

文章编号 1004-924X(2009)09-2170-06

大功率激光二极管列阵的硅基微通道热沉研制

杨 涛, 何 叶, 刘婷婷

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了提高大功率激光二极管列阵的散热效率以便提高其寿命和波长稳定性, 研制了一种封装集成度较高的屋脊式硅基微通道热沉。将田口稳健设计方法用于微通道热沉的优化设计, 利用正交试验和信噪比分析实现了参数的稳健优化。以(110)单晶硅作为基片, 采用 KOH 各向异性刻蚀和硅-玻璃-硅三层阳极键合方法制作出了通道宽度约为 $50\ \mu\text{m}$ 的微通道热沉, 通道壁面粗糙度优于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。采用激光二极管芯片对样品进行了封装和测试, 利用砷化镓激光波长的温度漂移系数估算出了中间激光二极管的有源区温升, 从而计算出了热沉的热阻。测试结果表明, 该微通道热沉的单位面积热阻约为 $0.070\ \text{cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, 与有限元分析结果基本一致。

关键词: 激光二极管列阵; 微通道热沉; 稳健设计; 数值传热分析; 封装

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Silicon microchannel heat sinks for high-power laser diode arrays

YANG Tao, HE Ye, LIU Ting-ting

(School of Information Engineering, Southwest University of
Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: To improve the heat dissipation efficiency and to enhance the lifetime and wavelength stability for diode lasers, a roof-like silicon microchannel heat sink characterized by a high integration level is developed. Taguchi robust design method is applied to the design of microchannel heat sinks and orthogonal experiments and signal-noise ratio calculation are carried out to optimize the key parameters. A microchannel heat sink prototype with a channel width around $50\ \mu\text{m}$ and a roughness better than $0.1\ \mu\text{m}$ is fabricated on a (110) silicon substrate by using a KOH anisotropic etching and an anodic bonding, and laser diode bars are welded on it to test its thermal resistance. The active region temperature rise of the middle bar is estimated by using the temperature coefficient of GaAs laser wavelength, and the thermal resistance is calculated. Experimental results show that the thermal resistance per unit area is $0.070\ \text{cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, which agrees with that calculated by the finite element method.

Key words: laser diode array; microchannel heat sink; robust design; numerical heat transfer analysis; packaging

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-10-10.

基金项目: 国防基础科研基金资助项目(No. K1303060115); 教育部重点科研基金资助项目(No. 204119); 四川省教育厅重大培育基金资助项目(No. 07ZZ038)

1 引言

二极管激光器(DL)在医疗、材料加工和国防等领域已得到广泛的应用。一般来说,DL的电光转换效率为30%~50%^[1],因此大量输入功率转化为废热。为了使DL的寿命达到10 000 h以上,其有源区的温度必须控制在55℃以下^[2]。而为了防止水蒸气在激光二极管上凝结,其工作温度必须在15℃以上,通常25℃为最佳工作温度。GaAs的折射率温度系数为 $(2.67 \pm 0.07 \times 10^{-4})/\text{K}$ ^[3],在808 nm处折射率变化导致波长随温度的变化率约为0.22 nm/K,因此要保证波长的稳定性,有源区温度的波动幅度应当尽可能小。目前国外商品化的单条线阵DL芯片准连续输出峰值功率已达120 W,连续输出功率达60 W,散热和冷却问题是制约DL功率密度提高的瓶颈^[4]。

通常将水力学直径为1~1 000 μm 的通道或管道定义为微通道。与自然对流风冷、强制对流风冷、普通强制液冷、液体相变和低温压缩冷冻循环等冷却方式相比,微通道强制对流液冷方式下的热传导与对流效率非常高。微通道热沉(Microchannel Heat Sink)的概念最早由Tuckerman和Pease于1981年提出^[5]。R. A. Riddle等人的研究表明,矩形通道中流体总的热传导系数与通道水力直径成反比^[6]。随着通道直径的减小,单位体积的散热量会由于系统的散热面积与体积之比显著增加而得到极大提高。采用微加工工艺制作的硅基微通道冷却器的单位面积热阻较小,而且易于实现与半导体器件的集成,在DL和CPU等大功率密度器件散热方面得到了广泛重视。美国Livermore国家实验室将硅单片微通道冷却器用于激光二极管靶条的冷却,脉冲频率为200 Hz,占空比为10%,瞬时功率密度为1 kW/cm²,脉冲内部的波长稳定性为4 nm,长期波长稳定性优于0.5 nm^[7]。

MEMS微通道冷却器通常做成平板型和屋脊型两种结构。平板型结构较简单,但用于半导体激光器冷却时,这种结构存在一个明显的缺点,即每个冷却器只能安装一个激光二极管靶条,若要组装成面阵,则工序比较复杂。而屋脊型不存在这些问题,它只需一个单片就可以做成面阵结

构,集成度高。本文重点介绍了适用于半导体激光器(芯片)阵列冷却用的屋脊型微通道冷却器的设计、制造与测试技术。

2 热沉的工作原理及制作方法

屋脊式微通道热沉由硅基微通道散热片、玻璃分水板、硅分水板三层结构通过阳极键合成为一体,图1为结构的剖面图。冷却水由硅分水板上的入水口进入玻璃分水板上的入水口,经玻璃分水板上的入水槽分流后进入密布于入水槽上方的两排微通道。激光二极管靶条释放的废热通过硅散热板传递给微通道中的冷却水,冷却水携带废热流出微通道,经玻璃分水板上的出水槽从硅分水板上的出水口(图中未画出)流出。

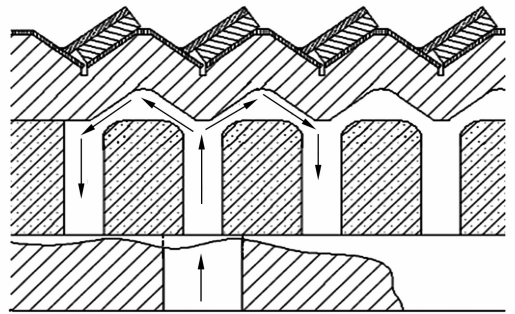


图1 屋脊式微通道热沉的工作原理

Fig. 1 Working principle of roof-like microchannel heat sink

微通道的材料主要选用硅或铜,硅基微通道采用化学刻蚀方法制作,铜基微通道采用精密机械加工方法制作。硅的热导率虽然稍低于铜,但是其微加工工艺比较成熟,可以加工出宽度非常小的通道,而且易于和半导体芯片集成,因此硅基微通道代表了微通道的主流发展方向。硅基微通道的制作方法如下:用KOH各向异性刻蚀法在(110)硅基板上加工出一系列宽度约为50 μm 的平行V型微沟槽,再通过阳极键合封装形成微通道,两端用歧管接合,作为冷却液的出入口。

设计指标要求壁面粗糙度 $R_a \leq 1 \mu\text{m}$,如果该表面粗糙度太大,势必会增大芯片焊接后的热阻,当粗糙度 $R_a > 1 \mu\text{m}$ 时,甚至连芯片都焊接不牢。壁面的表面粗糙度主要受KOH浓度的影响,实际制作出的样品其壁面粗糙度 $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ 。

3 热沉的稳健优化设计^[8]

3.1 问题描述

MEMS 器件制造误差的来源包括:(1)光刻误差,包括对位误差和显影误差;(2)加工误差,包括根切和过刻蚀;(3)材料特性误差,包括杨氏模量、泊松比和密度等^[9]。商品化硅片的定位面和晶向的位置误差为 $\pm 1^\circ$,仅这一个因素就可以使各向异性刻蚀产生 10%左右的误差^[10-11]。然而传统加工方法的特征参数偏差一般 $< 1\%$,同时由于一般 MEMS 加工方法成本已经相当高,采用特殊的加工方法来减小参数偏差可能会导致成本太高而无法接受。通过稳健设计可以更多地考虑加工过程中的不确定因素,在加工成本不变的条件下,尽可能提高其性能及稳健性。

评价微通道散热性能时,封装面的平均温度和温度的均匀性都需要考虑。因此,目标函数分别设定为平均温度 \bar{T} 和温度均匀性 σ 的信噪比:

$$\text{SNR}_1 = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^2 \right), \quad (1)$$

$$\text{SNR}_2 = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right). \quad (2)$$

\bar{T} 可以直接由数值分析结果得到。而 σ 设为封装面的温度标准差,由于数值分析后处理中无法得到各点温度,因此采用最大温差的一半来近似表征温度均匀性。

每个热沉上有 8 排微通道,每排有 81 条,总共有 648 条。单条微通道的形状和尺寸如图 2 所示。微通道采用 KOH 各向异性刻蚀方法加工,硅片为 $[110]$ 晶向,这就决定了微通道顶角为 109.5° 。激光二极管靶条长度为 10 mm,宽度为 1 mm,因此图中 AB 长度为 1 mm。一般来说,微通道越窄散热性能越好,但其宽度受到微加工工艺水平限制,因此取其下限 $50 \mu\text{m}$ 。同理,微通道越深散热性能越好,但 AB 边长确定后,微通道的最大深度也基本确定,这里将微通道深度定为 $500 \mu\text{m}$,这样就固定了微通道的尺寸,减少了流体力学分析的计算量,并由此可算出其余尺寸。由于 CF 边长为 $1\,633 \mu\text{m}$ 、CD 边长为 $109 \mu\text{m}$,因此,需要设计的变量只有 BC 和 DI 两条边长。BC 边长直接影响激光二极管靶条底面和冷却水之间的距离,BC 边长越小,对芯片散热越有利,但同时

也会导致封装面上温度梯度增大,所以 BC 边长的确定需要权衡封装面上的平均温度和温度均匀性。DI 值是微通道的入水口宽度,它对散热有直接的影响。一般说来,在入口速度一定的情况下,开口越大,单位时间内流入的冷却水越多,带走废热的能力越强,但同时需要的泵功率也越大,因此也需要折衷考虑。综上所述,有必要寻求一种优化方法,来得到 BC、DI 和冷却水流速三者的最优组合。

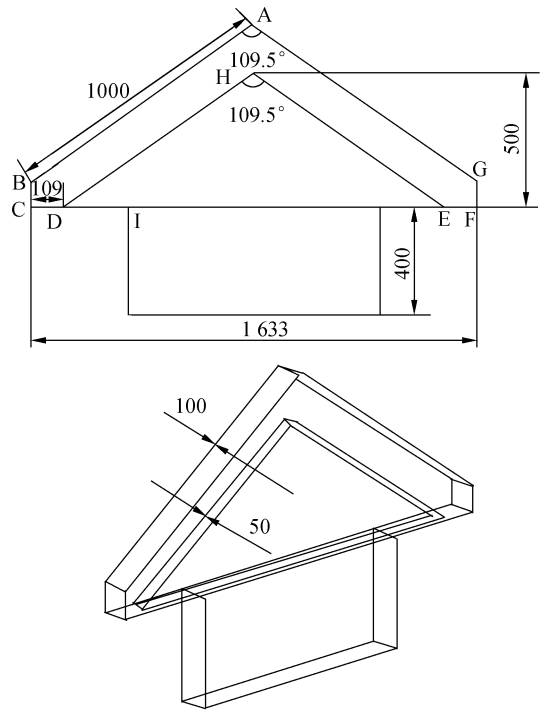


图 2 屋脊式微通道几何尺寸(μm)

Fig. 2 Dimensions of roof-like microchannels(μm)

3.2 性能分析方法

屋脊式微通道致冷器不同于微直通通道致冷器的一大特点是其通道为变截面结构,无法采用解析法求得精确解。因此,本文采用 Fluent 6.13D 分离求解器对微通道热沉的稳态散热性能进行分析;采用 $k-\epsilon$ 的 2 方程模型,并选用 RNG 方法进行湍流计算^[12]。计算中采用 SIMPLE 算法^[12] (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)求解压力-速度耦合方程。对于动量方程、能量方程、湍流方程则采用二阶逆风格式进行离散化。

由于需要对多组参数进行性能评估,为了提

高效率,设计了一种自动化分析方法:用脚本记录下一次成功的交互式分析过程,以后每次均只需通过专门设计的程序读取参数文件中的参数值,修改脚本中的参数后再回放并且读取分析结果文件,即可实现分析过程的自动化。该方法简便易行,具有较强的通用性,在实际运行中非常可靠,且中间不需要设计者的干预。

3.3 试验设计

设计的主要目的是优化 BC 和 DI 的边长,并给出相应的最优入口流速值。这 3 个参数都直接影响微通道的散热性能,但入口流速不属于设计变量。根据微通道的几何尺寸,可以估计出 BC 长度大致为 100~200 μm ,DI 长度大致为 150~

250 μm 。取二者的中间值,对不同流速下的散热情况进行数值分析,结果表明:流速在 0.1~1 m/s 变化时随着流速的增大散热情况改善明显,大于 1 m/s 后,改善逐渐减弱,因此流速变化范围选在 0.6~1 m/s。

可控因素设定为:BC 长度(a)、DI 长度(b)、入口流速(v),均有 3 个因素水平。 a 的 3 个因素水平为:100 μm 、150 μm 和 200 μm ; b 的 3 个因素水平为:150 μm 、200 μm 、250 μm ; v 的 3 个因素水平为 0.6 m/s、0.8 m/s 和 1.0 m/s。 a 、 b 的相对误差设为 $\pm 20\%$, v 的相对误差设为 $\pm 10\%$ 。正交试验的内表和外表均采用 L9(3⁴) 正交表^[13],如表 1 所示。

表 1 内表及信噪比数据

Tab. 1 Inner table and SNRs

试验序号	$a(\mu\text{m})$	$b(\mu\text{m})$	$v(\text{m/s})$	e	SNR ₁	SNR ₂
1	1(100)	1(150)	1(0.6)	1	-49.671 911 06	5.252 62
2	1(100)	2(200)	2(0.8)	2	-49.638 878 24	1.536 68
3	1(100)	3(250)	3(1.0)	3	-49.620 706 39	0.088 121
4	2(150)	1(150)	2(0.8)	3	-49.642 175 64	6.073 964
5	2(150)	2(200)	3(1.0)	1	-49.644 799 93	6.920 629
6	2(150)	3(250)	1(0.6)	2	-49.661 596 87	7.142 014
7	3(200)	1(150)	3(1.0)	2	-49.645 344 28	6.783 585
8	3(200)	2(200)	1(0.6)	3	-49.676 428 95	4.176 244
9	3(200)	3(250)	2(0.8)	1	-49.643 420 05	6.818 525

3.4 数据分析

表 1 中 SNR₁ 和 SNR₂ 分别为平均温度和温度均匀性的信噪比,均为望小特性。

表 2 和表 3 分别给出了多次试验中平均温度和温度均匀性的方差分析。从表 2 和表 3 中可以看出, a 、 b 和 v 3 个因素中, v 对于封装面平均温度的影响最显著,其贡献率为 36.224%,远大于其它两个因素。对于温度均匀性指标,影响最显著的是 a (39.285%), b 和 v 的影响可以忽略不计。所以 v 选取对 SNR₁ 影响最大的一组,即 $v =$

1 m/s(水平 3)。对于 a 的选取,考虑对 SNR₂ 影响最大的一组,即 150 μm (水平 2)。对于 b 的选取,考虑对 SNR₁ 的影响,选用其水平 3,即 250 μm 。这样,得到一组稳健性较好且性能较优的设计参数: $a = 150 \mu\text{m}$, $b = 250 \mu\text{m}$, $v = 1 \text{ m/s}$ 。根据 a 、 b 的值还可以算出壁厚约为 185 μm 。这组参数下的热沉温度分布如图 3 所示(冷却水温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,封装面热流密度为 250 W/cm^2)。分析结果表明,封装面平均温升约为 10 $^{\circ}\text{C}$,单位面积热阻约为 0.045 $\text{cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,封装面温差约为 1 $^{\circ}\text{C}$,完全可以满足使用要求。

表 2 平均温度的方差分析

Tab. 2 Variance analysis for average temperature

	平均影响 R_i			平方和 S_i	自由度 f_i	均方 V_i	统计量 F_i	贡献率 $\rho_i(\%)$
	水平 1	水平 2	水平 3					
	R_{11}	R_{12}	R_{13}					
a	-49.644	-49.650	-49.655	1.893×10^{-4}	2	9.463×10^{-5}	2.503	4.647
b	-49.653	-49.653	-49.642	2.577×10^{-4}	2	1.288×10^{-4}	3.407	7.443
v	-49.670	-49.642	-49.637	1.923×10^{-4}	2	9.615×10^{-4}	25.428	36.224
e	-49.653	-33.100	-49.646	7.563×10^{-5}	—	—	—	—

表 3 温度均匀性的方差分析

Tab. 3 Variance analysis for temperature evenness

	平均影响 R_2			平方和 S_2	自由度 f_2	均方 V_2	统计量 F_2	贡献率 $\rho_2(\%)$
	水平 1	水平 2	水平 3					
	R_{21}	R_{22}	R_{23}					
a	2.292	6.712	5.926	33.355	2	16.678	2.643	39.285
b	6.037	4.211	4.683	5.388	2	2.694	0.427	—
v	5.524	4.810	4.597	1.413	2	0.706	0.112	—
e	6.331	5.154	3.446	12.622	—	—	—	—

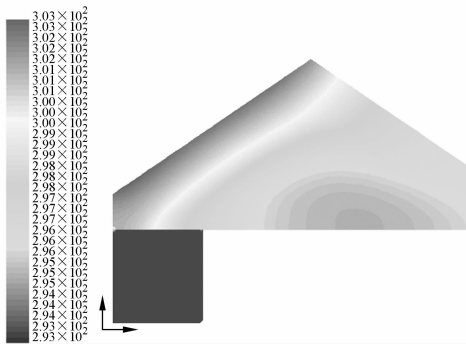


图 3 优化后的热沉温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of optimized heat sink

4 热沉的封装及散热性能测试

通过磁控溅射工艺在冷却器的封装槽面上溅射厚度分别为 1 000 nm, 1 μm , 1 μm 的 Ti, Pt, Au 三层金属膜。用钢焊料将德国 LASERTEC 生产的二极管激光器芯片焊接在屋脊式冷却器的封装面上, 焊接温度为 240 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 90 s。在芯片的 N 型面上焊接直径为 0.5 mm、长为 10 mm 的铜棒和厚度为 50 μm 的镀金铜片作为电极。焊接电极后采用专用脉冲直流电源(Laser Drive 公司的 LDI-928)供电进行测试, 用冷却水恒温循环装置(Julabo 公司的 FE4000T)实现冷却水的循环及水压和流量检测, 并用光功率计(Molelectron 公司的 PM200F-50)测试功率, 用 HR4000 高分辨率光谱仪测试光谱。测试时水压约为 100 kPa, 流量为 1 L/min。测试的初始电流从该型号二极管激光器的阈值电流 20 A

参考文献:

- [1] 郑权, 赵岭, 钱龙生. 大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(1): 6-9.

开始, 测试的最终电流为厂商提供的极限参数 110 A。

在 400 Hz、250 μs 、20 A 时, 光功率为 0.5 W, 中心波长为 804 nm; 在 400 Hz、250 μs 、100 A 时, 光功率为 10.3 W, 中心波长为 806.22 nm, 波长漂移了 2.22 nm。按 40% 发光效率计算, 相应废热从 0.75 W 增大到 15.45 W。该激光二极管中心波长随温度的漂移系数为 0.22 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 由此可估算出激光器有源区温度上升了 10.8 $^{\circ}\text{C}$, 热沉单位面积热阻约为 0.070 K \cdot cm 2 /W。

与有限元分析的结果相比, 测试得到的热阻偏大。其中一个重要的原因是为了确保测试样品有足够的强度, 用于测试的热沉散热板壁厚比理想值厚 150 μm 左右, 这就引入了 0.010 cm 2 \cdot K/W 左右的附加热阻。此外, 有限元分析计算的是封装面表面温度, 而测试中估算的是芯片有源区温度, 这之间还存在附加热阻。综合上述考虑, 有限元分析结果和测试结果基本一致。

5 结 论

采用稳健设计方法可以提高微加工器件的强度来抵抗工艺参数变化的影响, 使其性能更加稳健。由于流体力学分析的计算量很大, 采用正交试验设计方法可以减少试验次数和总计算量。测试结果表明, 传统的流体分析方法适用于宽度在 50 μm 左右的变截面微通道散热性能分析; 考虑芯片和封装热阻, 研制的硅基屋脊式热沉的散热性能优于 0.070 cm 2 \cdot K/W。

ZHENG Q, ZHAO L, QIAN L SH. Application and development of high power diode-pumped solid-state laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 6-9. (in Chinese)

- [2] KATRIN UNGER, DIETMAR MULLER, DIRK LORENZEN. Efficient temperature control of microchannel cooled diode laser bars[C]. *Proc. of 3rd European Conference on High Temperature Electronics, HITEN, Berlin, July 4-7, 1999*: 141-144.
- [3] TALGHADER J, SMITH J S. Thermal dependence of the refractive index of GaAs and AlAs measured using semiconductor multilayer optical cavities[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(3): 335-337.
- [4] 高松信, 武德勇, 王骏, 等. 高功率二极管激光器封装的多层焊接技术[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(5): 447-449.
- GAO S X, WU D Y, WANG J, *et al.*. Multiplayer bonding technique for high power diode laser package[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 447-449. (in Chinese)
- [5] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 1(5): 126-129.
- [6] RIDDLE R A, CONTOLINI R J, BERNHARD A F. Design calculations for the microchannel heat-sink[C]. *National Electronic Products Conference, Anaheim CA, LLNL, February 1991*.
- [7] Lawrence Livermore National Laboratory. Development of High-Power, Microchannel-Cooled, Laser - Diode Arrays is under Way[EB/OL]. *Laser Science and Technology*, May 2001, UCRL-TB-136126-01-05.
- [8] YANG T, HE Y, LI L M. Design and analysis of silicon microchannel heat sink with varying cross sections[C]. *Proceeding of ICSC 2005(Asia Simulation Conference/ the 6th International Conference on System Simulation and Scientific Computing)*, 2005: 866-871.
- [9] YU J C, LAN C B. System modeling and robust design of microaccelerometer using piezoelectric thin film[C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 1999: 99-104.
- [10] ENSELL G. Alignment of mask patterns to crystal orientation[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 1996, 53(1): 345-348.
- [11] VANGBO M, BACKLUND Y. Precise mask alignment to the crystallographic orientation of silicon wafers using wet anisotropic etching [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1996, 6(2): 279-284.
- [12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社.
- TAO W Q. *Numerical Heat Transfer* [M]. 2nd ed.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press. (in Chinese)
- [13] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社.
- CHEN L ZH. *Robust Design* [M]. Beijing: China Machine Press. (in Chinese)

作者简介:



杨涛(1972—),男,四川人,工学博士,副教授,主要从事微机电系统、传感器网络等方面的研究。E-mail: yangtao98@tsinghua.org.cn



刘婷婷(1982—),女,四川人,硕士,讲师,主要研究方向为微流体分析。E-mail: liutingting@swust.edu.cn



何叶(1980—),女,四川人,硕士,讲师,主要研究方向为工程优化设计和有限元分析。E-mail: heyec@sina.com.cn