

# Effect of Different Solders on Heat Dissipation of Micro-Disk Cavity Semiconductor Laser

Yun Liu, Changling Yan\*, Jinghang Yang, Chao Pang, Yuan Feng, Yongqin Hao, Hui Li, Dongxin Xu, Jianjia Zhang

State Key Lab on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Email: \*changling\_yan@126.com

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 19<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Based on the theoretical analysis of thermal characteristics and heat dissipation modes of micro-disk cavity semiconductor lasers, a physical heat dissipation model of inverted encapsulated micro-disk cavity semiconductor lasers is established. Aiming at the thermal characteristics of inverted encapsulated micro-disk cavity semiconductor lasers under steady state operation, the effects of three solders on heat dissipation of micro-disk cavity semiconductor lasers are analyzed by using ANSYS finite element analysis software, namely In, Sn<sub>0.2</sub>Au<sub>0.8</sub>, Sn<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub>, and AlN radiators. The results show that the heat dissipation effect of In solder is better, the chip temperature rise is 4.506 K; the heat dissipation effect of Sn<sub>0.48</sub>In<sub>0.52</sub> solder is worse; the maximum temperature rise is 6.501 K; and the heat dissipation effect of Sn<sub>0.2</sub>Au<sub>0.8</sub> solder is slightly worse than that of In solder, but not more than 0.1 K. The heat diffusion area of AlN radiator is larger, and the heat dissipation effect is greatly affected by the size of the radiator. In terms of thermal expansion coefficient, thermal stability of solder and cost of solder, In solder is suitable for general experiments, and Sn<sub>0.2</sub>Au<sub>0.8</sub> is suitable for rigorous scientific research experiments or batch production.

## Keywords

Micro-Disk Cavity Semiconductor Laser, ANSYS, Solder, Thermal Analysis

# 不同焊料对微盘腔半导体激光器散热的影响

刘云, 晏长岭\*, 杨静航, 逢超, 冯源, 郝永芹, 李辉, 徐东昕, 张剑家

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春

Email: \*changling\_yan@126.com

\*通讯作者。

文章引用: 刘云, 晏长岭, 杨静航, 逢超, 冯源, 郝永芹, 李辉, 徐东昕, 张剑家. 不同焊料对微盘腔半导体激光器散热的影响[J]. 应用物理, 2019, 9(2): 87-93. DOI: 10.12677/app.2019.92010

## 摘要

通过对微盘腔半导体激光器热特性及散热方式的理论分析，建立倒封装微盘腔半导体激光器物理散热模型，针对其在稳态工作下的热特性，利用ANSYS有限元分析软件，分析了三种焊料分别为In、 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 、以及AlN散热片对微盘腔半导体激光器的散热效果的影响。结果显示，In焊料的散热效果较好，芯片温升为4.506 K； $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 焊料的散热效果较差，最高温升为6.501 K； $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 焊料散热效果较In焊料略差接近0.1 K。AlN散热片的热扩散区域更大，散热效果受散热片尺寸影响比较大。从热膨胀系数、焊料热稳定性以及焊料成本来看，In焊料适用于基础实验， $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 适用于要求严格的科研实验或批量生产。

## 关键词

微盘腔半导体激光器，ANSYS，焊料，热分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

半导体微盘激光器具有简单的几何形状、较小的占用空间、低阈值以及可集成度高等特点，可以作为大规模光子集成电路和超大规模光通信系统的理想光源。在全光网络和光电子信息集成网络中具有重要的应用。并在生物探测器、传感器等方面有着重要的应用价值[1]。

对于半导体激光器来说，热效应一直是影响激光器正常稳定工作的重要因素[2]。由于半导体激光器在工作的时候产生的热量大于散热装置能够散去的热量，使得腔体内部的温度增高，产生热饱和现象[3]。为了避免热饱和现象，所以应尽可能地降低半导体器件产热区的温度(即结温)。半导体器件的阈值电流变大、电光转换效率减小、输出功率变低及器件寿命缩短，很多都是由于结温的升高，这已变成阻碍半导体激光器性能稳定的一项非常重要的因素。

微盘腔半导体激光器高反射的微盘结构使其具有超低的阈值电流、极高的能量密度，超高的品质因子[4] [5]。但是高反射的微盘结构造成微盘激光器的光耦合输出较低，通常器件的电光转换效率较低，也造成微腔激光器的热效应对器件性能的影响更明显[6]。研究微盘腔半导体激光器的热特性，改善散热效果，不但能够延长器件的使用寿命，更能够提升器件的电光转换效率，击穿电流等。本文采用 ANSYS 有限元软件分析 In 焊料、 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料、AlN 散热片对微盘腔半导体激光器工作时芯片温度的影响，为提升半导体激光器散热效果、延长器件使用寿命、提高其电光转换效率提供了参考依据。

## 2. 理论分析

目前半导体激光器封装时一般采用 In 焊料，In 材料价格便宜，质软，延展性好；此外还有 Au-Sn 合金、In-Sn 合金等焊料，以及 AlN 散热片等。为了能够更好的分析封装技术对半导体激光器散热性能的影响，采用 ANSYS 软件分析了 In 焊料、 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料、AlN 散热片在外部条件相同时，

对微盘腔半导体激光器散热的影响。

微盘腔半导体激光器正常工作时的废热产生主要有三个方面[7] [8] [9]:

- 1) 当注入电流小于阈值时, 不会产生激光, 这部分注入的电流要产生一定的废热。
- 2) 当注入的电流大于阈值电流时, 一些电子和空穴将会发生非辐射复合; 同时部分辐射复合产生的光子将会被波导层吸收, 产生废热。
- 3) 半导体激光器工作期间由于各材料层间欧姆损耗引起的焦耳热, 计算公式为:

$$Q = j^2 \rho \quad (1)$$

式中  $Q$  为焦耳热功率密度,  $j$  为电流注入密度,  $\rho$  为各材料层的电阻率。激光器达到稳定的工作状态后遵循的热传导方程为:

$$K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

式中,  $T$  为温度,  $K$  为材料热传导系数,  $Q$  为热功率密度。

半导体激光器内部芯片产生的热量必然引起芯片与其他部位和周围介质之间的温度差, 因此, 在半导体激光器中存在三种热传递方式[10]: 热传导, 热对流和热辐射。对于一般的热力学模型来说, 热传导, 热对流和热辐射这三种形式的传热方式是都存在的。但是对于半导体激光器来说, 芯片尺寸较小工作温度较室温差别不大, 热辐射一般可以忽略不计, 只考虑器件直接的热传导, 和器件与空气的对流指数。

为了更好的解决散热问题, 在实验中一般将芯片焊接在无氧铜热沉上, 由于芯片材质和铜热沉的热膨胀系数不同, 相互作用将会产生应力。而焊料作为连接芯片与热沉直接的过渡层, 选择适当的焊料不但能够使半导体激光器获得更好的散热效果, 还能够弥补芯片与热沉之间由于热膨胀系数不同而带来的应力。为此我们使用 ANSYS 软件分析了四种散热材料对微盘腔半导体激光器散热的影响。

### 3. 不同焊料的热分析

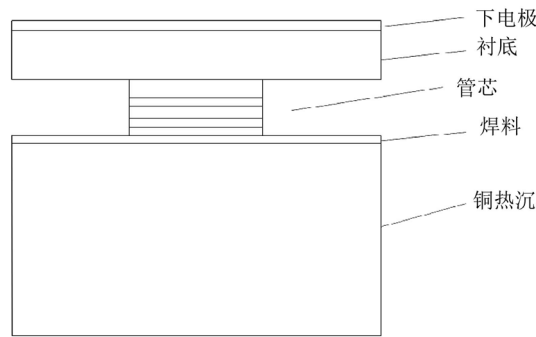
#### 3.1. 模型的建立

ANSYS 作为有限元分析软件有很强大的模拟计算功能, 在热分析方面有强大的处理能力, 其处理结果快速而高效[11]。对于采用 ANSYS 软件进行模拟, 可以分为三个主要步骤: 前期模型处理、中期软件计算、后期结果分析。

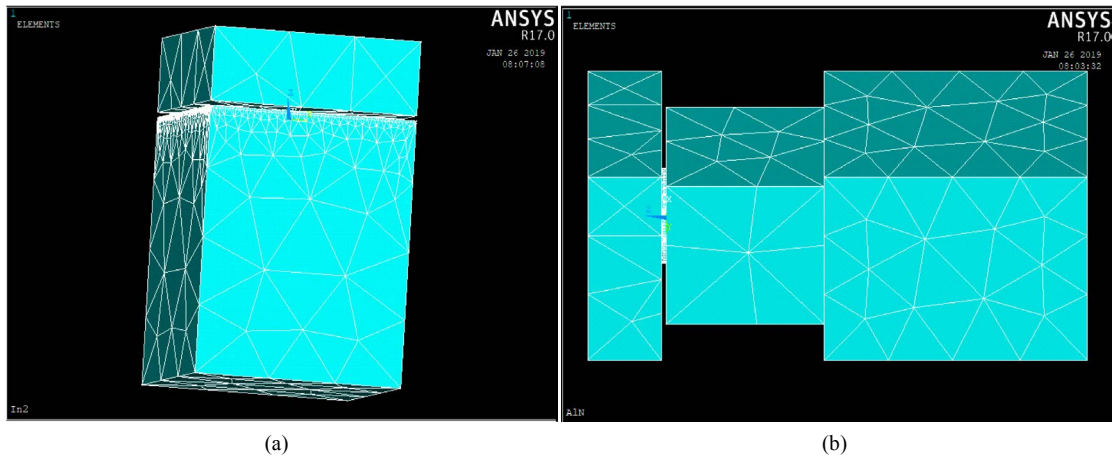
- 1) 前期模型处理, 通过前处理可以将要求解的问题模型化, 主要有确认算法、建立模型、网格划分、施加载荷等。
- 2) 中期软件计算, 主要通过对线性以及非线性的方程组求解, 然后得到节点的数值。
- 3) 后期结果分析, 将已经计算出来的结果表示出来, 计算结果可以显示为彩色等值线、立体切片、半透明以及透明图形等, 还可以把结果显示成曲线、图表形式。

为充分体现不同焊料对微盘腔半导体激光器散热的影响, 模拟中采用倒封装模型, 使芯片与焊料直接接触。如图 1 所示, 是倒封装微盘半导体激光器的结构示意图, 表 1 为器件各部分实际的参数大小。据此, 使用 ANSYS17.0 建立倒封装的微盘腔半导体激光器的模型。

由于 AlN 不同于普通焊料, 实验中一般使用尺寸为 10 mm \* 10 mm \* 1.5 mm 硬质散热片, 为此我们为 AlN 散热片单独建立了模型, 取 150  $\mu\text{m}$  \* 150  $\mu\text{m}$  \* 300  $\mu\text{m}$  的 AlN 散热片使用 In 焊料焊接在铜热沉上。如图 2(a)所示为网格划分后的倒封装微盘腔半导体激光器模型, 图 2(b)为网格划分后的 AlN 散热片的倒封装微盘腔半导体激光器模型。



**Figure 1.** Structural schematic diagram of inverted encapsulated micro-disk cavity semiconductor lasers  
**图 1.** 倒封装微盘腔半导体激光器结构示意图



**Figure 2.** (a) Reverse-encapsulated micro-cavity semiconductor laser model; (b) Model of AlN radiator inverted encapsulated micro-cavity semiconductor lasers

**图 2.** (a) 倒封装微盘腔半导体激光器模型; (b) AlN 散热片倒封装微盘腔半导体激光器模型

**Table 1.** Modeling parameters in ANSYS simulation

**表 1.** ANSYS 模拟中的建模参数

名称	材料	尺寸(μm)	热导率 K (w/cm·K)
下电极	Au-Ge-Ni	200 * 200 * 0.25	0.44
衬底层	InP	200 * 200 * 140	0.60
下波导层	InP	半径 90 厚度 3.5	0.68
有源层	In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As/In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	半径 90 厚度 2.68	0.01
上波导层	InP	半径 90 厚度 3.5	0.68
欧姆接触	In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	半径 90 厚度 0.02	0.05
上电极	Ti-Pt-Au	半径 90 厚度 0.25	2.8
焊料	In	200 * 200 * 4.6	0.82
Cu 热沉	Cu	200 * 200 * 500	3.98

### 3.2. 模拟结果

为分析不同焊料对微盘腔半导体激光器的散热影响，单一变量为焊料层热导率，在模拟中除焊料层热导率不同外，其他参数完全一致。模拟实验中不同焊料热导率如表 2 所示。对建立的模型进行网格划分，设置环境温度为 298 K，与空气接触面设置空气的对流系数 20 W/(m<sup>2</sup>·°C)，在有源层，上、下波导层

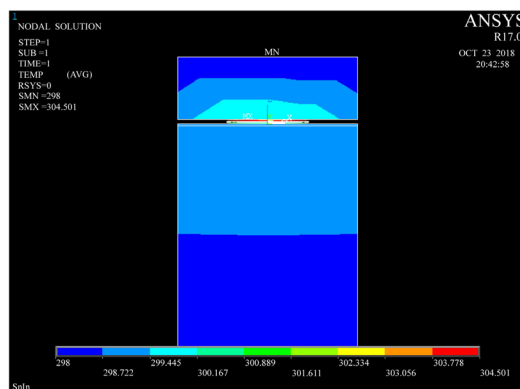
施加载荷。当器件的注入电流为 1 A，工作电压为 6 V，泵浦功率为 6 W，出射光功率为 7 mW 时，器件产热为 5.993 W。产热区主要在有源层和上下波导层中，因此在热分析过程中，定义这三层为产热区。这三部分的体积  $V$  分别为，有源层： $V_1 = \pi r^2 d = \pi \times 0.0122 \times 2.68 \times 10^{-4} = 1.2 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ ；上下波导层： $V_2 = \pi \times 0.0122 \times 3.5 \times 10^{-4} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ 。设源区产热为总热量的 80%，波导层各为 10%，则有源区的单位体积热量为： $4 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ ，波导层的单位体积热量分别为： $3.7 \times 10^3 \text{ W/mm}^2$ 。

**Table 2.** Heat dissipating material parameters

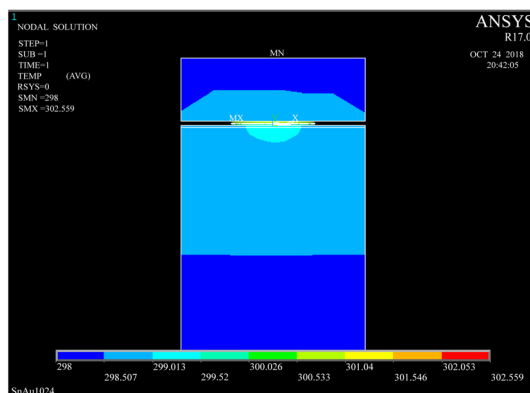
**表 2.** 散热材料参数

名称	材料	尺寸( $\mu\text{m}$ )	热导率(w/cmK)	热膨胀系数( $1/^\circ\text{C}$ )
焊料 1	$\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$	200 * 200 * 4.6	0.57	$16 \times 10^{-6}$
焊料 2	$\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$	200 * 200 * 4.6	0.34	$20 \times 10^{-6}$
焊料 3	In	200 * 200 * 4.6	0.82	$29 \times 10^{-6}$
散热片	AlN	150 * 150 * 300	3.19	$4.5 \times 10^{-6}$

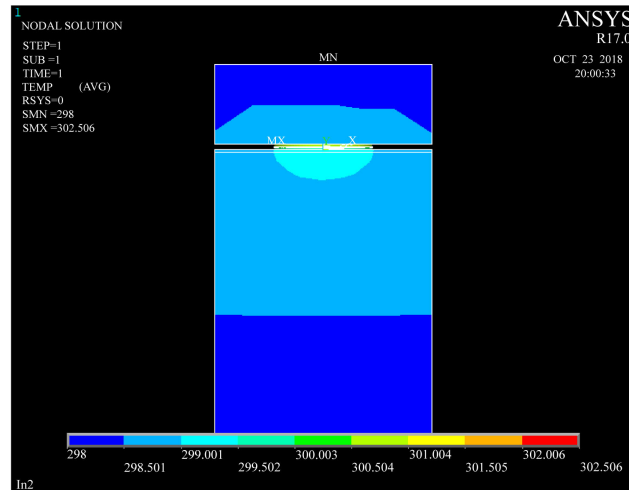
运算得到结果如图 3~6 所示，分别为  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料、 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料、In 焊料、AlN 散热片的热场分布，从结果中来看， $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料芯片工作温度为 302.559 K，温升 4.559 K； $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料芯片工作温度为 304.501 K，温升为 6.501 K；In 焊料芯片工作温度为 302.506 K，温升为 4.506 K；AlN 散热片的芯片工作温度为 303.131 K，温升为 5.131 K。



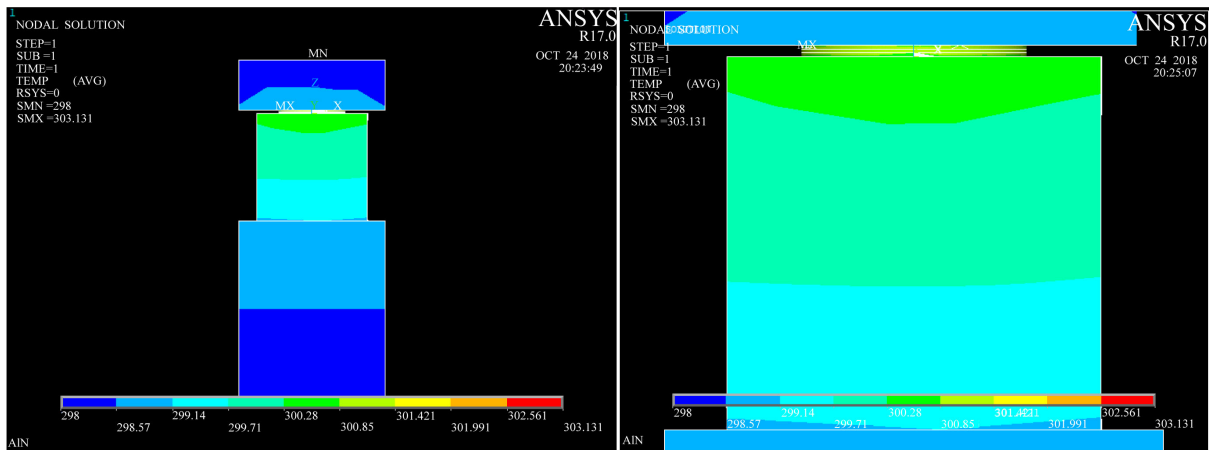
**Figure 3.** Thermal analysis results of  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  solder reverse packaging  
**图 3.**  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料倒封装热分析计算结果



**Figure 4.** Thermal analysis results of  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  solder reverse packaging  
**图 4.**  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料倒封装热分析计算结果



**Figure 5.** Thermal analysis results of In solder reverse packaging  
**图 5.** In 焊料倒封装热分析计算结果



**Figure 6.** Thermal analysis and calculating results of AlN radiator reverse packaging  
**图 6.** AlN 散热片倒封装热分析计算结果

从热分析结果可以看出 In 焊料导热性最好，芯片工作时温度最低，能够达到 302.506 K， $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料导热性最差，芯片工作温度最高，达到 304.501 K。 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  及 In 两种焊料芯片工作温度相差不大，仅为 0.053 K。从 AlN 散热片的计算结果图中可以看出，芯片温升为 5.131 K，温度颜色的条宽明显大于  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 、In 三种焊料计算结果的温度颜色条宽，AlN 散热片散热效果优于  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 、In 三种焊料。但 AlN 散热片的计算结果中，AlN 散热片的边界温度大于环境温度，可见模型中散热片的尺寸过小，没能充分将芯片产生的热完全散去，AlN 散热片的尺寸大小影响着微盘腔半导体激光器的散热效果。

此外我们对比了  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 、In 三种焊料的价格，In 焊料的消耗成本最低， $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  与  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  的成本均高于 In 焊料，其中  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  略高于  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料，可见 In 焊料具有非常高的性价比。但是由于 In 焊料的在高温下不够稳定，容易污染腔面，对芯片造成污损，影响正常工作。因此 In 焊料更适合少量实验封装测试，不适合大规模投产应用。 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  两种焊料虽然价格昂贵，保质期短，存储条件比较苛刻，但是在封装使用上更加稳定，熔点高性能稳定，能够适应长期的工作使用，因此现在在很多量化的使用中更多的使用  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  两种焊料。

## 4. 结论

本文采用有限元分析软件 ANSYS 建立倒封装微盘腔半导体激光器模型, 分析了在稳态条件下,  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$ 、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$ 、In 三种焊料以及 AlN 散热片对微盘腔半导体激光器散热效果的影响。由热分析结果可见, In 焊料的散热效果最好温升为 4.506 K,  $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料的散热效果最差为 6.501 K,  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料散热效果较 In 焊料略差接近 0.1 K。AlN 散热片的热扩散区域更大, 散热效果受散热片尺寸影响比较大。最后, 从热膨胀系数、焊料热稳定性以及焊料成本来看, In 焊料适用于基础实验,  $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  适用于要求严格的科研实验或批量生产。通过模拟 In 焊料、 $\text{Sn}_{0.2}\text{Au}_{0.8}$  焊料、 $\text{Sn}_{0.48}\text{In}_{0.52}$  焊料、AlN 散热片对微盘腔半导体激光器散热效果的影响, 为提升半导体激光器散热效果、延长器件使用寿命、提高其电光转换效率提供了参考依据。

## 基金项目

吉林省科技厅项目(编号: 20160101254JC); 国家自然科学基金项目(编号: 11474038); 预研基金项目(编号: 6141B010328); 预研基金项目(编号: 6142405030216240502)。

## 参考文献

- [1] 李雨霏, 晏长岭, 史建伟. 半导体微盘激光器特性及研究进展[J]. 半导体技术, 2016(5): 321-328.
- [2] Arik, M., Setlur, A., Weaver, S., *et al.* (2007) Chip to System Levels Thermal Needs and Alternative Thermal Technologies for High Brightness LEDs. *Journal of Electronic Packaging*, **129**, 328. <https://doi.org/10.1115/1.2753958>
- [3] 辛国锋, 瞿荣辉, 陈高庭, 等. 大功率半导体激光器阵列的封装技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(8): 54-57.
- [4] 宁永强, 王立军. 微腔光电子器件研究与发展[J]. 光机电信息, 2002(7): 33-38.
- [5] 吕晓萌, 黄永箴, 邹灵秀, 等. 半径 5  $\mu\text{m}$  的定向输出圆盘形微腔激光器[J]. 中国激光, 2017(9): 75-80.
- [6] 陆日, 许留洋, 高欣, 等. 电注入椭圆微腔半导体激光器热特性分析[J]. 中国激光, 2016(4): 42-47.
- [7] 鲁鹏程, 李建军, 郭伟玲, 等. 隧道带间级联双波长半导体激光器热特性模拟[J]. 光电子激光, 2004(6): 649-653.
- [8] 武斌, 李毅, 胡双双, 等. 非制冷 980 nm 半导体激光器封装设计与热特性分析[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 799-803.
- [9] 周路, 薄报学, 高欣, 等. 百瓦级多芯片半导体激光器稳态热分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1438-1443.
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [11] Saeed Moaveni, 莫维尼, 王崧, 等. 有限元分析: ANSYS 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)