

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0225-04

高功率二极管激光封装技术

唐 淳^{1,2} 高松信¹ 严地勇¹ 邵冬竹¹ 左 蔚¹ 武德勇¹ 成 军²

(¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900
²浙江大学光电信息工程学系光电子技术所, 杭州 310027)

提要 研究了高功率二极管激光器芯片焊接工艺和铜微通道冷却器技术, 针对不同应用需求, 分别设计了背冷式及微通道冷却器模块式堆叠封装结构。进行了线阵和堆叠封装实验, 并给出了实验测试结果。

关键词 二极管激光, 线阵, 堆叠, 封装, 铜微通道冷却器

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Package Technique for High Power Diode Laser

TANG Chun^{1,2} GAO Song-xin¹ YAN Di-yong¹ SHAO Dong-zhu¹
ZHUO Wei¹ WU De-yong¹ CHEN Jun²

(¹ Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900
² The Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract The diode bar soldering technics and copper micro-channels cooler technique for high power diode laser package have been investigated. To meet the application needs, two different kind of stack package structure with back surface cooling and the micro-channels cooling have been designed. The package experiments of linear array and stack array were carried out and the experimental results were presented.

Key words diode laser, linear array, stack array, package, copper micro-channels cooler

1 引 言

二极管激光器(LD)具有体积小、重量轻、效率高、寿命长等特点,在光纤通信、光存储、激光打印、材料加工、医疗、固体激光抽运等领域有着广阔应用前景。近年来,随着 LD 抽运固体激光技术的快速发展和工业加工应用需求的日益增长,对 LD 输出的功率要求越来越高,但输出功率提高的同时,芯片的废热也将更严重地影响激光效率、输出功率及寿命,因而芯片封装成为研制长寿命、高可靠性的高功率 LD 的关键环节之一。本文对热管理要求苛刻的高平均功率线阵和堆叠二极管激光器封装技术进行了研究,并实验封装出连续 40 W 940 nm 线阵和准连续 500 W 808 nm 堆叠二极管激光器。

2 二极管芯片焊接技术

由于二极管芯片的面积很小,芯片与热沉间的热通量密度高达 1000~2000 W/cm²,必须采用特殊

的焊接工艺将芯片与热沉焊接在一起,确保芯片与热沉界面热阻最小,这是决定封装器件性能最为关键的一个因素。在选择热沉时,通常采用具有高热导率的材料提高传热能力,众多材料中,铜是使用最普遍的热沉材料。但由于铜与 LD 芯片的热膨胀系数相差较大,焊接时热膨胀不匹配导致的界面应力,将造成焊接面断裂脱落,采用柔软耐热冲击的钎焊料是解决问题的有效方法。为此实验研究了基于低温金相固化的微接触技术,以实现芯片与热沉的理想焊接。焊接界面由热沉及芯片表面的高熔点金(Au)或铜(Cu)和低熔点钎(In)或锡(Sn)焊料层构成,对于 Au、In 结构,当焊接温度大于钎的熔点 156.6℃时,钎开始溶化并沁润金层,进而金与液相钎扩散,在加热 200℃ 6 min 或 225℃ 3 min 时,形成了厚度合适的固相金钎合金层。焊接中芯片表面均匀加载适当的力,使焊接面紧密接触,对于实现理想的焊接至关重要。通过热老化实验发现,金与钎层厚度之比对焊接寿命有显著影响。芯片焊接利用

了自行设计及研制的带有真空(或惰性气体)室的再流焊台,并采用常规的再流焊接程序。本实验研究的微接触技术具有以下优点:

焊接在低温条件进行,且常规的再流焊炉即可满足焊接要求;低温焊接降低了扩散速率,减少了因扩散形成的空洞,可有效提高焊接质量;焊接层很薄(3~5 μm),减小了热阻,同时也减少了贵重金属金的消耗量;合金层具有高的熔点,提高了温度可靠性,同时使多界面分层焊接成为可能。

3 铜微通道液体冷却器

高平均功率二极管激光器水平的提高得益于散热冷却技术的快速发展,当今国际上主要发展了基于湍流原理的冲击式高效液体冷却器^[1]和层流原理的硅微通道冷却器^[2],最近铜微通道冷却器也得到实际应用^[3,4]。上述冷却器的研制需采用掩模、光刻、化学腐蚀、热扩散焊或静电粘合技术,工艺复杂,成本较高。这里我们设计了一种结构与硅微通道冷却器类似,但加工容易的铜微通道液体冷却器,冷却器由微通道散热板(进水板)、分水板和出水板组成,各层均为无氧铜,液体通道宽 0.1~0.15 mm,采用精密线切割工艺加工,各层通过扩散焊工艺焊接成整体,微通道冷却器面积为 11~25 mm²,厚度为 1.2~1.7 mm,冷却器结构如图 1 所示。铜微通道冷却器在水压 1 amt,流量 400 ml/min 时,热阻为 0.35 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,可用于高平均功率芯片线阵和堆叠封装。

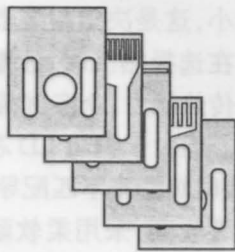


图 1 铜微通道液体冷却器结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of copper micro-channels cooler

4 堆叠封装结构设计

针对不同应用需求,分别研究了背冷式和铜微通道冷却模块式两种封装结构。

背冷式封装结构是指首先把单个芯片(P面)烧结在次热沉上,形成次封装,见图 2(a),次热沉为去应力无氧铜或铜钨合金,厚 0.4~1.2 mm,绝缘陶瓷片胶粘在次热沉上,与热沉绝缘,上表面镀导电金

层,芯片 N 面与陶瓷片上表面用热超声金丝压焊约 100 根直径为 25 μm 的金丝,实现电连接。次热沉为芯片的正极,镀金陶瓷片为负极。将多个次封装堆叠串联形成面阵封装,如图 2(b)所示。由于 LD 是大电流工作器件,为了减小串联电阻,降低焦耳热对芯片工作的影响,各次封装之间用焊料焊接在一起。芯片工作时的废热通过各自的次热沉传导至背面,共同由一个冲击式高效液体冷却器冷却控温。次热沉冷却面与冷却器间采用 BeO 陶瓷绝缘,避免次封装间的短路。为了有效减小封装器件的热阻,芯片与次热沉、次热沉彼此之间、次热沉与 BeO 绝缘层及 BeO 与冷却器间分别采用不同熔点的焊料,依次焊接。这种封装结构的占空比一般小于 20%,对于更高占空比及连续 LD 的封装可采用微通道冷却模块式封装结构。

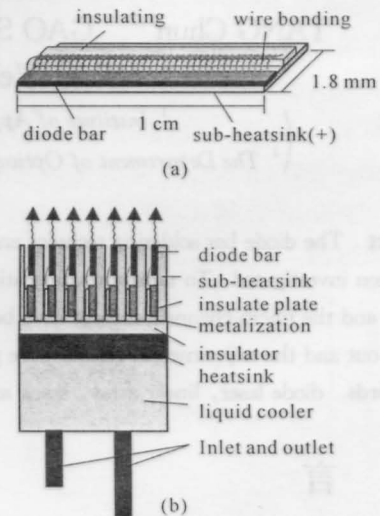


图 2 背冷式堆叠封装结构示意图。(a) 次封装结构;
(b) 二维堆叠的 LD

Fig. 2 Schematic diagram of stacks package by back surface cooling. (a) sub-assembly structure; (b) packaged 2D-stack LD

铜微通道冷却模块式封装是将 LD 芯片直接焊接在铜微通道冷却器上,形成一个可单独工作的模块,多个模块用螺栓串联堆叠形成面阵,如图 3 所示,各模块间采用橡胶垫实现水密封。封装可以根据实际需要的功率对模块进行堆叠,单个模块损坏时还可方便拆卸和更换,不足之处是由于微冷却器厚度限制,封装器件的功率密度较低,一般只有 300~700 W/cm^2 。

5 封装实验及结果分析

线阵封装采用开发式热沉设计,将商业标准化

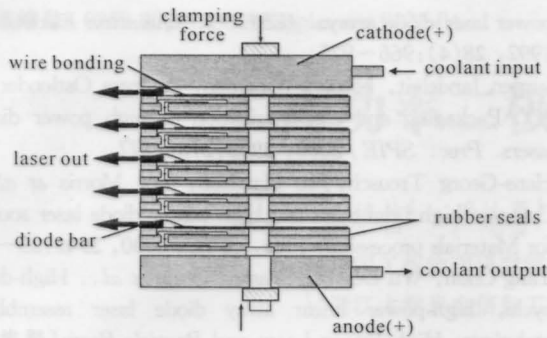


图3 铜微通道冷器堆叠封装结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of stack package by copper micro-channels cooler

的连续 40 W LD 芯片直接焊接在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$ 的无氧铜热沉上,热沉通过热电致冷或水冷器冷却控温。在工作电流 60 A、电压 1.81 V 时,激光连续输出 40.4 W,图 4 是实验测试的功率、电压与工作电流关系曲线。激光阈值电流 13 A,串联电阻 $5.3\text{ m}\Omega$,斜效率 0.85 W/A ,电光效率 37%,在激光功率 10~40 W,热沉温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,中心波长为 $940.9\text{ nm} \sim 947.9\text{ nm}$,相应的谱线半高宽为 $0.93\text{ nm} \sim 1.53\text{ nm}$ 。该激光器可用作 Yb:YAG 固体激光器的抽运源。

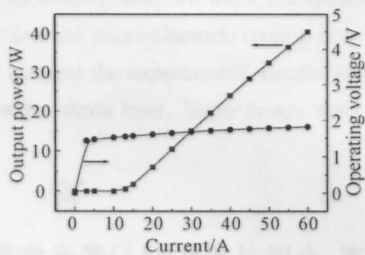
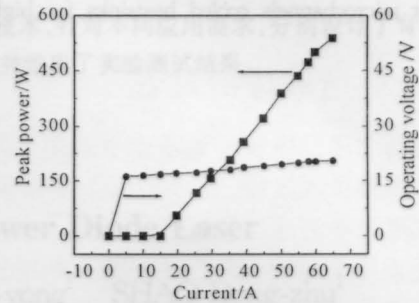


图4 940 nm LD 输出功率、电压与电流关系曲线

Fig.4 Output power and operating voltage of 940 nm LD as a function of current

背冷式封装中,次热沉采用去应力无氧铜,经光学抛光后溅射一层 Au 膜,与芯片焊接表面蒸镀铜焊料,在氮气保护环境下焊接成次封装。在低占空比条件下测试次封装性能,挑选功率、阈值、中心波长、谱宽等性能参数一致的用于堆叠封装,共堆叠了 10 条。BeO 绝缘陶瓷用 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚的高纯度铜预成形焊料与高效铜多通道液体冷却器焊接在一起^[5],次封装与 BeO 间用导热胶粘接。图 5 是实验得到的背冷式封装面阵 LD 功率、电压与电流的关系曲线,在激光脉宽 $200\text{ }\mu\text{s}$,重复频率 100 Hz、工作电流 70 A、电压 20.5 V 时,激光输出 538 W,中心波长 809.2 nm ,谱线半高宽 3.5 nm ,阈值电流 20 A,电

光效率 37.5%。每个次封装的串联电阻为 $8.5\text{ m}\Omega$,串联电阻较大的主要原因是次热沉表面氧化,焊接状态不理想。在 200 Hz 重复频率下,输出功率及激光效率均有所下降,70 A 时最大功率为 439 W,中心波长 811.9 nm ,谱宽 3.4 nm 。与 100 Hz 工作时相比,谱宽没有增宽,说明芯片冷却均匀,而中心波长偏移较大,说明用导热胶粘接工艺只能满足低占空比工作的要求,而不适于高重复频率运转。

图5 背冷式堆叠封装 LD 输出功率、电压与电流曲线
Fig.5 Output power and operating voltage of back surface cooling stack LD as a function of current

单个铜微通道冷却器封装采用了峰值功率 100 W 的二极管芯片,实验分别测试了脉冲宽度 $200\text{ }\mu\text{s}$,工作频率 100 Hz、300 Hz、500 Hz 及 600 Hz 时的输出功率,如图 6 所示。在不同的工作频率下,激光输出功率为 $104\text{ W} \pm 3\%$,中心波长 $806.6\text{ nm} \sim 808.6\text{ nm}$,谱线宽度 $2.93\text{ nm} \sim 3.05\text{ nm}$,阈值电流 23.6 A,没有出现随占空比提高输出功率下降及谱线展宽的情况,说明铜微通道冷却器散热冷却效果理想。

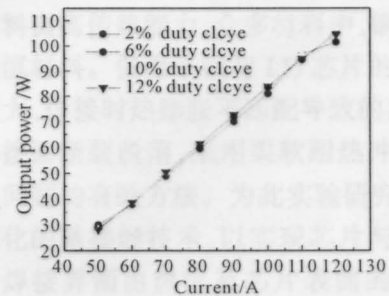


图6 输出功率与电流关系曲线

Fig.6 Output power of LD packaged by copper micro-channels cooler as a function of current

铜微通道冷却器堆叠封装实验中只堆叠了 3 条峰值功率 50 W 的二极管芯片,用于验证铜微通道冷却器堆叠封装的可行性和考核堆叠器件的性能。在工作电流 70 A,占空比 15% 时,激光功率为 150

W,中心波长 808 nm,激光阈值电流 23 A。实验结果表明,铜微通道冷却器封装结构简单,堆叠容易,可以满足高占空比激光器堆叠需要。铜微通道冷却器的冷却性能目前正在做进一步的测试。

参 考 文 献

1 T. J. Blanc, R. E. Niggemam, M. B. Parekh. *Soc. Autmot. Eng. Paper*, No. 831127, 1983
 2 Ray Beach, William J. Bennett, Barry L. Freitas *et al.*. Modular microchannels cooled heatsinks for high average

power laser diode arrays. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):966~975
 3 Jurgen Jandeleit, Nicolas Wiedman, Andreas Ostlender *et al.*. Packaging and characterization of high power diode lasers. *Proc. SPIE*, 2000, **3945**:270~277
 4 Hans-Georg Treusch, Jim Harrison, Bor Morris *et al.*. Compact high brightness and high power diode laser source for Materials processing. *Proc. SPIE*, 2000, **3945**:23~31
 5 Tang Chun, Wu Deyong, Yang Diyong *et al.*. High-duty cycle, high-power linear array diode laser assembling technique. *High Power Laser and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2000, **12**(5):544~546(in Chinese)

3 铜微通道液冷冷却器

高功率激光二极管激光器水平封装技术得益于液冷冷却器技术的发展。液冷冷却器是一种基于微通道原理的冷却器。微通道冷却器具有体积小、散热效率高、结构简单等优点。本文设计了一种铜微通道液冷冷却器。该冷却器由铜板加工而成，具有结构简单、散热效率高、体积小等优点。本文首先介绍了微通道冷却器的基本原理，然后详细描述了该冷却器的结构设计、加工工艺和性能测试。实验结果表明，该冷却器具有结构简单、散热效率高、体积小等优点，可以满足高功率激光二极管激光器的冷却需求。



Fig. 1. Schematic diagram of the micro-channel liquid cooling device.

4 功率激光二极管激光器封装

功率激光二极管激光器封装技术是激光技术的重要组成部分。本文介绍了一种基于铜微通道液冷冷却器的高功率激光二极管激光器封装技术。该封装技术具有结构简单、散热效率高、体积小等优点。本文首先介绍了该封装技术的原理，然后详细描述了该封装器的结构设计、加工工艺和性能测试。实验结果表明，该封装器具有结构简单、散热效率高、体积小等优点，可以满足高功率激光二极管激光器的封装需求。

高功率激光二极管激光器水平封装技术得益于液冷冷却器技术的发展。液冷冷却器是一种基于微通道原理的冷却器。微通道冷却器具有体积小、散热效率高、结构简单等优点。本文设计了一种铜微通道液冷冷却器。该冷却器由铜板加工而成，具有结构简单、散热效率高、体积小等优点。本文首先介绍了微通道冷却器的基本原理，然后详细描述了该冷却器的结构设计、加工工艺和性能测试。实验结果表明，该冷却器具有结构简单、散热效率高、体积小等优点，可以满足高功率激光二极管激光器的冷却需求。



Fig. 2. Output power of the laser diode array as a function of current.

功率激光二极管激光器封装技术是激光技术的重要组成部分。本文介绍了一种基于铜微通道液冷冷却器的高功率激光二极管激光器封装技术。该封装技术具有结构简单、散热效率高、体积小等优点。本文首先介绍了该封装技术的原理，然后详细描述了该封装器的结构设计、加工工艺和性能测试。实验结果表明，该封装器具有结构简单、散热效率高、体积小等优点，可以满足高功率激光二极管激光器的封装需求。