

大功率半导体激光器封装热应力研究

袁庆贺^{1,2}, 井红旗^{1*}, 仲莉¹, 刘素平¹, 马晓宇^{1,2}

¹中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 利用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 分别对不同厚度焊料以及不同厚度 WCu 次热沉封装的大功率半导体激光器巴条进行模拟。结果表明:无论是 In 焊料还是 AuSn 焊料,其最大热应力均产生于 WCu 次热沉与 Cu 热沉界面处;相同厚度 In 焊料和 AuSn 焊料封装的激光器管芯热应力分别为 3.57 GPa 和 3.83 GPa,光谱峰值处波长分别为 800.5 nm 和 798 nm;降低焊料的厚度,有利于减小激光器管芯内部的热应力和温度,但焊料厚度过薄,则可能会导致激光器管芯焊接不牢或焊料分布不均匀、焊料层内部出现空洞等现象,因此焊料厚度的选择应从整体进行考虑;随着 WCu 次热沉厚度的增加,激光器芯片受到的热应力变小,但管芯温度升高,WCu 次热沉的最优厚度为 380 μm 。本研究结果为优化设计大功率半导体激光器巴条的封装提供了依据,对实际生产具有指导意义。

关键词 激光器; 封装; 热应力; COMSOL Multiphysics; 仿真

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001009

Thermal Stress in High-Power Semiconductor Laser Packaging

Yuan Qinghe^{1,2}, Jing Hongqi^{1*}, Zhong Li¹, Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2}

¹National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Semiconductor laser bars packaged with different thicknesses of solders and WCu submount are simulated using the multi-physical field simulation software of COMSOL Multiphysics. Results demonstrate that the maximum thermal stress of an In or AuSn solder occurs at the interface between the WCu submount and Cu heat sink. Thermal stresses of laser dies packaged using an In solder and an AuSn solder with the same thickness are 3.57 GPa and 3.83 GPa, respectively, and the corresponding wavelengths at the peak of spectrum are 800.5 nm and 798 nm, respectively. Reducing the solder's thickness is beneficial for reducing the thermal stress and temperature in the laser die. However, if the solder's thickness is too thin, it may cause weak welding of the laser core or uneven distribution of the solder, forming voids in the solder layer; hence, the selection of solder thickness should be considered as a whole. With increasing thickness of the WCu submount, the thermal stress of the laser die decreases; however, the temperature of the core rises. The optimal thickness of the WCu submount is 380 μm . This study provides a basis for optimizing the packaging of high-power semiconductor lasers and has guiding significance to practical production.

Key words lasers; package; thermal stress; COMSOL Multiphysics; simulation

OCIS codes 140.2020; 140.3070; 140.3290; 140.3295

1 引言

凭借着体积小、质量轻、效率高以及易于调制等优点,大功率半导体激光器被广泛应用于材料加工、

医疗和美容、军事与国防等领域^[1-6]。目前,室温下连续工作的大功率半导体激光器的最高电光转换效率大约为 70%^[7],因此工作时将会产生大量的废热。如果不能及时将多余的热量释放出去,将会造

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-05-09; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(41414010302)

* E-mail: jinghq@semi.ac.cn

成激光器管芯温度升高,导致材料禁带宽度发生变化,严重影响输出光束的稳定性。除此之外,激光器管芯与热沉材料之间的热膨胀系数不匹配,温度的变化将会导致热应力的产生,使输出光谱发生变化,若热应力过大,还会造成结合层开裂、管芯断裂等问题,严重影响器件的可靠性和寿命^[8],因此对半导体激光器封装热应力的分析至关重要。

目前,通过实验分析热应力的方法^[9]主要有应变计法、莫尔法、热光弹性法、X射线衍射法、中子衍射法等。通过实验方法分析热应力,不仅操作复杂、成本高,而且准确率较低。相比之下,软件模拟的方法已日渐成熟,若能合理设置模型边界和端口等条件,则可以获得与实验相一致的结果。2008年中国电子科技集团公司第十三研究所的王辉^[8]利用有限元软件 ANSYS 分析了不同焊料封装的半导体激光器的热应力分布情况。2016年北京航空航天大学的全伟等^[10]利用 ANSYS 软件设计仿真了一体化半导体激光器结构。2018年中国科学院西安光学精密机械研究所的陈天奇等^[11]同样利用有限元软件 ANSYS 分析了不同封装结构和材料对大功率半导体激光器阵列热应力和 Smile 值的影响。

本文利用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 分别对不同焊料、不同厚度焊料以及不同厚度钨铜 WCu 次热沉封装的大功率半导体激光器巴条进行模拟,测量了不同封装条件下激光器巴条的光谱分布,并对模拟和实验结果进行分析,为优化设计大功率半导体激光器巴条的封装提供参考,对实际生产具有指导意义。

2 基于 COMSOL Multiphysics 的热应力仿真过程

所设计的仿真结构如图 1 所示,从下至上依次为 Cu 热沉、WCu 次热沉、焊料、激光器芯片、焊料、WCu 次热沉。通过焊料将激光器芯片焊接到热沉上,封装结构中各层材料的热膨胀系数不匹配,温度变化将引起热应力和变形。为了便于处理,仿真中使用了一些近似:1)将复杂的激光器管芯结构等效成一层 GaAs 材料;2)各层材料的热膨胀系数等相关特性参数不随温度的变化而变化;3)只考虑温度变化引起的热应力,且当温度高于焊料熔点时,激光器管芯内无应力;4)忽略相变等因素的影响。

基于 COMSOL Multiphysics 软件的仿真步骤如下:首先,利用软件自带的模型向导,选择空间维度为三维结构,物理场为结构力学模块下的热应力

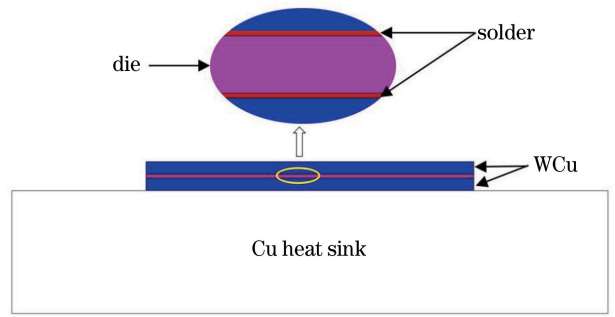


图 1 半导体激光器巴条的整体封装结构

Fig. 1 Overall package structure of semiconductor laser bar (包括固体力学和固体传热)场,求解类型为稳态求解。按照图 1 所示的结构,在 COMSOL Multiphysics 软件内建立相应的几何模型,并将其组合成联合体,然后为几何模型添加材料,相关材料参数如表 1 所示。接下来,最关键的就是热源和边界条件的设定,其直接决定了模型计算结果的收敛性及其与真实情况的一致性。由于热应力分析模块涉及固体力学和固体传热两个方面,因此要分别进行边界条件设定。在固体力学中,垂直于管芯方向的边界条件设定为自由膨胀;各层材料的交界面设置为一致连续对;在 Cu 热沉底面任意选择一点,在这一点施加固定约束条件。在固体传热中,将激光器管芯当作热源处理,热损耗功率为 50 W;将各层材料的交界面处设置为热接触边界条件;Cu 热沉地面的温度设置成室温(20 °C);其余各个界面设置成对流热通量边界条件,与外部空气进行热对流换热,环境温度为 20 °C。然后,对模型进行网格划分,将模型划分成四面体网格,网格划分越精细,计算结果越准确,对计算机内存的要求也更高,计算时间更长。在所设计的模型中,主要分析激光器管芯温度和热应力的分布情况,为使计算结果更加准确,将管芯、焊料的网格划分进行极细化处理;而为了提高计算速度、节省计算机内存,将 WCu 热沉及 Cu 热沉的网格划分进行粗化处理。最后,对所设计的模型进行计算,并对计算结果进行可视化处理。

3 结果分析与讨论

3.1 不同焊料

目前,在大功率半导体激光器巴条的封装中,广泛使用的焊料主要有 In 和 AuSn。In 焊料属于软焊料^[12],具有良好的塑性形变特性且应力较小,但高温环境容易导致焊层晶须的生长,从而使焊层热疲劳加速,产生严重的电迁移现象,导致激光二极管过早失效。AuSn焊料属于硬焊料^[13],其抗疲劳、

表 1 相关材料参数
Table 1 Related material parameters

Material	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Coefficient of thermal expansion / K^{-1}	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Poisson ratio	Young's modulus /Pa	Heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Melting point / $^{\circ}\text{C}$
Cu	8900	2.4×10^{-5}	390	0.37	1.1×10^{11}	395	—
WCu	17000	7×10^{-6}	180	0.3	3.4×10^{11}	750	—
In	7310	3.3×10^{-5}	81.6	0.4498	1.1×10^{10}	230	156.61
AuSn	14700	1.6×10^{-5}	57	0.405	6.8×10^{10}	150	280
GaAs	5330	5.8×10^{-6}	44	0.25	8×10^9	325	—

抗蠕变性能优异,屈服强度高,导热性能好,无需助焊剂,也不存在严重的电迁移现象,但延展性差,烧结过程会引入过大应力,因此对焊接工艺的要求更加严格。首先对 In 焊料和 AuSn 焊料封装的大功率半导体激光器巴条进行模拟,分析其工作时温度

和热应力分布情况。模拟中,Cu 热沉的尺寸为 $20000\ \mu\text{m}\times 20000\ \mu\text{m}\times 4000\ \mu\text{m}$,WCu 热沉的尺寸为 $11000\ \mu\text{m}\times 2000\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}$,In 和 AuSn 焊料的尺寸均为 $11000\ \mu\text{m}\times 2000\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$,激光器芯片的尺寸为 $11000\ \mu\text{m}\times 2000\ \mu\text{m}\times 120\ \mu\text{m}$ 。

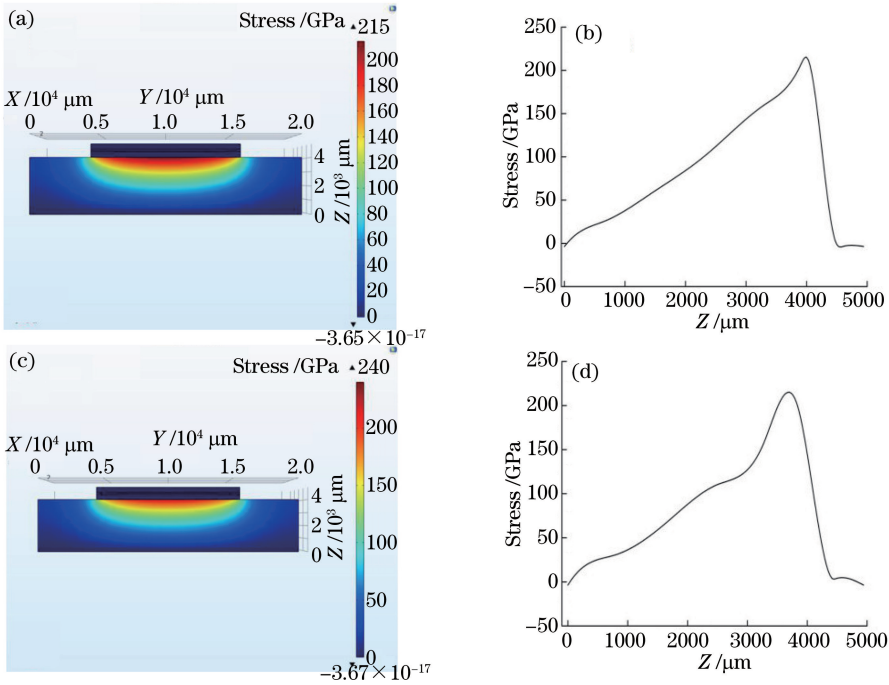


图 2 不同焊料封装激光器热应力分布云图和端面中轴线上应力分布。(a) In 焊料,热应力云图;

(b) In 焊料,端面中轴线上应力分布;(c) AuSn 焊料,热应力云图 ;(d) AuSn 焊料,端面中轴线上应力分布

Fig. 2 Nephograms of thermal stress distribution of laser dies with different solder packages and stress distributions on central axis of end face. (a) In solder, thermal stress nephogram; (b) In solder, stress distribution on central axis of end face; (c) AuSn solder, thermal stress nephogram; (d) AuSn solder, stress distribution on central axis of end face

仿真结果如图 2 和图 3 所示。从图 2(a)、图 2 (c)可以看出,无论是 In 焊料还是 AuSn 焊料封装的大功率半导体激光器,其热应力最大值均产生于 Cu 热沉与 WCu 次热沉的界面处,其值分别为 215 GPa和 240 GPa。图 2(b)与图 2(d)所示为结构端面中轴线上应力分布情况(Z 指以 Cu 热沉底面为参考 0 点,结构端面中轴线上坐标),In 焊料和 AuSn 焊料封装的激光器管芯的热应力分别为

3.57 GPa和 3.83 GPa。图 3 为封装结构温度分布情况,由图 3 可知,温度最大值产生于激光器管芯部分,In 焊料和 AuSn 焊料封装的激光器管芯的温度最大值分别为 61.8 $^{\circ}\text{C}$ 和 62 $^{\circ}\text{C}$ 。由表 1 可知,激光器管芯的热膨胀系数为 $5.8\times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$,In 焊料和 AuSn 焊料的热膨胀系数分别为 $3.3\times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ 和 $1.6\times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ 。相较于 AuSn 焊料,In 焊料的热膨胀系数与激光器管芯的热膨胀系数匹配程度更高,

且 In 焊料属于软焊料,激光器芯片产生的部分应力能够释放,而 AuSn 焊料属于硬焊料,应力得不到释放,因此 AuSn 焊料封装的激光器管芯所受热应力较大^[14]。同时,由于 In 焊料的热导率比 AuSn 焊料的热导率高,整体结构的散热能力更强,因此 In 焊料封装的激光器管芯的温度较低。为了验证仿真结果的正确性,根据图 1 所示的结构,分别用 In 焊料

和 AuSn 焊料封装了激光波长为 808 nm 的大功率半导体激光器巴条,并测量了其光谱分布,如图 4 所示。图 4(a)所示为 In 焊料封装的激光器光谱分布图像,图 4(b)所示为 AuSn 焊料封装的激光器光谱分布图像,其峰值分别为 800.5 nm 和 798 nm,两者之间波长相差 2.5 nm,相较于 In 焊料,AuSn 焊料封装的激光器管芯所受热应力较大,波长蓝移量较大。

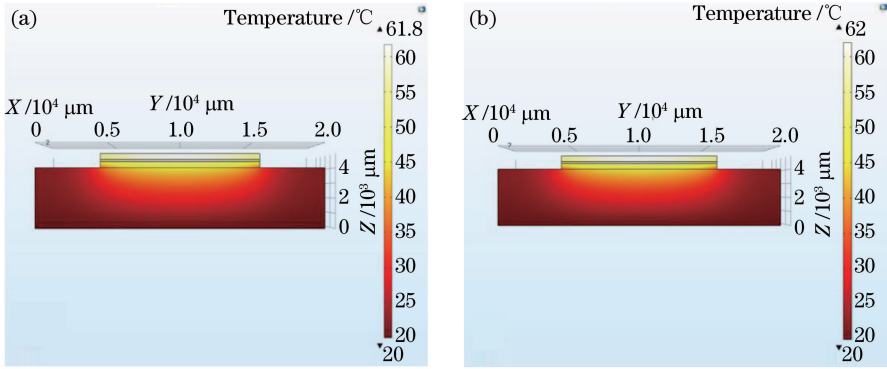


图 3 不同焊料封装激光器温度分布。(a) In 焊料;(b) AuSn 焊料

Fig. 3 Temperature distributions of lasers with different solder packages. (a) In solder; (b) AuSn solder

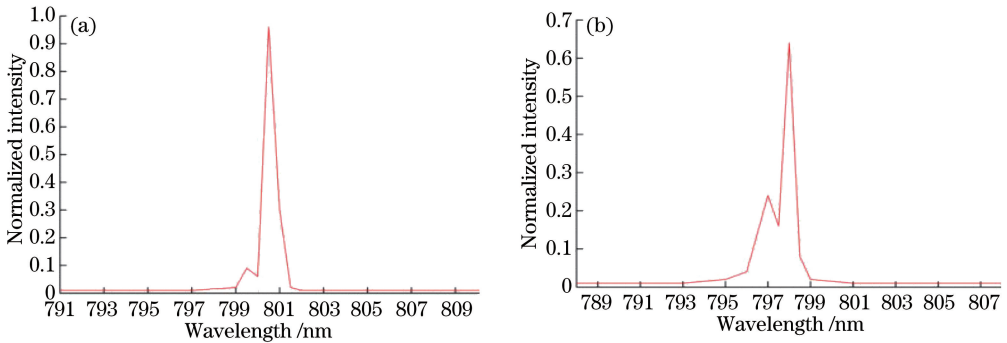


图 4 不同焊料封装的激光器光谱分布。(a) In 焊料;(b) AuSn 焊料

Fig. 4 Spectral distributions of lasers with different solder packages. (a) In solder; (b) AuSn solder

3.2 不同厚度焊料

由表 1 可知,无论是 In 焊料还是 AuSn 焊料,其热膨胀系数、热导率和杨氏模量等参数与激光器管芯及 WCu 热沉均有较大差别,焊料厚度的大小将对激光器管芯温度和热应力分布产生重要影响,为此本文对不同厚度焊料封装的大功率半导体激光器巴条进行热应力仿真。目前,实际生产中大功率半导体激光器巴条封装所使用的 AuSn 焊片的厚度约为 10 μm ,因此仿真中设置使用的 AuSn 焊料的厚度分别为 5, 10, 15, 20 μm ,分析不同厚度焊料对激光器管芯温度和热应力分布的影响。模拟中 Cu 热沉、WCu 热沉、激光器芯片的尺寸均与 3.1 节一致。

图 5 所示为激光器管芯的热应力和温度最大值随焊料厚度的变化关系。从图 5 可以看出,随着 AuSn 焊料厚度的增加,激光器管芯的热应力和温

度均呈现上升趋势。这主要可从热膨胀系数匹配和热导率两个方面进行分析:AuSn 焊料的热膨胀系数与激光器管芯的热膨胀系数差别较大,因此温度变化时激光器管芯内部将会产生较大的热应力;且 AuSn 焊料的热导率低,随着焊料厚度的增加,激光器管芯产生的热量更加难以释放,导致管芯温度升高,热应力增大,最终可能导致管芯破裂。从模拟结果可知,焊料的厚度越小,对激光器管芯内部热应力和温度的降低越有利,但在实际应用过程中却并非如此。若焊料厚度过薄,则可能会导致激光器管芯焊接不牢,或焊料分布不均匀,焊料层内部有空洞产生等。激光器焊接不牢,则可能会导致管芯与 WCu 次热沉之间开裂;而焊料层内部有空洞,则会导致局部热点效应,严重影响器件工作的稳定性和寿命。因此,焊料层厚度的确定是由多项因素共同决定的,

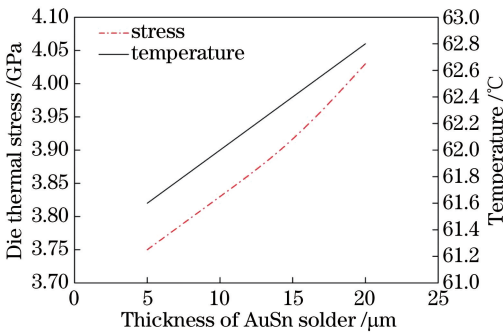


图5 不同厚度 AuSn 焊料封装的激光器芯片热应力和温度最大值分布

Fig. 5 Thermal stress and temperature maximum distribution of laser dies packaged by AuSn solders with different thicknesses

有待于进一步优化。

3.3 不同厚度 WCu 次热沉

为了解决激光器管芯与 Cu 热沉热膨胀系数不匹配的问题,在大功率半导体激光器巴条的封装中常使用 WCu 次热沉作为过渡热沉,可以有效地缓解激光器管芯热应力过大的问题,对管芯起到保护作用。但相较于 Cu 热沉,WCu 次热沉的热导率较差,若厚度过大,则会对激光器芯片的散热造成不利影响;若厚度过小,则起不到缓解热应力的作用,为此对不同厚度 WCu 次热沉对激光器管芯温度和热应力分布的影响进行了分析。目前,在实际生产中大功率半导体激光器巴条封装所使用的 WCu 次热沉的厚度约为 400 μm ,因此仿真中设置使用的 WCu 次热沉的厚度分别为 300, 350, 400, 450, 500 μm 。模拟中 Cu 热沉、AuSn 焊料、激光器芯片的尺寸均与 3.1 节一致,激光器管芯的热应力和温度随 WCu 次热沉厚度的变化如图 6 所示。

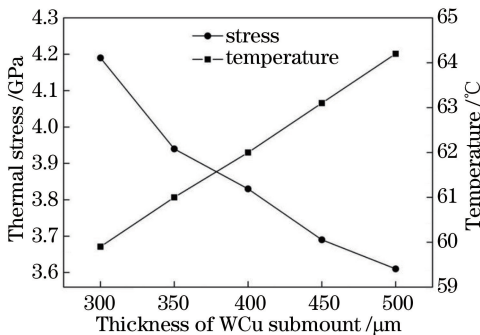


图6 不同厚度 WCu 次热沉封装的激光器管芯热应力和温度最大值分布

Fig. 6 Thermal stress and maximum temperature distribution of laser dies packaged by WCu submount with different thicknesses

从图 6 可以看出,当 WCu 次热沉的厚度从 300 μm 增加到 500 μm 时,激光器管芯热应力从 4.19 GPa降低至 3.61 GPa,而管芯温度最大值从 59.9 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 64.2 $^{\circ}\text{C}$ 。相较于 Cu 热沉,WCu 次热沉的热膨胀系数与激光器管芯热膨胀系数更加接近,因此随着 WCu 次热沉厚度的增加,芯片受到 Cu 热沉的热应力变小。但由于 WCu 次热沉的热导率较 Cu 热沉差,因此 WCu 次热沉厚度的增加将会导致器件整体热阻增加,散热性能较差,激光器管芯温度升高。综合考虑激光器管芯的热应力和温度最大值分布,最佳 WCu 次热沉的厚度为 380 μm 。

4 结 论

近年来,随着材料外延生长技术和芯片制备工艺的成熟,封装在大功率半导体激光器的应用中扮演的角色越来越重要。封装质量的好坏,直接决定了器件工作的稳定性和使用寿命。本文以 808 nm 大功率半导体激光器巴条的封装为研究对象,并结合多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics,对不同焊料、不同厚度焊料和不同厚度 WCu 次热沉封装的激光器进行了相关的实验和模拟。研究结果表明:相较于 AuSn 焊料,In 焊料封装的激光器管芯应力较低;减小焊料厚度,有利于降低激光器管芯的应力,但焊料厚度过薄,则可能会导致激光器管芯焊接不牢或焊料分布不均匀、焊料层内部有空洞产生等现象。增加 WCu 次热沉的厚度,可以降低管芯受到的应力,但管芯温度上升,最优的 WCu 次热沉厚度为 380 μm 。

参 考 文 献

- [1] Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. Applied Surface Science, 2003, 208/209: 125-136.
- [2] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers: technology and applications [M]. New York: Springer, 2007, 128: 3888.
- [3] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F201-F209.
- [4] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.
王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.
- [5] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, et al. Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of

- Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
- 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [6] Jing H Q, Zhong L, Ni Y X, *et al.* Thermal analysis of high power density laser diode stack cooling structure [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(1): 81-87.
- 井红旗, 仲莉, 倪羽茜, 等. 高功率密度激光二极管叠层散热结构的热分析[J]. 发光学报, 2016, 37(1): 81-87.
- [7] Crump P, Grimshaw M, Wang J, *et al.* 85% power conversion efficiency 975-nm broad area diode lasers at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 76% at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [C] // 2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2016: JWB24.
- [8] Wang H. Thermal stress and deformation analysis of semiconductor lasers packaging [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(8): 718-720.
- 王辉. 半导体激光器封装中热应力和变形的分析[J]. 半导体技术, 2008, 33(8): 718-720.
- [9] Yan Z D, Wang H L. Thermal stress [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 93-122.
- 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 93-122.
- [10] Quan W, Li G H, Chen X, *et al.* Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1080-1086.
- 全伟, 李光慧, 陈熙, 等. 一体化半导体激光器的 ANSYS 热仿真及结构设计 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1080-1086.
- [11] Chen T Q, Zhang P, Peng B, *et al.* Effect of packaging on thermal stress and smile of high power semiconductor laser arrays [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 129-139.
- 陈天奇, 张普, 彭勃, 等. 封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响 [J]. 光子学报, 2018, 47(6): 129-139.
- [12] Gao S X, Wei B, Lü W Q, *et al.* Failure analysis of high power diode laser array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(s1): 97-100.
- 高松信, 魏彬, 吕文强, 等. 高功率二极管激光器失效特性研究 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(s1): 97-100.
- [13] Yoon J W, Chun H S, Jung S B. Reliability evaluation of Au-20Sn flip chip solder bump fabricated by sequential electroplating method with Sn and Au [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 473(1/2): 119-125.
- [14] Liu X S, Zhao W, Xiong L L, *et al.* Packaging of high power semiconductor lasers [M]. New York: Springer, 2015: 155-166.