

管式炉中半导体激光器巴条封装

张秋月¹, 井红旗², 袁庆贺², 马晓宇², 董连和^{1*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 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

摘要 采用 808 nm 大功率半导体激光器巴条进行了封装实验, 对影响封装质量的两个重要因素, 即管炉温度和烧结时间进行了优化。结果表明, 在管炉温度为 650 °C、烧结时间为 100 s 时, 焊料层界面空洞最少, 半导体激光器巴条的 smile 效应值最低, 阈值电流最小, 波长更加稳定, 烧结质量最优。

关键词 激光器; 半导体激光器; 封装; 烧结; smile 效应

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.091402

Packaging of Semiconductor Laser Bars in Tube Furnace

Zhang Qiuyue¹, Jing Hongqi², Yuan Qinghe², Ma Xiaoyu², Dong Lianhe^{1*}

¹ Institute of Opto-Electronics Engineer, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract The 808 nm high-power semiconductor laser bars are used for packaging to optimize the two important factors that affect the package quality: the furnace tube temperature and the soldering time. The results show that the solder layer has the least voids when the soldering time is 100 s at a tube furnace temperature of 650 °C. Moreover, the obtained semiconductor laser bar has the lowest smile effect value, the smallest threshold current, a more stable wavelength, and the best soldering quality.

Key words lasers; semiconductor laser; packaging; soldering; smile effect

OCIS codes 140.5960; 140.2020; 140.3460

1 引言

大功率半导体激光器由于其体积小、重量轻、可靠性高、转换效率高、功耗低、驱动电源简单、价格低廉、使用安全等优点, 因此被广泛应用于工业生产、军事应用、材料加工、激光医疗美容等行业^[1-3]。大功率半导体激光器的研制过程包括两个重要环节: 半导体芯片生产技术和芯片封装技术。因为封装质量直接影响器件的性能参数、光束质量、可靠性及工作寿命^[4], 所以封装技术必须解决半导体激光器的散热和封装引入应力等问题。首先是实现无空洞均匀烧结, 使器件产生的废热能高效、均匀地排出; 其

次是解决烧结技术的热膨胀不匹配, 降低或消除封装应力对器件光谱质量、输出功率、器件可靠性及寿命等的影响。

目前国内封装技术与国外还有很大的差距, 因此, 进行可提高激光器的可靠性、延长激光器的工作寿命的激光器烧结技术的研究十分必要。烧结温度和烧结时间是影响烧结质量的两个重要因素^[5], 本文通过优化烧结时间和管式炉中心的腔室温度, 获得最优烧结条件, 在该条件下烧结的焊料层的空洞率较低、半导体激光器巴条的 smile 效应最低、阈值电流最小、波长更稳定。

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-10-10; 录用日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(41414010302)

* E-mail: custdong@126.com

2 实 验

2.1 管式炉介绍

管式炉被广泛应用于工矿企业、教学专用设备、大学实验室、航天及高等院校等场所,用于预热、淬火、烧、炖、退火、灰化、精炼及其他高热处理实验。管式炉加热温区配备有由热电偶、数显式智能调节器(PID)和可控硅组成的闭环控制系统,采用高精度可控硅整流器(SCR)自动精确控温,精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温范围为室温 $+20\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比于贴片机,管式炉操作简单,成本低廉,更适合批量加工生产。

2.2 芯片制作

利用金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)设备(AIXTRON,德国),在GaAs衬底上生长出应变量子阱大光腔808 nm激光器外延片,量子阱采用InGaAs材料,波导层和限制层采用具有不同Al组分的AlGaAs材料,外延层结构如图1所示。生长完成的外延片经光刻、金属化、减薄等工艺,形成具有19个发光区的半导体激光器巴条,填充因子为40%,腔长为1 mm,前后腔面分别镀增透膜和高反膜,单巴条脉冲条件下输出功率大于100 W。

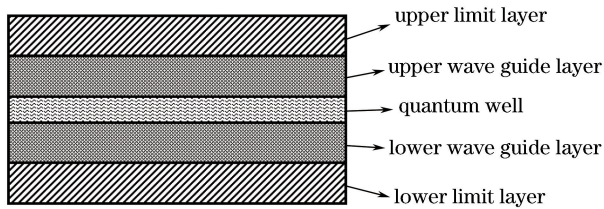


图1 外延结构图

Fig. 1 Epitaxial structure

2.3 结构选择

目前,封装常用的焊料为In和AuSn。采用二次烧结,P面采用管式炉进行AuSn焊料烧结,不易产生电迁移和热电迁移效应,可提高半导体激光器的可靠性;N面热量不高,选取In焊料,采用人工封装。其中,AuSn焊料为购买的 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚焊片,采用电镀法在Cu电极条上制备In焊料,其封装结构如图2所示。从上至下依次为WCu热沉、 $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ 焊片、半导体激光器巴条、镀In焊料的电极条和Cu热沉。

$\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ 焊料的熔点为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。多次实验结果表明,管炉温度较低($<600\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,焊料不能完全达到浸润状态,导致烧结质量差;管炉温度较高($>700\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,将损伤芯片的有源区,导致结电压偏小甚至短路。

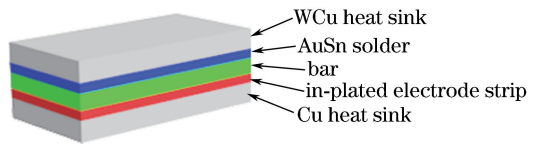


图2 半导体激光器巴条封装结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of packing of semiconductor laser bar

2.4 烧结

1) 夹具的选择及清洗

在烧结过程中,采用夹具固定芯片,对芯片适当加压。施压过大会损坏芯片,过小则浸润不好,影响烧结质量。施压均匀,焊料层厚度才能均匀,从而确保器件的导电和导热性能^[6]。烧结前用无水乙醇清洗夹具,避免其上的杂质(包括油污、水气、灰尘和其他有机物)影响实验结果。

2) 烧结

采用管式炉,在氮气环境下,分别在 $600, 650, 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等3个温度条件下进行烧结。温度为管式炉设定温度,快速升温速率为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,降温速率为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。芯片与热沉之间的烧结质量不但会影响器件热阻、散热和电流的分布,而且直接影响烧结热应力的大小。

3 器件的测试与分析

3.1 空洞

烧结成功的标志是芯片与热沉间的界面牢固、平整和没有空洞。烧结过程中接触界面出现空洞,会减小焊料接触面积,增加电流密度和电阻,易形成局部热点,使管芯温度升高,导致器件寿命降低或直接失效^[7],对半导体激光器的寿命和可靠性产生巨大影响。X射线检测是利用X射线技术观察、研究和检验样品微观结构、化学组成、表面或内部结构缺陷的无损实验技术,根据不同材料对X射线具有不同的吸收率和透射率,利用衰减后的射线强度来检测样品内部缺陷^[8]。利用X射线检测仪(VERTEX A 130, VJ公司,美国)对 $600, 650, 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等3个管炉温度下的样本进行测试,结果如图3所示。

由图3可知, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 管炉温度的烧结质量很差,焊料层出现大面积空洞; $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 管炉温度的烧结质量较好,焊料层空洞率最低。 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 管炉温度下烧结的样本,由于温度过低导致焊料没有充分熔化,焊料层表面形成了密集的圆形花纹,表面起伏较大,如图3(a)所示。 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 管炉温度下烧结的

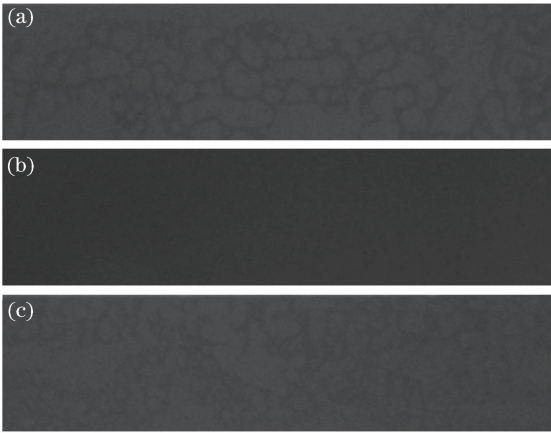


图 3 不同管炉温度下样品的 X 射线图。
(a) 600 °C; (b) 650 °C; (c) 700 °C

Fig. 3 X-ray patterns of samples at different tube furnace temperatures. (a) 600 °C; (b) 650 °C; (c) 700 °C
样本, 由于合金晶粒在高温下不断生长, 形成较大尺寸的枝状晶^[9-10], 呈现较粗糙的表面形貌, 如图 3(c) 所示。650 °C 管炉温度下烧结的样本如图 3(b) 所示, 表面光洁而均匀, 焊料层空洞率最低, 说明该条件下焊料熔化完全, 与巴条表面充分浸润, 结构紧密, 烧结质量较好。

3.2 smile 效应

大功率半导体激光器列阵工作时, 会出现各发光单元不在一条直线上的现象, 这种整体发光弯曲的现象被称为 smile 效应^[11-12]。smile 效应在很大程度上会影响激光器的光束质量, 限制其应用。通过分析半导体激光器巴条的 smile 效应, 可以反映封装过程中所引入应力的大小^[13], 对优化封装参数起重要作用。

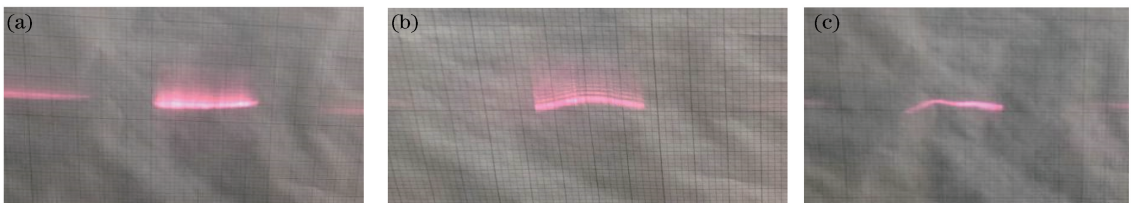


图 5 不同烧结时间下的 smile 效应成像。(a) 100 s; (b) 110 s; (c) 120 s

Fig. 5 Smile effect imaging at different soldering time. (a) 100 s; (b) 110 s; (c) 120 s

所用快轴准直透镜的焦距 $f_c = 9 \text{ mm}$, 屏与快轴准直镜之间的距离 $z = 1200 \text{ mm}$ 。通过分析图 5 中接收屏上像的弯曲, 根据(1)式进行计算, 可得管炉温度为 650 °C, 烧结时间为 100, 110, 120 s 时的 smile 效应值分别为 19.5, 45.0, 52.5 μm 。由计算结果可知, 烧结时间为 110 s 和 120 s 时 smile 效应均较大, 这是由于在高温加热过程中产生的热应力导致的芯片弯曲变形, 与张勇等^[15]的测试结果基本一致。

用。选取 650 °C 烧结条件下的芯片作为样本, 在焊接较为牢固、空洞较少的基础上, 测试其 smile 程度。直接测量 10 mm 长度的发光单元在垂直于 P-N 结方向发生的偏移量 ($d < 10 \mu\text{m}$) 非常困难。因此, 采用半导体激光器巴条发光腔面成像放大的方法进行偏移量的测量^[14], 检测系统如图 4 所示。

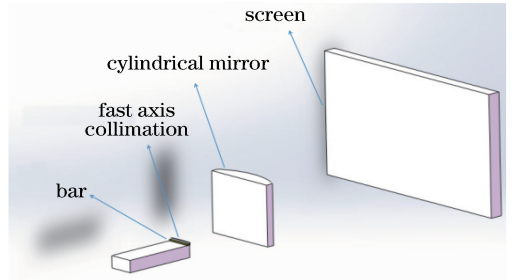


图 4 半导体激光器巴条测试系统

Fig. 4 Test system of semiconductor laser bar

典型快轴准直镜(FAC)有效焦距 $f_c < 1 \text{ mm}$, 对出射激光束快轴方向进行准直, 准直后光束全宽为 0.8 mm, 发散角为 5 mrad, 包含了 95% 的激光能量。柱面镜有效焦距为 20 cm, 可对激光束慢轴方向进行准直, 最后半导体激光器巴条发光束在接收屏上成像。实验中对半导体激光器巴条发光图进行观察记录。

定义弯曲最高点与弯曲最低点的差为半导体激光器列阵 smile 效应值, 用 Δy 表示。半导体激光器巴条实际弯曲值 Δy_0 的计算式为

$$f_c / \Delta y_0 = z / \Delta y, \quad (1)$$

式中, z 为屏与快轴准直镜之间的距离。

通过上述系统, 对 650 °C 条件下不同烧结时间的样品的 smile 效应进行测试, 结果如图 5 所示。

3.3 光电参数测量

考虑到烧结温度和时间对激光器的波长、输出功率、阈值电流等性能的影响, 对上述样本进行光电参数测量。采用大功率半导体激光器参数测试仪进行测量, 测试条件为: 管座温度为 25 °C, 脉冲宽度为 200 μs , 重复频率为 50 Hz。在 650 °C 管炉温度条件下, 烧结时间分别为 100, 110, 120 s 的样品的光电参数结果见表 1。

表1 100 W 半导体激光器巴条光电参数

Table 1 Photoelectric parameters of 100 W semiconductor laser bar

| Serial number | Soldering time /s | Output power /W | Threshold current /A | Operating current /A | Operating voltage /V | Photoelectric efficiency /% |
|---------------|-------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | 100 | 101.0 | 18.42 | 113 | 1.80 | 44.8 |
| 2 | 110 | 102.5 | 17.15 | 114 | 1.76 | 47.0 |
| 3 | 120 | 100.4 | 18.72 | 114 | 1.94 | 45.9 |

由表1可知,当烧结时间为100,110,120 s时,光电转换效率分别为44.8%,47.0%和45.9%。其中,烧结时间为100 s时所得样品的阈值电流最低,smile效应最小,光学特性最好。

4 结 论

利用管式炉烧结大功率半导体激光器,研究了不同管炉温度和烧结时间对烧结质量的影响。X射线检测结果表明,在管炉温度为650℃条件下,焊料充分扩散后,反应形成的微米级晶粒细密,得到的焊料层空洞少,表面形貌光洁平整,烧结牢固。利用半导体激光器 smile 测试系统,研究管炉温度为650℃、不同烧结时间下样品的 smile 效应。结果表明,当烧结时间为100 s时,smile效应最小,并且在该条件下,输出功率较高,阈值电流较低,光电转换效率高。综上所述,利用管式炉烧结半导体激光器巴条的最佳工艺条件为:管炉温度为650℃,烧结时间为100 s。该结果为进一步提高半导体激光器的生产效率提供参考数据。

参 考 文 献

- [1] Xin G F, Qu R H, Fang Z J, *et al.* New development of high power semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(2): 3-8.

辛国锋, 瞿荣辉, 方祖捷, 等. 大功率半导体激光器的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(2): 3-8.

- [2] Ma X Y, Wang J, Liu S P. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(2): 189-194.

马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. *红外与激光工程*, 2008(2): 189-194.

- [3] 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.

- [4] Jin G Q. Array technology of high power semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 38(8): 31-35.

金菊其. 大功率半导体激光器的阵列化技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, 38(8): 31-35.

- [5] Xiong H P, Li X H, Mao W, *et al.* Wetting behavior of Co based active brazing alloys on SiC and the interfacial reactions[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(22/23): 3417-3421.

- [6] Xi D M. Research on high-frequency packaging technology of high power semiconductor laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.

席道明. 大功率半导体激光器高频封装技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

- [7] Xin G F, Qu R H, Chen G T, *et al.* Packaging techniques of high power semiconductor laser arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(8): 54-57.

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.

- [8] Geng L, Ma X, Xiao Z T, *et al.* Calibration and filtering of X-ray line array detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1226001.

耿磊, 马潇, 肖志涛, 等. X射线线阵探测器校正与滤波[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12): 1226001.

- [9] Yoon J W, Chun H S, Koo J M, *et al.* Au-Sn flip-chip solder bump for microelectronic and optoelectronic applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(11/12): 1463-1469.

- [10] Yu D Q, Oppermann H, Kleff J, *et al.* Stability of AuSn eutectic solder cap on Au socket during reflow [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2009, 20(1): 55-59.

- [11] Wang X P, Li Z J, Liu Y, *et al.* Smile effect and package technique for diode laser arrays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 552-557.

王祥鹏, 李再金, 刘云, 等. 半导体激光器列阵的

- smile 效应与封装技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 552-557.
- [12] Guo L H. Study on measurement of packaging-induced stress in high-power diode laser arrays[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
郭林辉. 大功率二极管激光阵列封装中的应力检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [13] Jia G N, Yao S, Pan F, *et al.* Smile effect of laser diode arrays measured by stylus scan method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3576-3579.
贾冠男, 尧舜, 潘飞, 等. 探针扫描法快速测量半导体激光阵列 Smile 效应[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3576-3579.
- [14] Chen H, Li J, Zhou X L, *et al.* Measures to reduce smile effect of semiconductor laser diode arrays caused by packaging thermal stress [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(5): 656-662.
陈华, 李静, 周兴林, 等. 封装热应力致半导体激光器“Smile”效应的抑制方法[J]. 发光学报, 2017, 38(5): 656-662.
- [15] Zhang Y, Yang R X, An Z F, *et al.* Study on packaging-induced stress in 4 mm cavity length high-power single emitter semiconductor laser [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1441-1445.
张勇, 杨瑞霞, 安振峰, 等. 4 mm 腔长高功率单管半导体激光器封装应力的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1441-1445.