

大功率半导体激光器封装技术发展趋势及面临的挑战

刘兴胜, 杨林, 张艳春

(西安炬光科技有限公司, 陕西 西安, 710119)

本文综述了现有大功率半导体激光器(其中包括单发射腔, bar 条, 水平阵列和垂直叠阵)的封装技术, 并讨论其发展趋势。分析半导体激光器封装技术存在的问题和面临的挑战, 并给出解决问题和迎接挑战的方法和策略。

大功率半导体激光器及其泵浦固体激光器具有体积小、重量轻、光电转换效率高、性能稳定、可靠性高、和寿命长等优点, 已经成为光电行业中最有发展前途的产品, 被广泛应用于工业、军事、医疗和直接的材料处理等领域。组成大功率半导体激光器的基本单元是单发射腔或者单阵列(单阵列由多个单发射腔线性排列而成)。图 1 给出了单发射腔半导体激光器示意图,

图 2 给出了单阵列半导体激光器的发光示意图。

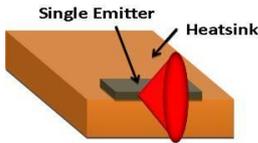


图 1 单发光腔半导体激光器发光示意图

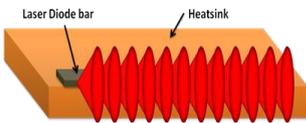


图 2 大功率单阵列半导体激光器发光示意图

对于半导体激光器而言, 输出功率、转换效率和可靠性是描述器件性能的三个主要参数。随着芯片制备技术的成熟、成本的降低、性能的提高, 半导体激光器出现了新的发展趋势, 主要有高输出功率、

高亮度、无钢化封装、窄光谱和低“smile”效应。本文综述了现有大功率半导体激光器的封装技术, 并讨论了其发展趋势。随着半导体激光器的发展, 半导体激光器封装技术目前存在的的具体问题和面临的挑战, 本文给出解决问题和迎接挑战的方法和策略。

高输出功率

许多新的应用领域要求半导体激光器具有更高的输出功率。增加输出功率主要有两种方式: 1、提高芯片生长技术从而增加单发射腔半导体激光器输出功率。2、提阵列高半导体激光器发光单元的个数从而提高输出功率。为进一步提高光输出功率, 提出了多种封装技术, 其中包括多单管模组、水平叠阵、垂直叠阵、面阵。

单发射腔: 单发射腔半导体激光器最大光输出功率受限于灾难性光学腔面损伤 (COMD) 或 Thermal Rollover 现象, 其输出功率与这两个参数的关系如图 3 所示。COMD 产生的主要原因是由于光吸收和非辐射复合导致的腔面过热而使腔毁坏。目前发展了一些新技术能很好的克服 COMD, 从而提高输出功率, 例如腔面钝化、非吸收镜面和非泵浦窗。Thermal Rollover 现象是由于产生的热量高于制冷装置能够冷却的热量, 通常此时在腔内将累积

大量热量, 使腔内的温度显著上升。为了避免 Thermal Rollover 现象产生, 应尽量降低器件的热阻。增加腔长和增大发光区宽度能够明显的降低热阻, 因而单发射腔半导体激光器的腔长越长, 其输出功率越高。随着 COMD 和 Thermal Rollover 现象的改善, 输出功率为 5-8W, 波长 $\lambda = 808\text{nm}$ 和输出功率为 8-12W, 波长 $\lambda = 9xx\text{nm}$, 发光区宽度分别为 200um 和 100um 的单发射腔半导体激光器已在市场上广泛应用。

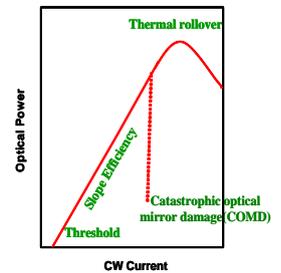


图 3 单发射腔半导体激光器光输出功率和驱动电流之间的关系示意图

单阵列: 为增加芯片的输出功率, 将单发射腔排成一维线阵集成为阵列, 此结构通常称为巴条, 其结构如

图 2 所示。最常见的巴条封装结构包括传导冷却型 CS 封装和微通道液体冷却型封装两种, 它们的结构分别如图 4 (a) 和 (b) 所示。根据填充因子和腔长的不同, 连续波条件下阵列半导体激光器输出

功率可高达上百瓦。为保证商业产品的可靠性，通常市场上使用的半导体激光器的填充因子为 20%或 30%，波长 $\lambda = 808\text{nm}$ ，输出功率为 60W，采用传导冷却方式；对于更高填充因子的单阵列半导体激光器，输出功率可高达 80W 至 100W。对于输出功率为 100W 的巴条，通常采用液体制冷。

图 5 给出两类冷却方式的商用单阵列半导体激光器，分别采用传导制冷和微通道液体制冷时的功率-电压-电流和光谱特性曲线。

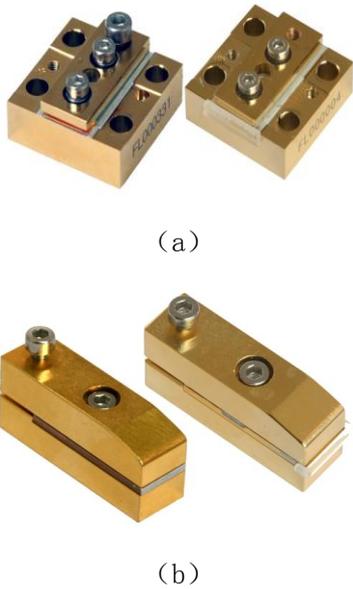
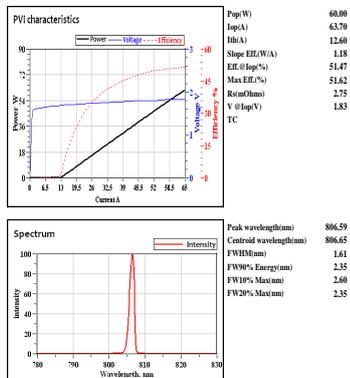
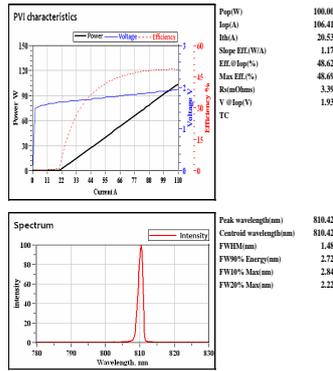


图 4 阵列激光器实物图 (a) 单阵列传导冷却封装 (b) 单阵列微通道液体制冷封装带有准直 (右图) 和不带准直 (左图)



(a)



(b)

图 5 商用的典型的功率-电压-电流和光谱曲线 (a) 传导冷却型 (b) 液体制冷型

提高阵列半导体激光器输出功率所面临的主要问题就是热管理和热应力管理[1]。热管理包括散热系统的设计和“无空洞”贴片技术：对于单阵列半导体激光器，由于阵列半导体激光器各个发光单元产生的热量相互干扰和整体散热不均匀，导致器件性能稳定性降低和限制功率上升；如果贴片层中存在空洞将明显的影响阵列半导体激光器的性能，包括输出功率和可靠性等。针对热管理尽管已提出了多种散热方式，例如金刚石传导散热和微通道散热技术，如何提高散热效率仍然是阻碍阵列半导体激光器高功率输出的主要因素。现已有两种降低贴片层中的空洞的方法：一种是在合理的控制环境温度和压力情况下使用贴片技术；另一种方法是真空回流技术。热应力通常是由于阵列激光器和衬底的热膨胀系数 (CTE) 失配所导致。热应力不仅限制了用于封装的衬底材料/热沉的选择，而且影响半导体激光 bar 的可靠性、光谱宽度和光束的“smile”效应。为了减小热应力，目前正在研制高的热传导率和热膨胀系数更加匹配的衬底/热沉材料。

多单管模组：虽然单发射腔激光器在近几年的输出功率有所提

高，总体而言单发射腔半导体激光器输出功率依然较低，采用多单管组合的方式是增大输出功率的另一途径。图 6 给出多单管模组的示意图。图中各个独立的发光单元采用串联连接，并将模组各单个发光单元输出光束通过光学系统的会聚后耦合入光纤输出。采用多单管模组，各个发光单元之间没有热干扰，且各个发单元的输出功率互不影响。然而采用光学系统进行光束会聚和光纤耦合时存在光能量损耗。市场上多单管模组的输出功率已达到数十瓦甚至上百瓦。

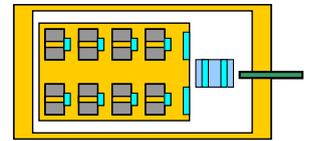


图 6 多单管组合模式示意图

由于单发射腔输出功率有限，且光束会聚系统复杂，多单管模块面临的主要问题是如何将输出功率提高到数百瓦。由于模块中的单发射腔越来越多，光学系统的设计就越复杂，且微光学系统的成本越高，从而导致该方法缺乏实际的应用意义。多单管模块面临的另一挑战是如何使各个发射腔的输出波长匹配。模块中各个发光单元必须经过波长匹配筛选才能确保模块具有窄的光谱。

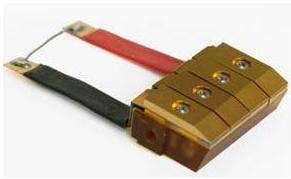
水平阵列：对于特定的应用，例如侧面泵浦固体激光器，要求更高的光输出功率但并不要求光束会聚，因此将多个 bar 条封装水平排即可满足要求。图 7 为两类水平阵列半导体激光器的实物图，图 7 (a) 是由三个巴条水平串联连接封装的水平阵列半导体激光器。三个巴条互相独立，采用热传导的制冷器和电绝缘材料进行封装。图 7 (b) 中各巴条同样采用串联连接，但是各个巴条采用微通道液体制冷。根据封装的巴条的数量和单个

巴条的功率范围，水平阵列半导体激光器的输出功率从数十瓦到数百瓦甚至上千瓦不等。

图 8 给出了准连续输出的水平阵列半导体激光器输出功率-电流和光谱的特性曲线。



(a)



(b)

图 7 水平阵列实物图; (a) 1x3
(b) 1x4

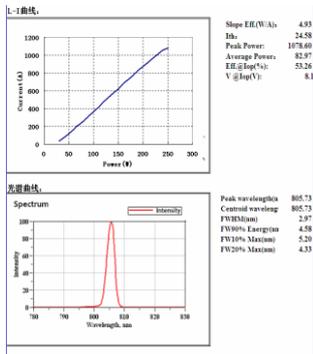
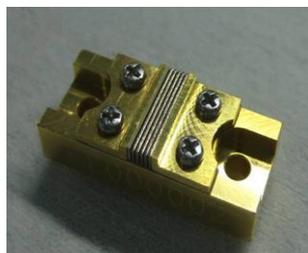


图 8 准连续条件下水平阵列激光器光功率-电流和光谱曲线

如图 7 (a) 所示的水平阵列激光器的巴条与制冷器之间绝缘连接，可采用工业水作为冷却介质；另外由于各巴条与制冷器绝缘，各巴条之间产生的热量相互影响，前端巴条产生的热量将传递到后端巴条，导致后端的巴条的结温上升和各巴条的温度不一致，从而使得激光器的可靠性降低，波长漂移和光谱展宽。因此如图 7 (a) 所示的水平阵列激光器封装结构，受到封装巴条数目限制，总的输出功率受到

限制。

垂直叠阵: 由于应用激光器输出功率不断提高，而要得到高的输出功率，垂直叠阵成为首选结构。图 9 (a) 所示为典型的准连续输出传导冷却 G-stack 型半导体激光器，图 9 (b) 为微通道液体制冷垂直叠阵半导体激光器。对于这两种叠阵都是采用串联连接。如图 9 (a) 所示，各巴条采用传导冷却方式。图 9 (b) 所示为各个巴条相互独立的微通道液体制冷。以 G-stack 为例，由于散热能力的限制该结构只能应用于准连续输出，占空比的选择与巴条之间的热沉的厚度有关。目前已经商品化单巴条最高输出功率可达 250W，一个 G-stack 产品能够同时封装 20 个巴条。图 9 (b) 所示的垂直叠阵半导体激光器各巴条的输出功率可高达 300W，叠阵可实现 30 个巴条的封装。其中 20bar 垂直叠阵半导体激光器连续条件下输出功率达到 2000W，准连续条件输出功率达到 5000W。



(a)

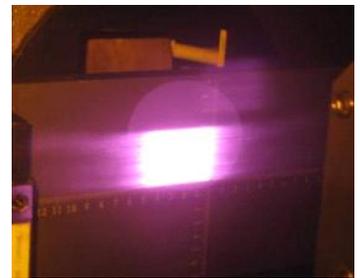


(b)

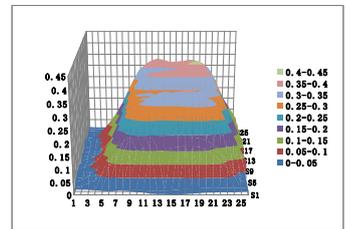
图 9 垂直叠阵实物图 (a) 准连续条件应用的传导冷却型 G-Stack
(b) 微通道液体制冷叠阵带有准直

系统 (右图) 不带准直系统 (左图)

垂直叠阵封装遇到主要技术挑战是光束和光谱的控制问题。垂直叠阵半导体激光器各巴条之间产生的热相互干扰，且水流不均匀导致巴条的冷却温度分布不均匀，这将导致巴条的波长漂移和叠阵的光谱展宽。光束控制包括输出光斑尺寸控制、光强密度均匀控制和光束传输方向控制，因此需设计和安装光束整形系统来实现光束控制。图 10 给出了由微通道液体制冷的垂直叠阵通过整形后输出方形光斑照片和光强分布图。



(a)



(b)

图 10 微通道液体制冷的垂直叠阵通过整形后输出方形光斑照片和光强分布图。

高亮度

对于大多数应用，无论是多单管模组、巴条、叠阵或面阵结构，均要求输出光束的光斑尺寸小。光束亮度是表征光束质量的参数，被定义为激光源在单位面积或单位立体角发射光束总的功率。光源的亮度越高，越容易将其光束压缩为点光源、线光源、或者压缩为尺寸很小的面元。

目前已有几种光束整形技术用于提高光亮度。如上文所述,对单发射腔集成的阵列光束,整形的技术发展趋势是多单管耦合入单光纤模块将取代单发射腔耦合光纤并合束输出的方式。对阵列半导体激光器,采用每个发射腔耦合光纤再合束的方法提高耦合输出的亮度[2]。

获得高亮度输出光束面临的挑战是设计新光束整形系统和光学耦合系统。所有的光束整形器件都必须拥有高的光纤控制能力,对于光纤耦合的大功率输出的控制技术需要高质量的光纤端面以及可以承受反馈光损伤的特殊连接器。

无钎化贴片技术

大功率半导体激光器封装,钎焊料是最常用的焊料之一。由于钎焊料在高电流下易产生电迁移和电热迁移的问题,影响半导体激光器的稳定性。研究发现钎焊料封装的激光器寿命远远短于金锡焊料封装的器件,如图 11 所示。钎焊料封装激光器在使用时可以观察到器件性能突然退化的现象。采用无钎化封装技术可克服钎焊料层的电迁移,此技术在某些商业产品中得到很好的使。在无钎化焊料的选择中金锡焊料由于其封装器件的性能稳定性而成为封装中的重要焊料[3]。

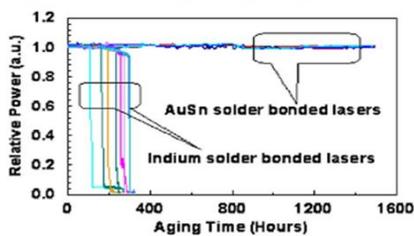


图 11 不同焊料封装激光器加速寿命测试对比曲线

无钎化封装技术面临的最大挑战是热管理和应力管理。由于在阵列激光器巴条和热沉之间增加了热膨胀系数匹配的缓冲层,所以会有

更多的交界面,在封装过程中易产生空洞,且热膨胀系数匹配的缓冲层在热传导能力上不如铜热沉,都会给器件的热管理带来困难。另一方面,尽管热膨胀系数匹配的缓冲层与激光器巴条的热膨胀系数相近,但是仍然存在热膨胀系数失配的问题,且金锡焊料不能像钎焊料那样有效地释放热应力。通常而言,金锡焊料封装的激光器的热应力比钎焊料封装器件要大。

窄光谱

应用中,常常需要阵列半导体激光器的光谱较窄。通过减少泵浦半导体激光器的光谱宽度来提高光谱精度,使得激光系统设计者能够改善激光系统的体积、效率、功率和光束质量等参数,同时又减少了系统散热成本。光谱宽度是阵列半导体激光器产品的关键指标之一,因此改善光谱特性有利于提高产品质量,减少成本及增加产品竞争力。

阵列激光器光谱展宽主要是由各单发射腔发射波长不一致。激光器阵列的宽光谱分布可能会出现双峰甚至多峰;光谱的一侧或两侧出现肩膀或者尾巴,如图 12 所示。各单个发射腔输出波长不一致及由封装导致的热和热应力效应都将使巴条输出光谱展宽,其中后者是主要因素[4]。

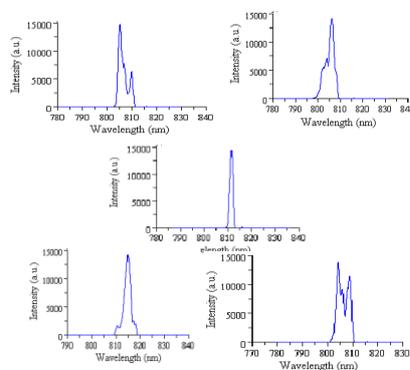


图 12 几种典型的光谱分布

了解光谱展宽的机制,为判断展宽属于散热不均匀还是应力效应

提供依据,从而有针对性的窄化光谱。获得窄光谱的困难是如何保持各个巴条的温度均匀和应力均匀,从而消除局部热效应和应力效应。

低“smile”效应

各发射腔的近场非线性效应(又名“smile”效应)给阵列半导体激光器光束耦合和光束整形带来了巨大的挑战,它已成为限制半导体激光器阵列增大的最主要的障碍。如果阵列激光器近场线性很差,将使阵列半导体激光器的光纤耦合效率降低。提高泵浦半导体激光器的近场线性可使激光系统紧凑、提高耦合效率、输出功率及光束质量,同时降低半导体激光器泵浦的固态激光器和光纤激光器的成本。因此,近场线性是阵列激光器产品关键的指标之一,提高半导体激光器近场线性对提高产品质量、减少成本以及增加竞争力都尤为重要。

图 13 给出了阵列半导体激光器的各类近场线性(“smile”效应)的放大图像。高质量的阵列半导体激光器的近场分布近似于线性。这类半导体激光 bar 可作为高质量的耦合光源[5]。

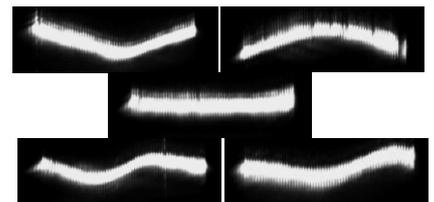


图 13 放大后的阵列半导体激光器各类“smile”效应

阵列半导体激光器的近场非线性是由巴条本身热膨胀系数失配合封装过程中巴条和热沉之间热膨胀系数失配造成的。影响“smile”效应的主要参数有焊料层材料、热沉材料和厚度、芯片封装过程所使用的贴片工具以及贴片层温度。

结论

本文综述了大功率半导体激光

器的发展趋势，封装技术的发展趋势主要是高输出功率，高亮度，无钢化封装，窄光谱和低“smile”效应。本文分析了大功率半导体激光器封装技术存在的问题和面临的挑战，在此基础上提出了解决问题的方法和策略。

[1] Xingsheng Liu, et al, IEEE transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 29, Issue 2, pp. 268-276, 2006.

[2] Matthias Haag, et al, Photonics West, 2007.

[3] Xingsheng Liu, et al, Journal of Applied Physics, Vol. 100, Issue 1, 013104, 2006.

[4] Xingsheng Liu, et al, Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2008, pp1005-1010.

[5] Jingwei Wang, et al, 2009 IEEE Electronic Components and Technology Conference.