

# 激光二极管合束模块整体散热热阻分析

张志军<sup>1,2</sup> 刘云<sup>1\*</sup> 付喜宏<sup>1</sup> 单肖楠<sup>1</sup> 朱洪波<sup>1,2</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 半导体激光器散热是在热源至热沉之间尽可能提供一条低的热阻通路。其主要目的是降低外热阻(即激光器芯片至散热空间的热阻),使发热激光器芯片与被冷却表面之间保持一个低的温度梯度和良好的热接触。对于接触热阻冷却方法,人们往往根据自身的研究对象,用实验方法来解决接触热阻的问题。通过对单管合束模块整体热阻逐步进行分析,通过软件模拟和结合频率红移法对激光二极管热阻进行测量,得出单管合束模块整体散热热阻小于 0.25 °C/W。此散热模块可以满足百瓦级半导体激光器的散热要求。

**关键词** 激光器;大功率半导体激光器;风冷散热;热阻;频率红移法

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0402010

## Analysis on Overall Thermal Resistance of Laser Diode Beam Combined Modules

Zhang Zhijun<sup>1,2</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Fu Xihong<sup>1</sup> Shan Xiaonan<sup>1</sup> Zhu Hongbo<sup>1,2</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Semiconductor laser cooling is to provide a low thermal resistance path between heat source and heat sink. Its main purpose is to reduce the external thermal resistance (resistance between the laser chip and the cooling space) to maintain a low temperature gradient and good thermal contact between the heating laser chip and cooling surface. Experimental methods are used to solve the problem of contact resistance according to the study object. Based on the single-chip combined beam module, a overall thermal resistance is analyzed gradually, software simulation and the frequency with red shift method are described for the thermal resistance of laser diode measurement. Single-chip combined beam module overall thermal resistance is less than 0.25 °C/W. The cooling modules can be used in the 100 W-class semiconductor laser cooling requirements.

**Key words** lasers; high-power semiconductor laser; air cooling; thermal resistance; frequency red shift method

**OCIS codes** 140.3320; 140.2020; 140.6810

## 1 引言

目前,以半导体二极管激光器为基础的合束模块,已广泛应用于材料加工、固态光纤激光器抽运和

国防军事领域中。在大功率半导体激光器单管合束模块的各种关键技术中,散热是一个极其关键技术<sup>[1~3]</sup>。随着合束模块整体功率的增大,其散热也

收稿日期: 2011-11-08; 收到修改稿日期: 2011-12-30

基金项目: 广东省院地合作项目(2009A091100021)、吉林省科技厅重大项目(10ZDGG001)和高校节能柔性工作新一代半导体激光加工装备研制(2011CJT0003)资助课题。

作者简介: 张志军(1983—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器封装、散热、合束等方面的研究。

E-mail: zzjciomp@163.com

导师简介: 王立军(1946—),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: hs5252@sohu.com

变得更加困难,然而选择和控制在散热器,降低散热器整体热阻又是散热的关键技术。已有报道显示,降低热阻可以增加半导体激光器的输出功率,提高可靠性<sup>[4]</sup>。基于此,本文对激光器单管合束模块整体进行热阻分析,逐级增加半导体激光器合束模块的热传导通道截面积,减小材料间的接触热阻。设计的风冷散热器可以满足百瓦级半导体激光器合束模块的散热。

## 2 散热模块整体热阻分析

半导体激光器的热阻包括芯片的热阻和封装带

来的热阻。有效的热管理是提高器件性能的关键。提高热管理主要从减小芯片热阻、减小贴片界面热阻和设计良好的封装结构来降低封装热阻三个方面来实现。传导热阻的计算方法可表示为

$$R_{th} = L/(KA), \quad (1)$$

式中  $L$  为热传导距离,  $A$  为热传导通道的截面积,  $K$  为热传导系数。由(1)式可知,要减小单管合束模块整体的热阻主要有以下途径:1)选择热传导系数大的材料,2)在材料确定的情况下尽可能减小热传导距离或增大热传导通道截面积。激光二极管(LD)合束模块整体结构材料的热传导系数和热阻如图1所示。

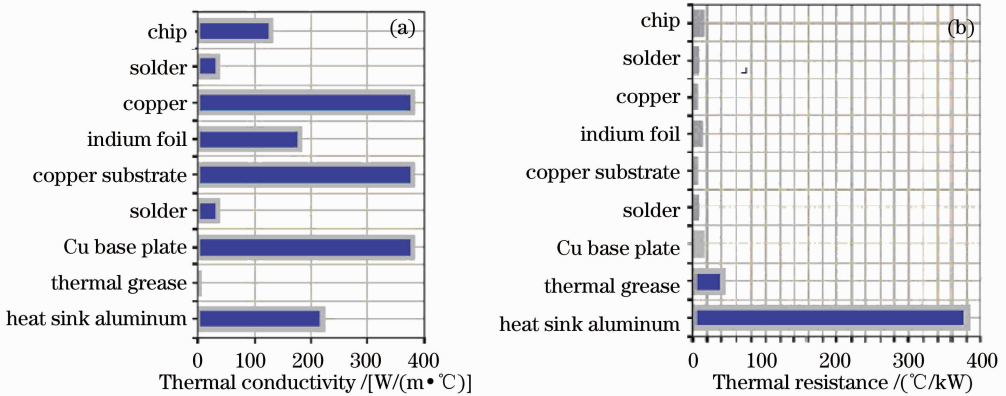


图1 激光模块整体结构材料的热传导系数(a)和热阻(b)

Fig. 1 Laser-mouldle construction is shown with regard to (a) thermal conductivity and (b) thermal resistance

### 2.1 激光器贴片界面热阻

激光器芯片到热沉热阻主要有以下几种热阻组成:激光器芯片本身热阻  $R_1$ 、激光器芯片与焊料接触热阻  $R_2$ 、焊料传导热阻  $R_3$ 、焊料与热沉的接触热阻  $R_4$ 、热沉的传导热阻  $R_5$ 。激光器与长方形热沉之间用钢焊料焊接,由(1)式可知,钢焊料的热阻大概为  $R_2 = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ (一般焊料的厚度为  $5 \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$ ),长

方形热沉本身(图2)的热阻  $R_5 = 0.09 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ [热沉尺寸为  $20 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,铜的热导率  $K = 397 \text{ W/(m} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$ ],以及每个小热沉与大热沉的接触热阻  $R_6$ 、大热沉的传导热阻  $R_6$ 、大热沉与管壳的接触热阻  $R_7$ (以上没有考虑激光二极管合束模块整体的对流和辐射热阻,因为模块整体最后会在密闭的空间内,所以忽略不计)。

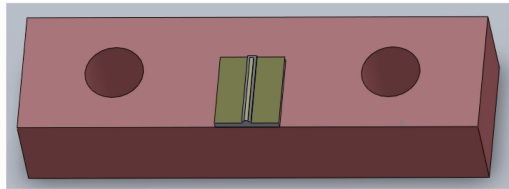
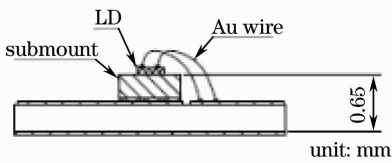


图2 激光器芯片到热沉的模拟图

Fig. 2 Laser chip to the heat sink simulation

表1 长方形阶梯热沉阻值

Table 1 Rectangular step heat sink resistance

Step height /mm	19.5	18	16.5	15	13.5	12	10.5	9	7.5
Resistance / (°C/W)	0.234	0.219	0.200	0.180	0.162	0.144	0.126	0.110	0.09

### 2.2 风冷散热模块整体热阻

封装壳与冷板(图3)的接触热阻  $R_8$ 、冷板的热

传导热阻  $R_9$ 、冷板与热管的接触热阻  $R_{10}$ 、热管与  $N$  个散热片的接触热阻  $R_a$ 、 $N$  个散热片的传导热阻

$R_{11}$ 、大风扇对  $N$  个散热片的对流热阻  $R_{12}$ ，及热管的热阻(见表 2)。

表 2 中  $d_o$  和  $d_i$  分别为热管的外直径和内直径； $L_e$  和  $L_c$  分别为蒸发段和冷凝段的长度； $\lambda_w$  为管壁铜的导热系数； $h_{co}$  为蒸发段沸腾换热系数； $h_{co}$  为冷凝段的冷凝换热系数。由于热管的超导特性，热管本身对应的热阻<sup>[5,6]</sup>  $R_{HP}$  是从  $R_{14}$  至  $R_{18}$  的 5 项热阻。

$$R_{HP} = R_{14} + R_{15} + R_{16} + R_{17} + R_{18}, \quad (2)$$

$R_{HP} \ll R_{13}$ ,  $R_{HP} \ll R_{19}$ ，即其中热管本身的热阻很小，一般一根良好的热管的热阻大概是  $0.08 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

在上述各项热阻中，由器件管芯传到器件底部的热阻为  $R_{JC}$ ，器件底部与散热器之间的热阻为  $R_{CS}$ ，散热器将热量散到周围空间的热阻为  $R_{SA}$ ，总

的热阻  $R_{JA} = R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}$ 。其中  $R_{JC} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ ,  $R_{CS} = R_b + R_6 + R_7$ ,  $R_{SA} = R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} + R_{17} + R_{18} + R_{19} + R_a$ ，由此设计出的激光二极管合束模块模拟图和实物图如图 4 所示。

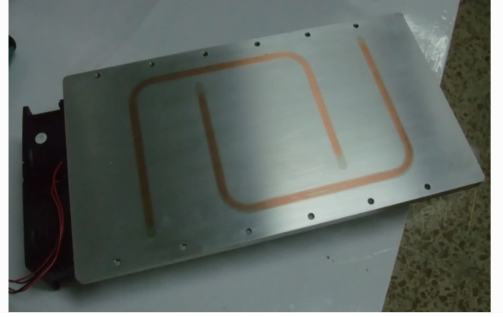


图 3 风冷散热模块整体实物图

Fig. 3 Air-cooling module overall physical map

表 2 热管的各项热阻

Table 2 Heat pipe thermal resistance

Thermal name	Heat calculation	Thermal resistance
Thermal resistance from heat source to evaporator of the outer surface	$Q = \pi d_o L_e h_{co} \Delta T_1$	$R_{13} = \frac{\Delta T_1}{Q} = \frac{1}{\pi d_o L_e h_{co}}$
Thermal resistance of evaporator wall	$Q = \frac{2\pi\lambda_w L_e}{\ln(d_o/d_i)} \Delta T_2$	$R_{14} = \frac{\Delta T_2}{Q} = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi\lambda_w L_e}$
Thermal resistance of evaporator tube	$Q = \pi d_i L_e h_e \Delta T_3$	$R_{15} = \frac{\Delta T_3}{Q} = \frac{1}{\pi d_i L_e h_e}$
Thermal resistance of steam flow	$Q = \frac{\pi d_o^4 \rho v^2 r^2}{128 L_{0,v} T_V} \Delta T_4$	$R_{16} = \frac{\Delta T_4}{Q} = \frac{128 L_{0,v} T_V}{\pi d_o^4 \rho v^2 r^2}$
Thermal resistance of condensation tube segments	$Q = \pi d_i L_c h_c \Delta T_5$	$R_{17} = \frac{\Delta T_5}{Q} = \frac{1}{\pi d_i L_c h_c}$
Thermal resistance of condensation wall	$Q = \frac{2\pi\lambda_w L_c}{\ln(d_o/d_i)} \Delta T_6$	$R_{18} = \frac{\Delta T_6}{Q} = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi\lambda_w L_c}$
Thermal resistance from condensation section of the outer surface to the cold source	$Q = \pi d_o L_c h_{co} \Delta T_7$	$R_{19} = \frac{\Delta T_7}{Q} = \frac{1}{\pi d_o L_c h_{co}}$

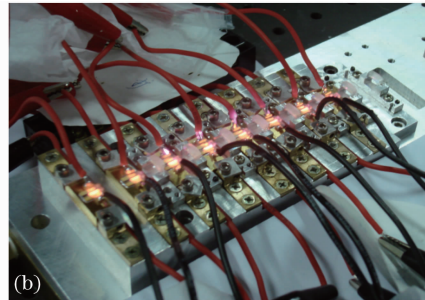
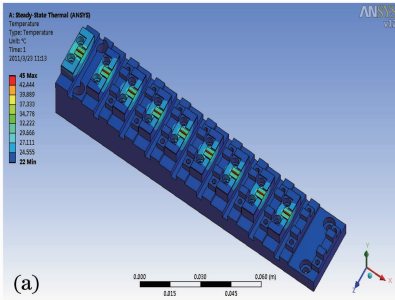


图 4 LD 合束模块模拟图(a)和实物图(b)

Fig. 4 (a) LD module simulation diagram and (b) actual object diagram

### 3 实验测量与分析

对于半导体器件<sup>[7,8]</sup> 最重要的两个热学参数是：结温和热阻。由热阻定义

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q}, \quad (3)$$

可知，热阻  $R_{th}$  是和温度差  $\Delta T$  相对应的，某一局部

降温对应某一局部热阻,全部降温对应全部热阻。当传热量  $Q$  为定值时,  $R_{th}$  值越大,则  $\Delta T$  越大,激光器的温升就越大,超过激光器结温时就会大大影响激光器性能,甚至失效<sup>[9~11]</sup>。因此,准确测量和模拟散热器的热阻是有效的热管理的核心问题。

### 3.1 频率红移法实验测试用于 LD 热阻测量

“频率红移”<sup>[12~14]</sup>即为 LD 受热时,其峰值波长随温度增加向长波方向移动的现象,产生这种现象的原因主要有两个:1) 由于热膨胀使谐振腔尺寸变大;2) 由于谐振腔折射率变化。实验证明,LD 峰值波长变化与其结温度变化成线性关系,即

$$\Delta\lambda = K'\Delta T, \quad (4)$$

式中  $K'$  是比例系数,与激光器结构有关,对于实验

使用的 808 nm 半导体激光器  $K'=0.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,因此,对温度的测量转化为对波长的测量。同时可以利用 LD 综合参数(如表 3 所示)测试系统对热功率的测量转化为对电功率和光功率的测量(不失一般性,可设  $I_{OP2} > I_{OP1}$ )。

则在两个驱动电流下的热耗散功率之差为

$$Q = P_{th2} - P_{th1} = I_{OP2}U_2 - I_{OP1}U_1 - P_2 + P_1, \quad (5)$$

由(3)~(5)式,可得

$$R_{th} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{K'(I_{OP2}U_2 - I_{OP1}U_1 - P_2 + P_1)}, \quad (6)$$

通过以下几组实验(见表 4)计算得到整体散热模块的热阻小于  $0.25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

表 3 LD 综合参数

Table 3 Parameters of LD

	Current /A	Voltage /V	Wavelength /nm	Power /W	Heat dissipation /W
No. 1	$I_{OP1}$	$U_1$	$\lambda_1$	$P_1$	$P_{th1}$
No. 2	$I_{OP2}$	$U_2$	$\lambda_2$	$P_2$	$P_{th2}$

表 4 不同电流下的功率、电压、波长

Table 4 Power, voltage and wavelength under different currents

	$I_{OP1}/\text{A}$	$U_1/\text{V}$	$\lambda_1/\text{nm}$	$P_1/\text{W}$	$I_{OP2}/\text{A}$	$U_2/\text{V}$	$\lambda_2/\text{nm}$	$P_2/\text{W}$
No. 1	3.0	15.2	806.294	16.15	3.5	15.6	806.687	19.74
No. 2	4.0	16.1	807.310	24.30	4.5	16.5	807.876	27.00
No. 3	5.5	17.4	808.756	34.30	5.8	17.7	809.295	38.30

### 3.2 结果分析

对于风冷散热器,有

$$P = H \cdot A' \cdot \eta \cdot \Delta T, \quad (7)$$

式中  $P$  为散热片与周围空气的热交换总量; $H$  为散热片的总热传导率,由辐射及对流两方面决定; $A'$  为散热片表面积; $\eta$  为散热片效率,由散热片的材料及形状决定; $\Delta T$  为散热片的最高温度与周围环境温度之差。

由(7)式可以确定,加工成型后的风冷散热器本

身(即散热器中的金属部分)的热阻是固定的,但是,所选的参考环境不同,散热器性能会受到很大影响,图 5 为热阻软件模拟和实验测试图,表 5 测试出散热器在各种风速下(即不同对流换热系数)的激光器芯片的温度,通过计算得到的热阻  $0.254 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$  和模拟计算结果基本吻合。所以本文设计的热阻散热路径应用在高功率半导体激光器百瓦级风冷散热中是可行的,为大功率半导体激光器风冷散热提供了一种解决途径。

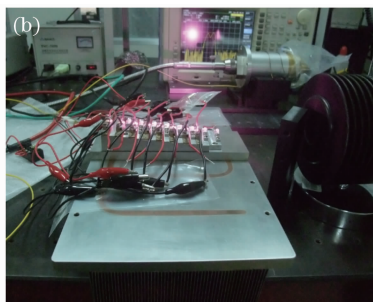
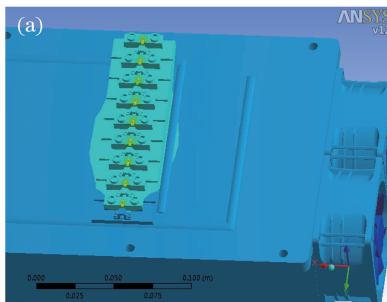


图 5 热阻软件模拟(a)和实验测试(b)

Fig. 5 (a) Thermal simulation and (b) experimental testing

表 5 不同风速下的芯片温度

Table 5 Chip temperature under different wind speeds

	$I_0/A$	$U_0/V$	Heat sink temp. / $^{\circ}C$	Wind / $(m/s)$	Source temp. / $^{\circ}C$	$P_{out}/W$
Test1	5.5	17.4	32.65	7	41.27	34.3
Test2	5.5	17.4	32.90	6	41.54	34.1
Test3	5.5	17.4	33.36	5	42.13	33.8
Test4	5.5	17.4	33.80	4	42.58	33.5

## 4 结 论

分析了高功率半导体激光器模块热阻测试和计算方法,提出了进行热阻测试的系统方案,并给出了实验结果,该方法测试结构简单,可靠性高。通过对比不同对流换热系数对激光器热阻的影响,进一步证明热阻的大小强烈依赖于所定义的特定环境,为优化激光器模块的散热设计、降低热阻、进一步提高激光器的输出功率和可靠性,提供了参考依据。

## 参 考 文 献

- Tang Chun, Wu Deyong, Yan Diyong *et al.*. High-duty cycle high power linear array diode laser package technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(5): 544~546  
唐 淳, 武德勇, 严地勇等. 高占空比、高功率线阵二极管激光器封装技术[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(5): 544~546
- Song Haipeng, Wen Jimin, Zeng Xiongwen *et al.*. Research of pulse injection method for measuring LD chip temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 407~410  
宋海鹏, 温继敏, 曾雄文等. 测量激光器结温的脉冲注入法研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 407~410
- Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540  
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang *et al.*. Life time testing of high power diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6): 689~692  
高松信, 魏 彬, 吕文强等. 高功率二极管激光器寿命测试[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6): 689~692
- Zhuang Jun. Heat Pipe Technology and Engineering Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 196~198  
庄 骏. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 196~198
- Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. 485~488  
陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 485~488
- Huang Dexiu, Liu Xuefeng. Semiconductor Lasers and Their Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 107~109  
黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 107~109
- Jiang Jianping. Semiconductor Lasers [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 91  
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 91
- Zhang Yanxin, Wang Jingwei, Wu Di *et al.*. A new package structure for high power single emitter semiconductor laser and performance analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1186~1191  
张彦鑫, 王警卫, 吴 迪等. 一种新型大功率单发射腔半导体激光器及其特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1186~1191
- Xin Guofeng, Qu Ronghui, Chen Chen *et al.*. Characterization of a 2D array high power semiconductor laser module[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 447~450  
辛国锋, 瞿荣辉, 陈 晨等. 大功率半导体激光器二维阵列模块特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 447~450
- Shen Li, Xin Guofeng, Pi Haoyang *et al.*. Study on lateral distribution of working wavelength and packaging-induced-stress in laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 461~464  
沈 力, 辛国锋, 皮浩洋等. 半导体激光器阵列横向波长分布与键合应力关系的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 461~464
- Xin Guofeng, Shen Li, Pi Haoyang *et al.*. Experimental study of thermal resistance measurement for high power laser diode array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 112501  
辛国锋, 沈 力, 皮浩洋等. 高功率半导体激光器热阻测量的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 112501
- Dai Shuchun. Influence of power effect on the thermal resistance of power LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(6): 877~881  
戴树春. 功率效应对功率 LED 热阻的影响[J]. *发光学报*, 2010, **31**(6): 877~881
- Su Meikai, Ni Guoqiang, Zuo Fang. Frequency bathochromic shift used for testing the thermal resistors of laser diodes [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 48~51  
苏美开, 倪国强, 左 防. 频率红移法用于激光二极管热阻测量[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 48~51

栏目编辑: 宋梅梅