水层、返水层和中间隔板层。

由于微通道热沉为对称结构,为了简化 CFD 模型,建模时精简掉无通道的实体区域,并根据对称结构直接画出所需的具有微通道结构部分的 1/2,即图 2(a)中的红色框选部分。图 2(b)为精简后的几何模型。

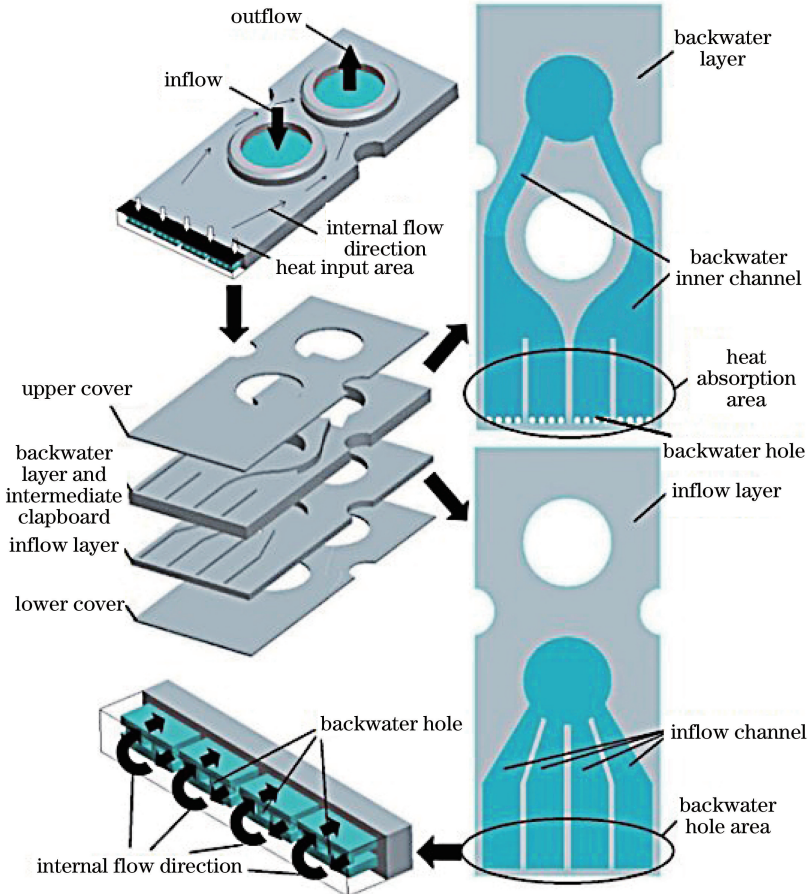


图 1 微通道热沉结构示意图

Fig. 1 Structure of microchannel heat sink

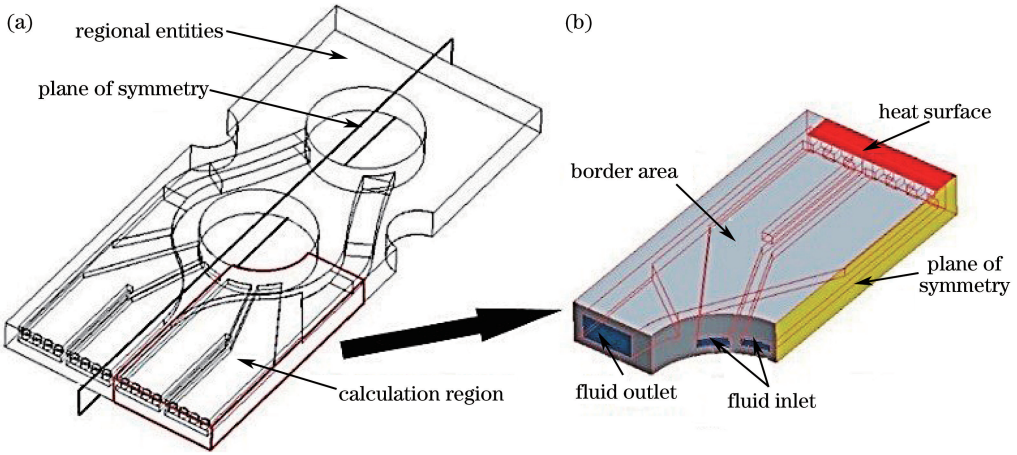


图 2 热沉数值模拟基本几何结构。(a)实体区域;(b)简化后

Fig. 2 Basic geometry of heat sink for numerical simulation. (a) Entity region; (b) after simplification

在选取热沉材料时,通常要考虑材料的热导率和线性热膨胀系数。材料的热导率越高,热阻越小,传热效率也就越高,同时要保证所选热沉材料的线性热膨胀系数与外延片半导体芯片材料线性热膨胀系数有良好的匹配性。如果它们的热膨胀系数不同,会导致受热变形量不同,从而在外延材料与热沉材料之间产生应力,引发 smile 效应<sup>[15]</sup>,进而拉伤激光器芯片,劣化激光器的光电特性;如果应力过大,甚至会导致激光器芯片断裂,造成激光器突然失效。综合考虑多种因素,如铜(热膨胀系数为  $17.5 \times 10^{-6} \text{ m/K}$ )对于激光具有较高反射率,而且其线性热膨胀系数与半导体芯片材料有很大的差别,采用了纯镍(热膨胀系数为  $13 \times 10^{-6} \text{ m/K}$ )作为加工微通道热沉的材料,因为与铜相比,其具有与半导体芯片材料(热膨胀系数为  $6 \times 10^{-6} \text{ m/K}$ )更相近的线性热膨胀系数,其成分如表 1 所示。

表 1 纯镍粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical component of the pure Ni powder (mass fraction, %)

Ni	Co	Fe	Cu	P	Mg	C	S	O
99.7261	0.1	0.03	0.02	0.01	0.002	0.01	0.0019	0.1

计算流体力学的本质是在规定区域内对控制方程在离散的点或区域内进行计算,从而转变为定义在各网格或子区域内的代数方程组,然后用线性代数的方法迭代求解<sup>[16]</sup>。所以在 FLUENT 求解前,需要将三维的模型进行网格划分再导入。网格的划分质量会直接影响到计算精度以及是否可以得到收敛解,高质量的网格划分通常需要经过数次数值模拟并不断修正,最终得到较为合理的网格。另外网格某处过疏或过密,都会导致最后的计算出错或耗时过长导致电脑内存溢出,终止计算。根据网格生成的要求,本次网格划分采用混合网格,在平整表面处采用结构化网格,便于计算垂直于流道方向上的一阶导数,简化计算量,而在远离入口处和拐角等处加入非结构网格,并且建立不同区域内交界面处计算节点的连接关系。经过多轮试算,最终确定划分参数,总的网格数为 868587。

### 3 热沉内通道流动与传热分析及结构优化

#### 3.1 微通道热沉散热不均匀原因分析

依次建立热沉的控制方程,确定边界及初始条件,并利用 CFD-post 软件模块显示和处理输出的计算结果,得到原 curamik 微通道热沉模拟结果如图 3 所示。从图 3(a)压力云图中可以看出,热沉的进出口压降较大,达到 1.17 kPa;图 3(b)速度云图显示进水通道和返水通道内的水流速度分布不均匀,从而在一定程度上致使图 3(c)中出现 A 区和 B 区,即芯片热源面温度相差明显的现象,平均差值接近 20 K。随后分析了进水通道及返水孔水流速度与出现温差之间的关系,获得了进水通道及返水孔的水流速度切面图,见图 4。从图 4(a)可以看出,a 处的进水通道水流速度要小于 b 处,致使近芯片热源面通道处 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 区域的水流速度和 B 区域明显不同,平均依次相差 0.7 m/s 左右;同时图 4(b)中 1~7 返水孔的平均水流速度依次递增,从



而导致图 3(c)中 A 区和 B 区温度不均匀。此现象可能是原热沉结构存在设计缺陷造成的。由于结构设计的缺陷,造成进水通道处压力、进水通道和返水孔内水流速度不同,导致芯片产生的热量不能均匀、快速扩散,因此需要在结构上进行优化,使进水通道、返水孔内水流速度分布均匀,从而达到散热均匀的目的。

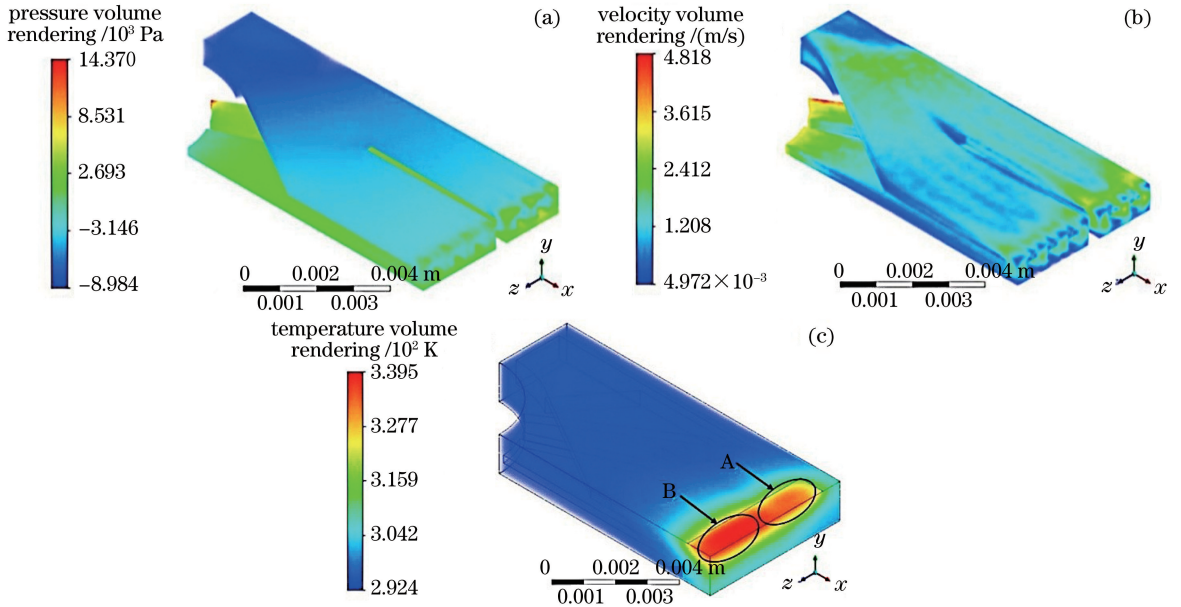


图 3 原 curamik 微通道热沉模拟云图。(a)压力;(b)速度;(c)温度

Fig. 3 Simulation of curamik microchannel heat sink. (a) Pressure; (b) speed; (c) temperature

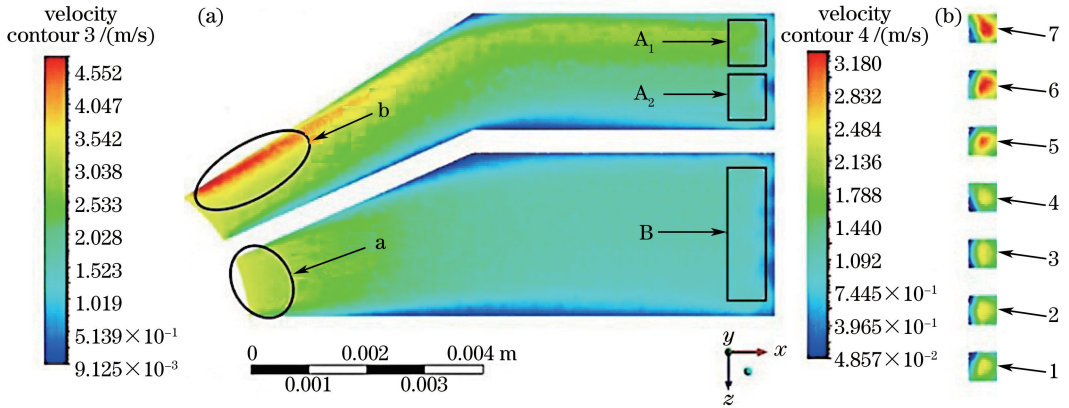


图 4 进水通道及返水孔速度平面图。(a)进水通道速度切面图;(b)返水孔速度切面图

Fig. 4 Speed figure of inflow channel and backwater hole. (a) Speed figure of inflow channel; (b) speed figure of backwater hole

### 3.2 进水层通道结构改进方案

图 5 为进水层流速均匀结构优化方案示意图,由于进水口是圆弧面,所以入口的水流都沿圆弧面法线方向向外发散流出,图 5 进水口 d 处彩色箭头表示该处的水流速度方向,c 处的水流方向本应如该处箭头方向所示,但因  $L_1$  边界壁面的限制使其方向改变。受到限制区域的水流因其方向的改变而速度增加,从而出现图 4 中 b 区域的现象。因此优化时将原结构边界面  $L_1$  方向改为  $L_3$  方向,这样就保证入口的水流方向均与圆弧面法线方向相同。修改后进水口的尺寸变小,但在相同流量下,水流速度提高,换热效率增加。在结构优化过程中,为了避免进水口水流速度受影响而去掉 e 处通道脊壁面,并使平行通道脊 f 的长度沿着圆弧 g 方向逐渐增加,以适应进水口处的圆弧状水流,这样返水孔的水流量就会平均分配。其中圆弧 g 平行于进水口。此外还去掉了原返水层通道脊,以避免返水层固液部分相互制约引起导热不均,经优化后的通道结构如图 6 所示。在上述的模拟条件下,对优化的结构进行仿真模拟,得到进水通道和返水孔速度切面图,如图 7 所示。



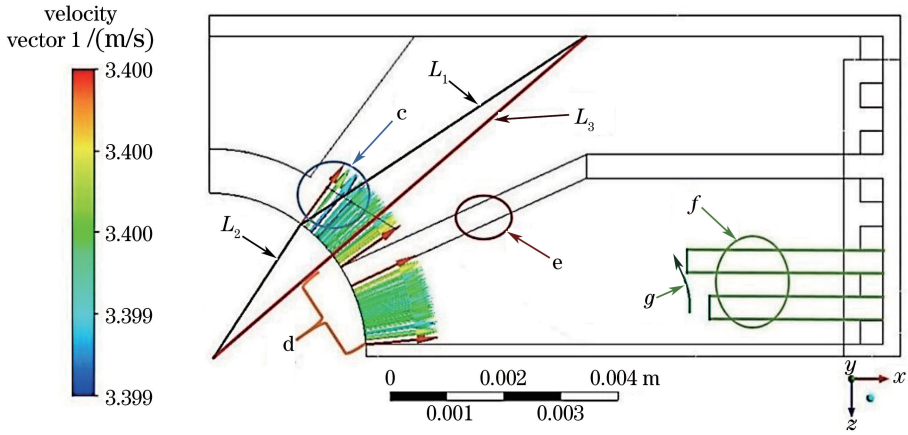


图 5 进水层流速均匀结构优化图

Fig. 5 Rate uniform structure optimization of inflow layer

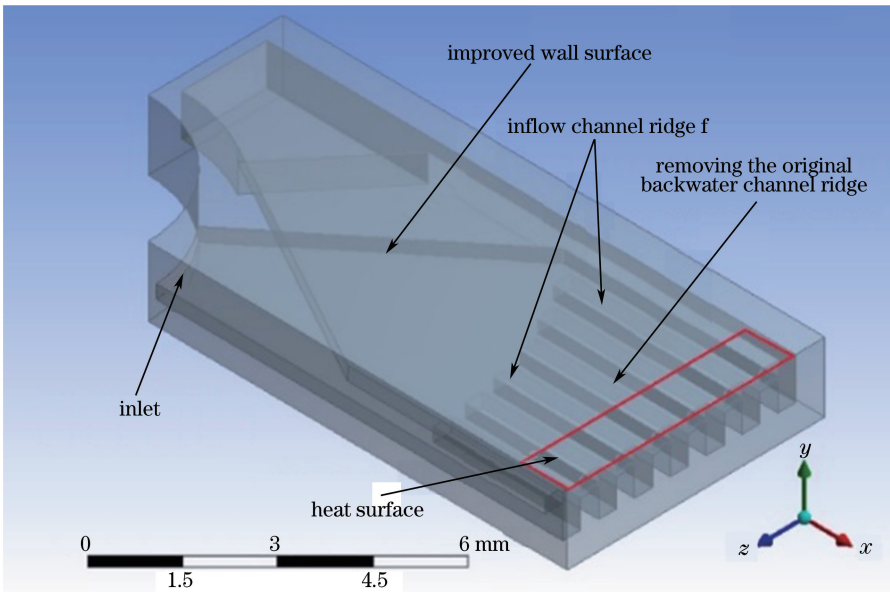


图 6 结构优化后微通道热沉结构示意图

Fig. 6 Structure of microchannel heat sink after structure optimization

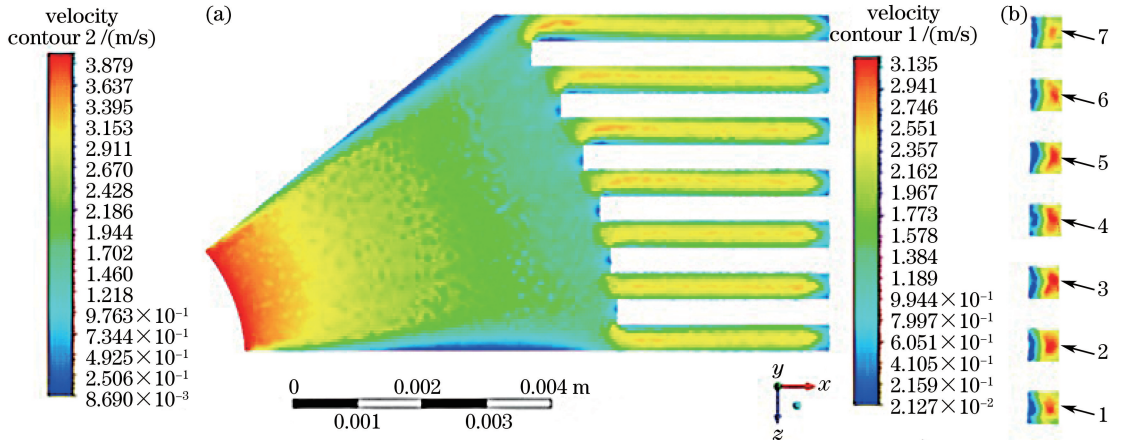


图 7 (a) 进水通道速度切面图; (b) 返水孔速度切面图

Fig. 7 (a) Speed figure of inflow channel; (b) speed figure of backwater hole

从图 7 中可看出,图 7 (a)中进水通道的速度均匀,修改后的壁面不再阻挡进水方向,使之速度增大,而通过结构优化的递增进水通道脊起到了很好的分流效果,使图 7 (b)中返水孔的水流速度均匀,其压力、速度和温度云图如图 8 所示。

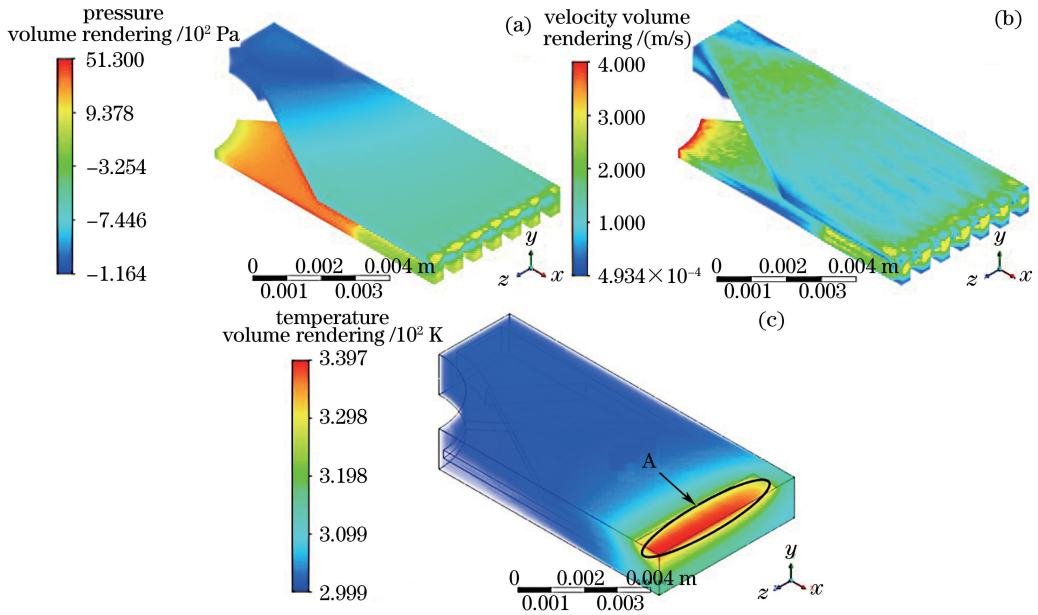


图 8 优化进水层后微通道热沉模拟云图。(a)压力;(b)速度;(c)温度

Fig. 8 Simulation of microchannel heat sink after optimization the inflow. (a) Pressure; (b) speed; (c) temperature

从图 8 可知,压力云图中热沉的进出口压降稍微变大,达到 1.25 kPa,这说明增加内部通道脊会增加进出口压降。速度云图所示进水通道和返水通道速度均匀,各通道流量相近,散热效果相近。温度云图中可看到 A 区热源面温度均匀,达到均流均温的效果。热沉结构优化前后 7 个通道平均速度对比如图 9 所示,其中 A 曲线为结构优化前各通道流速,曲线 B 为结构优化后各通道流速。

通过对比模拟前后的结果可以看出,结构优化后的热沉入口对冷却水具有良好的约束作用,使得入口处水流的压力均匀分布、水流流速均匀,从而使热沉获得均匀的冷却效果。

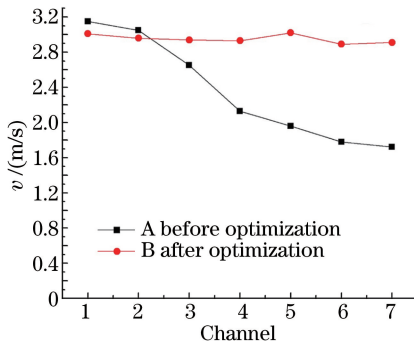


图 9 各通道优化前后流速对比

Fig. 9 Flow rate comparison of each channel before and after optimization

### 3.3 热沉微通道宽度和间距对换热影响分析

影响微通道热沉散热性能的因素主要有:冷却剂材料,热沉制造材料和微通道槽的长度、宽度、深度,间距以及流量均匀性,冷却剂进出口宽度等。由于部分参数已经确定,因此主要研究微通道宽度、间距以及微通道长度对热沉散热性能的影响。微通道宽度、间距以及长度的改变,会影响冷却剂与固体壁面的热交换面积及传热效率,从而影响热沉热阻。研究表明,在一定范围内增大高宽比有利于增加热沉换热面积,降低热沉热阻,提高换热效率<sup>[17]</sup>。因此在微通道高度一定的条件下,存在最优微通道宽度  $W_1$  和微通道间距  $W_2$ ,使热沉换热效率相对较高,热阻相对较低,压降相对合适。以 curamik 热沉通道高度为 0.3 mm,返水孔尺寸

(即微通道宽度)为 0.4 mm,微通道间距为 0.4 mm 的微通道尺寸为基础,运用控制变量法,研究在微通道宽度  $W_1=0.4$  mm 条件下,微通道间距  $W_2$  单个因素对热沉换热的影响,以及微通道间距  $W_2=0.4$  mm 条件下,微通道宽度  $W_1$  单个因素对热沉换热影响,具体参数变化如表 2、3 所示。

表 2 不同微通道间距  $W_2$  参数

Table 2 Different microchannel intervals  $W_2$

$W_1$ /mm		$W_2$ /mm			
0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

表 3 不同微通道宽度  $W_1$  参数

Table 3 Different microchannel intervals  $W_1$

$W_2$ /mm			$W_1$ /mm		
0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

根据表 2,设计了 5 组不同微通道间距的三维模型进行模拟,并根据得到的 5 组模拟效果图得出芯片温升、压降与微通道间距的关系,如图 10 所示。从图 10(a)中可以看出,在微通道宽度一定的条件下,随着微通道间距的不断减小,热沉表面温升不断减小。因为热沉结构尺寸固定时,间距减小,通道数目增加,单位体积内换热表面积变大,但微通道脊表面是主要的换热区域,热量由脊导入,脊太薄会导致导热效果变差,不利于换热,所以温升减小幅度降低。按照 1 bar=100000 Pa 换算得到图 10(b)压降与微通道间距之间的关系图。可以看出,随着微通道间距增加,压降变大,这是由于通道宽度不变,间距增大,脊的体积增大,通道减小,流体受脊的阻力影响明显。

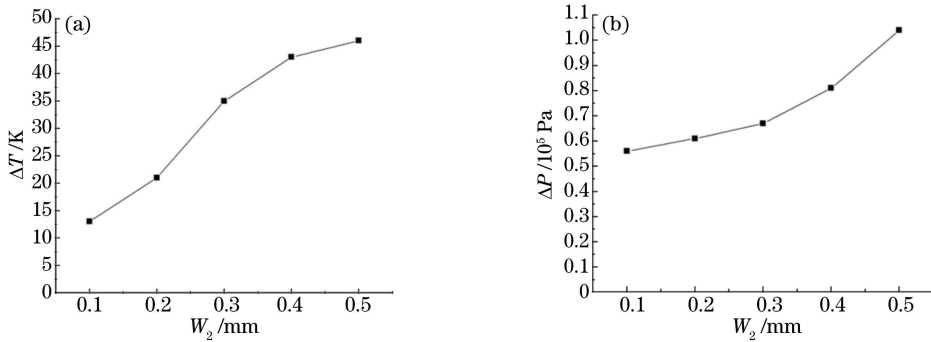


图 10 (a)芯片温升与微通道间距关系曲线;(b)芯片压降与微通道间距关系曲线

Fig. 10 (a) Temperature rise of chip versus the intervals of microchannel; (b) pressure drop of chip versus the intervals of microchannel

同样地根据表 3,设计 5 组不同微通道宽度的三维模型进行模拟,并根据所得到的 5 组模拟效果图总结出芯片温升压降与微通道宽度的关系,如图 11 所示。从图 11(a)中可以看出,在微通道间距一定的条件下,随着微通道宽度的不断减小,热沉表面温升不断减小;高度一定时,通道宽度越小,高宽比越大,通道内壁面与去离子水换热面积越大,换热效率越高,水的利用率越高,从而热沉整体对芯片的散热性能越高,芯片的表面温升越小。但微通道减小势必会引起压降的增加,换算得图 11(b)压降与微通道间距关系,随着微通道宽度的减小,微通道内水流量减少,进水口附近区域水积攒造成压强增大。当微通道宽度大于 0.3 mm 以后,压降变化趋势减缓。

微通道热沉结构参数对其散热性能起着决定性的作用,优化的目的是降低芯片表面温升,降低内部压降,但实际中往往不能同时满足,需综合考虑兼顾选择。根据微通道间距与温升压降关系可知,相对来说,0.2 mm 间距温升 25 K 左右,压降比 0.1 mm 间距增加较少,考虑稳定性,选取微通道间距为 0.2 mm 较合适。根据微通道宽度与温升压降关系可知,0.3 mm 宽度温升 30 K 左右,压降较小。因此在特定条件下,优化尺寸是微通道宽度 0.3 mm,微通道间距 0.2 mm。

### 3.4 返水层通道脊长度对流动和换热影响分析

返水层微通道的长度  $L$  是影响微通道散热性能的一个重要结构尺寸因素,可以通过影响热沉压降进而影响热沉散热性能。由于此类热沉按照工作时的摆放方式,结构是进水层在下,返水层在上,芯片的热量首



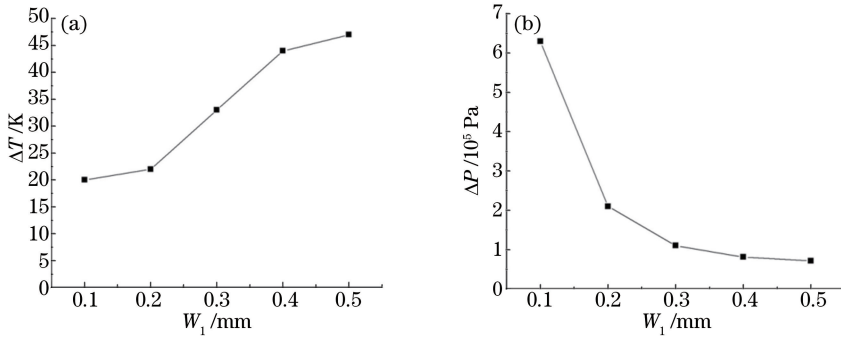


图 11 (a) 芯片温升与微通道宽度关系曲线; (b) 芯片压降与微通道宽度关系曲线

Fig. 11 (a) Temperature rise of chip versus the widths of microchannel; (b) pressure drop of chip versus the widths of microchannel

先经热传导进入返水层,因此返水层换热量占较大比例,考虑到去掉原返水层通道脊后,热沉后期表面处理时强度不够,随后添加等长度的返水层通道脊,其微通道宽度  $W_1'$  及间距  $W_2'$  与进水层相同,并研究返水层通道脊长度对流动和换热的影响,具体参数设置如表 4 所示。

表 4 不同微通道脊长度  $L$  参数

Table 4 Ridge length  $L$  of different microchannels

Invariant /mm	$L$ /mm				
$W_1' = W_1 = 0.3$	0	1	2	3	4
$W_2' = W_2 = 0.2$					

根据模拟所得到的效果图得出芯片温升压降与微通道长度的关系,如图 12 所示。从图 12(a)中可以看出,芯片表面温升随着微通道脊长度增加而减小,原因是此芯片属于短腔长,一定条件下,增加微通道脊长度有助于换热<sup>[18]</sup>。但由于纯镍材料导热性能较铜差,一定距离后导热效果提升不明显,所以长度超过 3 mm 后温升趋于稳定。如图 12(b)所示,随着微通道长度增加,压降呈增大趋势,但增幅逐渐减缓。这是由于,前期增加长度改变内部水流方向和状态,压力变化明显,一定距离后方向确定变化不再明显。综合考虑对比,通道长度尺寸选为 3 mm。

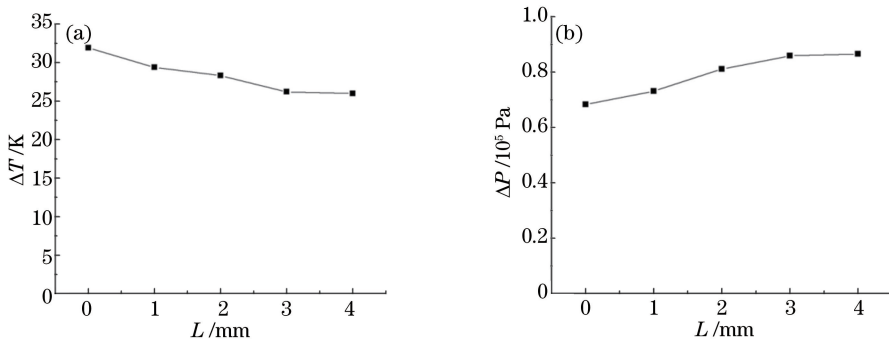


图 12 (a) 芯片温升与通道脊长度关系曲线; (b) 芯片压降与通道脊长度关系曲线

Fig. 12 (a) Temperature rise of chip versus the ridge length of microchannel; (b) pressure drop of chip versus the ridge length of microchannel

综上所述,对现有的 curamik 热沉进行内部结构优化后,分析得到特定外形尺寸下优化的通道结构参数。具体为通道宽度  $W_1 = 0.3$  mm,通道间距  $W_2 = 0.2$  mm,通道脊长度  $L = 3$  mm。优化后的微通道热沉的理论热阻为 0.34 K/W,压降为  $0.9 \times 10^5$  Pa。

#### 4 纯镍微通道热沉的制造及检测

图 13(a)为通过选区激光熔化成型的纯镍微通道热沉,由于封装要求热沉外表面粗糙度到达  $1.0 \mu m$ ,因此需要对热沉表面进行抛光。图 13(b)为物理和化学抛光后的热沉,安装巴条的表面边缘关键棱的半径进

行非常精确的加工处理后平整度达亚微米级,外形尺寸达到 21.6 mm×11.5 mm×1.5 mm。实验用国产 AlGaAs/GaAs 激光巴条宽为 1 cm,腔长为 1 mm,条宽为 100 μm,填充因子为 20%,电流为 80 A,额定中心波长为 975 nm,用钢将其焊接到微通道热沉表面进行通电测试。

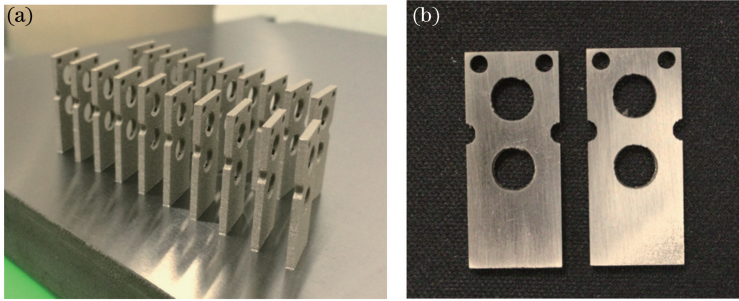


图 13 纯镍微通道热沉。(a)抛光前;(b)抛光后

Fig. 13 Pure Ni microchannel heat sink. (a) Before polishing; (b) after polishing

根据定义,器件整体热阻  $R_{th}$  可表示为

$$R_{th} = \Delta T / \Delta W = (\lambda_1 - \lambda_2) / A(W_1 - W_2), \quad (1)$$

式中  $\Delta T$  为温度变化量,  $\Delta W$  为热功率变化量,  $\Delta\lambda$  为波长变化量,  $A$  为激光巴条温漂系数。实际中采用 AlGaAs/GaAs 激光巴条,  $A$  取 0.3 nm/K<sup>[19]</sup>。图 14 为通电电流分别为 15 A 和 55 A 时激光巴条输出光谱曲线。根据 15 A 和 55 A 时激光输出光谱中心波长的变化量为 4 nm, 热功率变化量为 34 W 可计算出热阻为 0.39 K/W。该值大于模拟计算所得热阻 0.34 K/W, 主要是由于计算中忽略了激光巴条自身热阻、焊料热阻及芯片与热沉之间的界面热阻。在去离子水泵流量设定为 0.3 L/min 的条件下, 热沉进出口压降约为 140 kPa, 大于热沉模拟压降 90 kPa, 这是由于制备成型的热沉通道粗糙度较大, 模拟计算效果并不能完全符合, 另外实际应用中增大压降的因素较多模拟时未被考虑到。通过结构优化和制备成型的微通道热沉散热性能能够满足输出功率 80 W 的半导体激光器单巴条芯片, 实际芯片温升 18 °C~20 °C, 压降 140 kPa。激光特性稳定良好。

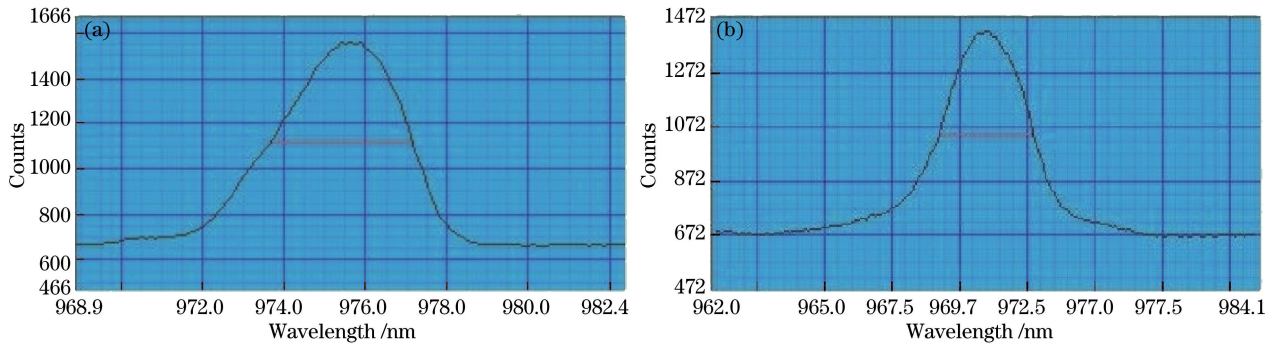


图 14 不同通电电流下的输出光谱曲线图。(a)  $I=15$  A; (b)  $I=55$  A

Fig. 14 Output spectrum at different currents. (a)  $I=15$  A; (b)  $I=55$  A

## 5 结 论

基于 FLUENT 软件对现有的 curamik 热沉进行数值模拟优化并制造检测, 提出改进方案优化进水层通道结构, 使进水通道及返水孔流量均匀化, 并得到在微通道高度和进出口宽度为固定值的条件下微通道宽度、间距及通道脊长度 3 个因素分别对芯片表面温升和压降散热性能的影响规律。获得特定外形尺寸下优化的内通道结构尺寸参数, 并根据优化的参数制备获得纯镍微通道热沉, 利用宽为 1 cm、腔长为 1 mm、条宽为 100 μm、填充因子为 20% 的激光巴条进行芯片封装测试, 外形尺寸达到 21.6 mm×11.5 mm×1.5 mm。微通道热沉热阻为 0.39 K/W, 压降 140 kPa, 实际芯片温升 18 °C~20 °C, 能够满足输出功率 80 W 的半导体激光器单巴条芯片散热要求。

## 参 考 文 献

- [1] König H, Grönninger G, Brick P, *et al.* Brilliant high power laser bars for industrial applications[C]. Proc SPIE, 2008, 6876: 687616.
- [2] Lichtenstein N, Krejci M, Manz Y, *et al.* Recent developments for BAR and BASE: setting the trends[C]. Proc SPIE, 2008, 6876: 68760c.
- [3] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 32(2): 189-194.  
马骁宇, 王 俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 32(2): 189-194.
- [4] Li Jiang, Li Chao, Xu Hao, *et al.* Thermal analysis of high power semiconductor laser bar[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(12): 1474-1479.  
李 江, 李 超, 徐 昊, 等. 高功率半导体巴条激光器的热特性分析[J]. 发光学报, 2014, 35(12): 1474-1479.
- [5] Beach R, Bennett W J, Freitas B L, *et al.* Modular microchannel cooled heatsinks for high average power laser diode arrays[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 966-976.
- [6] Tsunekane M, Taira T. Design and performance of compact heatsink for high-power diode edge-pumped, microchip lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 619-625.
- [7] Yilmaz A, Büyükalaca O, Yilmaz T. Optimum shape and dimensions of ducts for convective heat transfer in laminar flow at constant wall temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(5): 767-775.
- [8] Muzychka Y S, Yovanovich M M. Laminar forced convection heat transfer in the combined entry region of non-circular ducts[J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(1): 54-61.
- [9] Bergles A E. Heat transfer enhancement-the encouragement and accommodation of high heat fluxes[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(2): 8-19.
- [10] Tao W. Q, He Y L, Wang Q. W, *et al.* A unified analysis on enhancing single phase convective heat transfer with fields synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(24): 4871-4879.
- [11] Bejan A, Sciubba E. The optimal spacing of parallel plates cooled by forced convection[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(12): 3259-3264.
- [12] Wang Yuanyuan, Sun Na, Chang Huizeng, *et al.* Research on the design and fabrication technology of the compound micro-channel heat sink[J]. Processing, Measurement and Equipment, 2012, 49(10): 687-692.  
王媛媛, 孙 娜, 常慧曾, 等. 复合型微通道热沉设计与制作技术研究[J]. 加工、测量与设备, 2012, 49(10): 687-692.
- [13] Lü Wenqiang, Tu Bo, Wei Bin, *et al.* Micro-channel heat sink module for high power diode laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(20): 83-86.  
吕文强, 涂 波, 魏 彬, 等. 高功率二极管激光器模块式微通道冷却器研制[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(20): 83-86.
- [14] Vafai K, Zhu L. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(12): 2287-2297.
- [15] Jandeleit J, Wiedmann N. Reliability and degradation mechanisms of high power diode lasers[C]. Proc SPIE, 1999, 3626: 217-221.
- [16] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics[M]. New York: The Finite Volume Method, 1995: 5-6.
- [17] Bogojevic D, Sefiane K, Walton A J, *et al.* Investigation of flow distribution in microchannels heat sinks[J]. Heat Transfer Engineering, 2009, 30(13): 1049-1057.
- [18] Yao Shun, Ding Peng, Liu Jiang, *et al.* Microchannel heat sink of high beam quality semiconductor laser array[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2286-2289.  
尧 舜, 丁 鹏, 刘 江, 等. 高光束质量大功率半导体激光阵列的微通道热沉[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2286-2289.
- [19] Merritt S A, Heim P J S, Cho S H, *et al.* Controlled solder interdiffusion for high power semiconductor laser diode die bonding[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B, 1997, 20(2): 141-145.