

文章编号: 0258-7025(2010)11-2769-05

808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装

徐会武 任永学 安振峰 牛江丽 任浩 闫立华

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要 针对高功率全固态激光器抽运源的需求, 开展了 808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装技术研究。理论上从封装应力、封装热阻和光束整形等三方面分析了大功率激光器封装的要求。解释了封装应力来源、表现和缓解途径; 模拟了微通道热沉结构的封装散热效果云图; 指出了光束整形的必要性以及与封装残余应力的关系。技术上通过研制铟/金复合焊料体系, 配合控制烧焊曲线和烧焊过程, 得到了良好的烧焊效果; 结合设计使用高精度光束整形装配夹具, 实现阵列平均“smile”值 $2\ \mu\text{m}$, 发散角 $6\ \text{mrad}$ 的实验效果。

关键词 激光器; 封装; 烧焊; 应力; 热阻; 准直

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi 10.3788/CJL20103711.2769

Packaging of 808 nm 1500 W Continuous Wave Operation Perpendicularity Laser Diode Stack

Xu Huiwu Ren Yongxue An Zhenfeng Niu Jiangli Ren Hao Yan Lihua

(13th Research Institute, China Electronic Technology Company, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract To meet the requirements of high power laser diode pumped solid state lasers, packaging of 808 nm 1500 W continuous wave (CW) operation perpendicularity laser diode stack is reported. Theoretically, the influences of packaging induced stress, thermal resistance, and beam collimation on high power laser diode stack fabrication are explained detailedly. The origination, exhibition and reduction approach of the residual stress are illuminated. Simulation of temperature distribution of the micro channel heat sink is depicted. Necessity of the beam collimation and the relation between soldering process and focusing optics system are illustrated. The residual stress is reduced by investigating and using indium gold composite solder and optimizing the parameters of the soldering process, and the alignment precision is improved by designing collimation tools that a average value of $2\ \mu\text{m}$ for the smile and $6\ \text{mrad}$ for the divergence angle could be realized.

Key words lasers; package; soldering; stress; thermal resistance; beam collimation

1 引言

近年来,随着激光二极管阵列抽运技术的发展,全固态激光器在军事领域的应用越来越广泛^[1,2]。全固态激光器既具备普遍适用性,同时根据预定作战平台的不同,又各有所侧重:陆军主要研制用于整合到陆军武器系统中的固体激光器技术,海军主要研制用于整合到电驱动舰艇和航空器上的固体激光器技术,而空军主要研制用于整合到空间和机载平台上的固体激光器技术。

军用全固态激光器的重要发展方向是高能固体

激光器,包含高能热容固体激光器和高功率光纤激光器^[3,4]。在激光技术研究中,10 kW 级高能固体热容激光器和 1 kW 级高功率光纤激光器已开发成功。固体激光器在热容型运行方式下,激光介质所受的最大应力要远小于常规运行激光介质的应力,因而能够在短时间内获得极高的输出能量。美国三军尤其是陆军更希望开发适合下一代战术激光武器应用的高能全固态热容激光器。目前,美国 Livermore 实验室利用激光二极管抽运固体热容激光器平均输出功率已达到 $67\ \text{kW}$ ^[5],这一突破性进展依赖于高功率连续

收稿日期: 2009-12-08; 收到修改稿日期: 2010-01-29

基金项目: 国家 863 计划(2008AA000506)资助课题。

作者简介: 徐会武(1978-),男,工程师,主要从事为半导体激光器封装方面的研究。E-mail: hw0762@163.com

半导体阵列激光器封装水平的提高。

由于大功率半导体激光器抽运源的国际禁运,国内高平均功率全固态激光器的研究起步较晚,但近期半导体封装技术迅速发展并接近国际水平,使高平均功率全固态激光器的研制水平的提高成为可能。本文开展了 808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装技术的研究并取得一些成果。

2 理论分析

影响高功率半导体阵列激光器封装质量的三个因素是:封装应力、封装热阻和光束整形。

2.1 封装应力

芯片烧焊过程中的热应力残余是封装应力的主要来源。热应力的产生过程如下:当两种不同材料的界面紧密相连,并受到热源作用时会产生膨胀,如果两者热膨胀系数(CTE)不同,则在界面连接处产生不同方向的力。其数值取决于两种材料的 CTE 的差值和温度变化程度。

常用的 GaAs 半导体激光器芯片 CTE 为 $6.7 \times 10^{-6}/\text{K}$, Cu 热沉的 CTE 为 $17 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。GaAs 材料能承受的最大机械应力为 70 MPa,通常设计值不超过 35 MPa^[6,7]。对半导体激光器而言,热应力在芯片内部的应力集中以后,往往导致光场的变形,可靠性下降,甚至将芯片拉裂而失效。因此,对于 CTE 不匹配的材料烧焊,为避免热应力的残余,在

烧焊结构设计上,使用延展性好、具有塑性形变的铜作为焊料,以缓解烧焊过程中所造成的残余应力的影响^[8,9]。

2.2 封装热阻

对 100 W 工作的激光器 bar 条来说,尽管电光转换效率可以达到 55%,但仍然存在高于 80 W 散热需求。为保证其长期可靠工作,结温一般控制在低于 50 °C,假设环境温度为 25 °C,理论上器件热阻需要低于 0.31 °C/W。

由于微通道结构能够收到良好的散热效果,因此在设计上需要采用微通道热沉散热方式,其微观结构如图 1(a) 所示^[10]。微通道的基本结构是在体材料上制备深 d_c , 宽度 w_c 的一组通道,其肩宽为 w_r 。将该结构底部密封,使得冷却液在压降 ΔP 下沿其 y 方向流动。当激光器芯片在微通道顶部表面产生热量 P_T 时,热量将从顶部衬底流向墙栅,再由叶片与流过的冷却液进行热交换,最后热量由冷却液带走,以维持热沉的表面温度近似恒定。

微通道热沉的热阻是齿长 L , 厚度 d , 深度 d_c , 宽度 w_c , 肩宽 w_r , 进口水流速度及水流温度的函数。该研究采用有限元软件对阵列激光器中微通道热沉在加载情况下的温度场分布,进行了模拟和结构优化,得到了无氧铜材质微通道热沉前端工作时的散热效果图,如图 1(b) 所示。

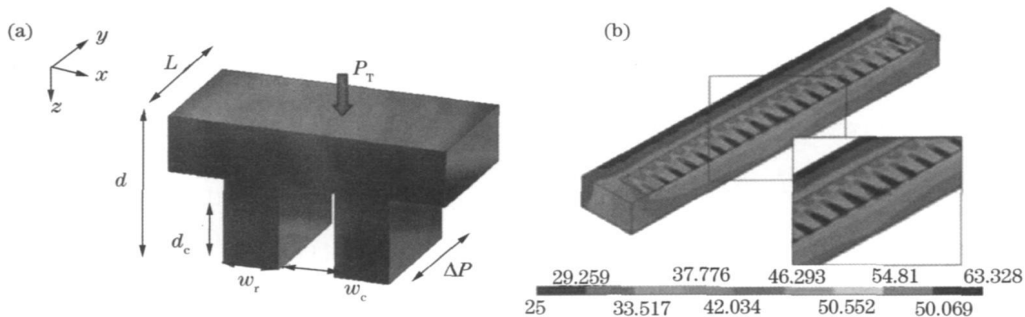


图 1 (a) 微通道热沉微观结构, (b) 微通道热沉宏观热场模拟

Fig. 1 Microstructure (a) and simulation of temperature distribution (b) of the micro channel heat sink

2.3 光束整形

一方面,半导体阵列激光器在作固体激光器的抽运源时,由于其固有发散角问题(快轴方向为 $40^\circ \sim 60^\circ$,慢轴为 $6^\circ \sim 10^\circ$),直接使用就会产生耦合效率低、光束质量差等不良后果,因此需要采用非曲面准直透镜对阵列中的 bar 条的快轴进行光束整形,使其快轴发散角压缩到小于 φ' (约 18 mrad)。

另一方面,激光器 bar 条横向长度为 10 mm,采

用热膨胀系数与 GaAs 材料不匹配的热沉烧焊时,热应力残余造成的光场变形(“smile”)严重,为解决该问题,也需要进行光束整形。观察“smile”现象的装置需要对 bar 条分别进行快轴和慢轴方向的准直(图 2^[11])。在进行光束整形后,封装残余应力在准直后光斑形貌上有所体现。应力分布均匀时,光斑“smile”比较对称[图 3(a)],而应力分布不均匀时,“smile”情况则比较复杂[图 3(b)]。

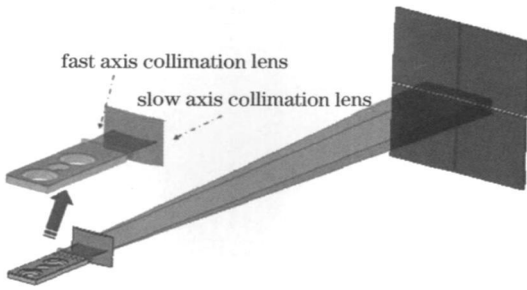


图 2 Bar 条准直及监测装置图

Fig. 2 Setup for focusing and monitoring of the single bar beam collimation

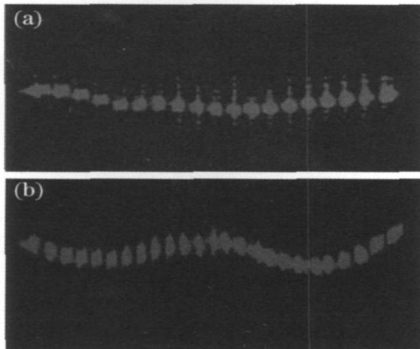


图 3 不同封装残余应力分布情况对应的“smile”现象

(a) 应力分布均匀, (b) 应力分布不均匀

Fig. 3 Different smiles under (a) uniform and (b) non uniform residual stress distribution conditions

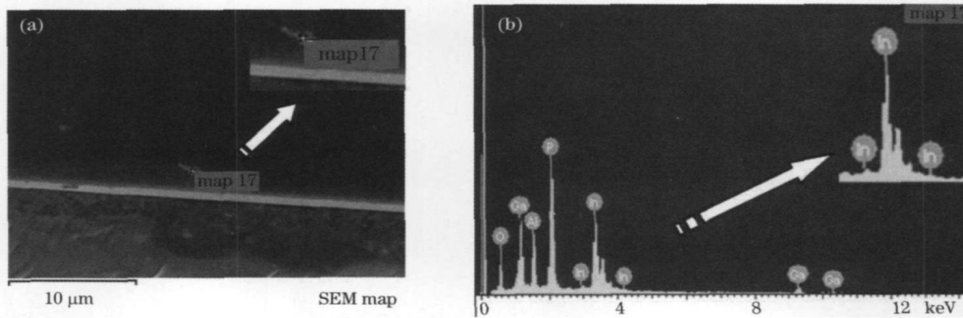


图 4 钎焊料烧焊后激光器腔面扫描电镜图片(a)及元素分析结果(b)

Fig. 4 SEM image (a) and analytical result (b) of laser bar facet after soldering by pure indium

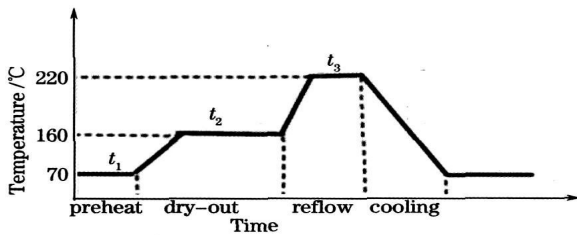


图 5 烧焊工艺曲线

Fig. 5 Typical reflow profile

3 技术研究

3.1 芯片烧焊

目前钎焊料烧焊广泛应用于高功率半导体激光器的热沉^[12],但是实际应用中钎焊料有两大缺陷^[13,14]: 1) 钎焊料极易氧化而导致热沉和芯片间不能形成良好的浸润状态,影响器件焊接强度及器件热阻; 2) 在烧焊过程中,钎焊料经常在激光器侧面、腔面发生“攀爬”现象,导致挡光甚至短路。因此解决钎焊料烧焊问题成为封装技术关键问题之一。图 4 为采用纯钎焊料烧焊后的 bar 条腔面某区域扫描电镜(SEM) 图片及元素分析结果,由图可见其腔面的污染物质为钎焊料。

首先在焊料组分和制备过程中进行优化。通过钎焊料表面蒸发薄金层,降低钎焊料氧化程度,抑制钎焊料“攀爬”;利用电子束蒸发实现钎-金复合焊料的沉积,通过控制真空度、膜层厚度等关键工艺参数,增强沉积膜层的致密性,减小氧化程度。一般而言,真空度优于 10^{-4} Pa, 钎蒸发厚度为 3~ 6 μm, 金层厚度为 15 nm 左右,制备的焊料表面细腻光亮,熔化均匀性、一致性好,芯片烧焊后能够得到良好的浸润界面。

其次,在烧焊过程中进行优化。实际工艺中,采用特定的气体进行保护和还原,优化烧焊曲线。在实验中采用的保护性气体为氮气,还原性气氛为甲酸;优化后的烧焊曲线分成四段: 预热段、保温段、熔化段、冷凝段(如图 5 所示)。

3.2 装配准直

光束整形质量控制体现在控制封装中各微通道单元准直角度及阵列装配后整体光场均匀性。bar 条的准直和筛选以降低“smile”值为主,单条激光器光场控制在 3 μm 以下;阵列装配中,要保证水平及垂直方向的位置、距离一致性。

Bar 条准直和阵列装配依靠精密微调系统及高精密切具实现。通过设计采用阵列激光器专用的准

直夹具,来减小半导体激光器单条准直角度,提高阵列的光束均匀性。用于阵列装配和光束整形的六维精密调整架的调整精度为 10 μm,调整架臂和准直装配附件局部图如图 6 所示。

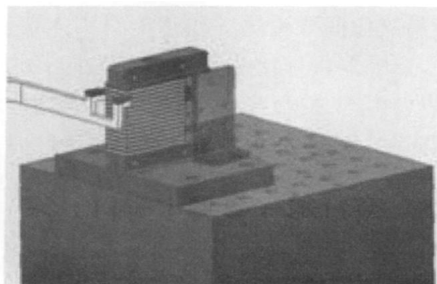


图 6 准直装配示意图

Fig. 6 Setup for packaging and focusing process

4 实验结果

4.1 焊接质量

芯片烧焊获得了良好的焊接质量,显微镜下观察腔面焊料填充饱满,超声扫描显微镜(SAM)进行内部检测结果表明,焊接层内部浸润均匀,空洞面积小于焊接面积的 0.5%。图 7,8 分别为激光器腔面焊接形貌和内部焊接层扫描,其中图 8 中圆圈位置为发生在隔离槽附近的微小空洞。

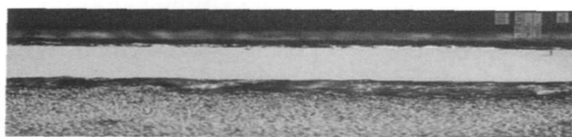


图 7 激光器腔面

Fig. 7 Facet of the laser bar

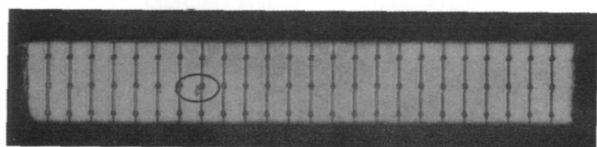


图 8 焊接层内部 SAM 分析

Fig. 8 SAM analysis of the soldering layer

4.2 器件参数

组装后的阵列激光器器件外型结构见图 9。将该阵列在水温(25 ± 1) °C条件下进行微通道单元的“smile”值测试和准直后的快轴发散角测试,阵列进行近场光斑监测得到以下结果:近场光斑分布均匀,“smile”值和阵列快轴发散角小。器件平均“smile”2 μm,阵列快轴发散角为 6 mrad。图 10(a)为近场光斑,图 10(b)为微通道单元的典型“smile”图片。

图 11 为器件的光-电流-电压(L-I-V)测试结

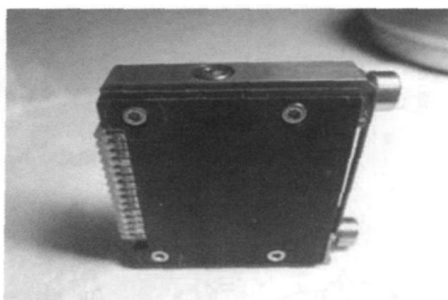


图 9 器件外型结构

Fig. 9 Profile of the laser diode stack

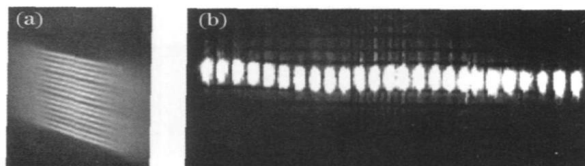


图 10 (a) 阵列近场光斑, (b) 器件微通道单元的典型“smile”

Fig. 10 Near field image of the laser diode stack (a) and typical smile of the single bar (b)

果。由图可见,器件在 110 A 测试电流下,输出功率约为 1600 W,其电光转换效率接近 55%。该阵列激光器稳定工作时输出功率为 1500 W。另外,测试表明激光器微通道单元的平均热阻为 0.22 °C/W,低于设计值。

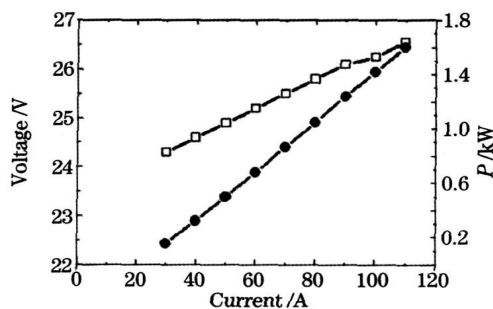


图 11 阵列参数 L-I-V 测试结果

Fig. 11 L-I-V test results of the laser diode stack

5 结论

针对高功率全固态激光器抽运源的需求,开展了 808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装研究。理论分析了影响封装的应力、热阻、光束整形等因素在大功率阵列激光器封装中的作用、影响和控制方法。通过研制钢(3~ 6 μm)/金(15 nm)复合焊料,在烧焊过程中采用保护还原气氛,优化烧焊曲线和烧焊工艺参数,降低了残余应力和封装热阻,解决了钢焊料在使用过程中的氧化问题,提高了烧焊质量和器

件的可靠性;通过设计光学装配夹具,采用六维高精度调整架进行阵列装配和光束整形等调整,提高了准直精度。实现了阵列平均“smile”值 $2\ \mu\text{m}$,发散角 $6\ \text{mrad}$,平均热阻 $0.22\ \text{°C/W}$,稳定输出功率 $1500\ \text{W}$,满足设计要求。

参 考 文 献

- 1 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser pumped solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~ 1618
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1605~ 1618
- 2 Wu Bo, Du Weimin, Hou Tianjin *et al.*. High power narrow linewidth fiber amplifier and laser linewidth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1866~ 1869
伍 波, 杜伟敏, 侯天晋等. 高功率窄线宽光纤放大器及放大 linewidth 特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1866~ 1869
- 3 Abrams Jim. House backsmisile defense system [J]. *Boston Globe*, 1999, **24**(5): 64265
- 4 J. Limpert, F. Rser, S. Klingebiel. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~ 545
- 5 A. L. Shah, S. N. Datta, A. R. Singh *et al.*. Investigating transient thermal effects in flash lamp pumped heat capacity Nd:YAG rod laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(11): 1033~ 1041
- 6 S. A. Merritt, P. J. S. Heim, Si Hyung Cho *et al.*. Controlled solder interdiffusion for high power semiconductor laser diode die bonding[J]. *IEEE T. Compon., Pack., Manufact. Technol.*, 1997, **20**(2): 141~ 145
- 7 Michael Leers, Konstantin Boucke. Cooling approaches for high power diode laser bars[C]. IEEE, 58th Electronic Components and Technology Conference, 2008, 1011~ 1016
- 8 R. Stakse, J. Sebastien, J. Wenzel *et al.*. Influence of mounting stress on polarization degree of electroluminescence of laser diode bars[C]. IEEE, Lasers and Electro Optics Society 13th Annual Meeting, 2000, 13~ 16
- 9 Xingsheng Liu, Jingwei Wang, Peiyong Wei. Study of the mechanisms of spectral broadening in high power semiconductor laser arrays [C]. IEEE, 58th Electronic Components and Technology Conference, 2008, 1005~ 1010
- 10 K. Jeevan, I. A. Azid, K. N. Seetharamu. Optimazation of double layer counter flow (DLCF) microchannel heat sink used for cooling chips directly[C]. IEEE, 6th Electronics Packaging Technology Coference, 2004, 553~ 558
- 11 W. Pittroff, G. Erbert, B. Eppich *et al.*. Highly stable conductively cooled 1 kW-QCW diode laser stacks with high duty cycle[C]. IEEE, 58th Electronic Components and Technology Conference, 2008, 991~ 997
- 12 W. W. So, C. C. Lee A. Fluxless process of fabricating Ir/Au joints on copper substrates[C]. IEEE, 49th on Components and Packaging Technologies, 1999, 377~ 382
- 13 Lili Ma, Shengxiang Bao, Jing Peng *et al.*. Failure analysis of In/Au solder joints[C]. IEEE, 7th International Conference on Electronics Packaging Technology, 2006, 1~ 4
- 14 D. Lorenzen, M. Schroder, J. Meusel *et al.*. Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 30~ 41