

文章编号: 0258-7025(2009)04-0799-05

非制冷 980 nm 半导体激光器封装设计与热特性分析

武斌 李毅 胡双双 蒋群杰 王海方

(上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘要 针对非制冷 980 nm 半导体激光器组件的封装结构,对采用倒装贴片封装的激光器模块内部芯片外延层、热沉和焊料层进行了优化设计,运用有限元法(FEM)对微型双列直插(mini-DIL)非制冷980 nm半导体激光器在连续波(CW)驱动条件下的热场分布进行了模拟计算。对比了倒装贴片和正装贴片的激光器热特性,并对实际封装的激光器光电性能进行了测试。倒装贴片型非制冷980 nm半导体激光器的输出光谱在 0~70 °C 时中心波长漂移仅为 0.2 nm,半峰全宽(FWHM)小于 1.6 nm,边模抑制比(SMSR)保持在 45 dB 以上,最大出纤功率达 200 mW。研究表明,倒装贴片的非制冷980 nm半导体激光器在热稳定性和光电性能方面都有较大提高,能够满足高性能小型化掺铒光纤放大器对非制冷980 nm半导体激光器的性能要求。

关键词 激光器;980 nm 半导体激光器;倒装贴片;热特性;有限元

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0799

Design and Thermal Characteristics Analysis of Uncooled 980 nm Semiconductor Laser Packaging

Wu Bin Li Yi Hu Shuangshuang Jiang Qunjie Wang Haifang

(*College of Optical and Electronic Information Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract According to the packaging structure of uncooled 980 nm semiconductor laser module, the chip epitaxial layer, heat sink and solder layer in the epitaxy (epi)-down bonded lasers module were designed, and the heat distribution of mini-dual in line (DIL) uncooled 980 nm semiconductor laser under the continuous-wave (CW) drive conditions was simulated using the finite element method (FEM). The thermal properties of epi-down and epi-up bonded lasers were compared, and the photoelectric properties of actual laser module were tested. Epi-down bonded uncooled 980 nm semiconductor laser can work steadily over a wide temperature range of 0~70 °C, with a small wavelength shift of 0.2 nm, full-width at half-maximum (FWHM) less than 1.6 nm, side-mode suppression ratio (SMSR) of more than 45 dB, and a high optical power of 200 mW. The results show that the optical and thermal characteristics of epi-down bonded uncooled 980 nm semiconductor laser have been greatly improved, and it can meet the need of high-performance miniature erbium-doped fiber amplifier.

Key words lasers; 980 nm semiconductor laser; epi-down bonding; thermal characteristics; finite element method

1 引言

大功率单模 980 nm 半导体激光器作为光纤放

大器的核心器件,因具有体积小、效率高、光谱匹配好、重复频率高等优点在光通信系统^[1]中得到了广

收稿日期:2008-04-23;收到修改稿日期:2008-08-22

基金项目:国家 863 计划(2006AA03Z348),教育部科学技术研究重点项目(207033),上海市科学技术委员会科技攻关计划项目(06DZ11415)和上海市教委科学技术研究重点项目(06ZZ32)资助课题。

作者简介:武斌(1984—),男,硕士研究生,目前主要从事光电子器件、模块、光通信等方面的研究。

E-mail:hb7527@hotmail.com

导师简介:李毅(1964—),男,教授,博士生导师,目前主要从事光电子材料、器件、模块、子系统等方面的研究。

E-mail:optolyclp@263.com

泛应用。近年来,随着半导体激光器芯片技术的不断成熟,980 nm 半导体激光器实现了在去除热电制冷器(TEC)后仍能稳定工作。微型双列直插(mini-DIL)封装的激光器^[2]不仅管脚数少、体积小、结构紧凑,而且减少了成本、降低了功耗。然而,由于非制冷半导体激光器内部缺少了用于恒温的 TEC,激光器的工作温度将受封装结构和管壳环境温度的极大影响。另外,随着激光器芯片本身输出功率约每 2 年翻番的快速发展^[3],其芯片的热量累积将变得越来越严重。而激光器有源区温度直接影响其输出功率,例如,一般的 980 nm 激光器芯片,在 70℃ 工作时的输出功率比在室温工作时降低近 15%。因此,如何减少激光器封装结构的热阻,对激光器进行有效的热量控制成了发展非制冷半导体激光器的关键因素^[4,5]。

另一方面,考虑到激光器结区的温升会引起发射光谱产生红移,980 nm 半导体激光器温漂系数约为 0.32 nm/K,而光纤放大器需在一个较宽的抽运带宽内保持其增益的平坦度,这就要求半导体激光器需要具有稳定的发射光谱和光功率。为此,在封装结构中常采用布拉格光纤光栅(FBG)波长稳定器^[6]以稳定激光器输出的中心波长,并进一步改善和提高非制冷 980 nm 半导体激光器的边模抑制比(SMSR)等性能。

在研究中,针对非制冷 980 nm 半导体激光器对热学、光学、电学、机械等方面的要求,优化设计了激光器封装结构和主要部件的材料及结构参数,利用有限元方法(FEM)对非制冷 980 nm 半导体激光器进行了热场模拟和分析,并测量了实际封装激光器的光电性能,得到了一系列对封装结构设计和制造工艺有益参数。

2 结构设计和有限元热特性分析

为了能够减小激光器结构中的热阻,必须对其整体封装结构进行优化设计。通过考虑各相互关联的结构和工艺参数,借鉴微电子封装工艺中成熟的倒装贴片技术,将激光器芯片倒置并直接焊接到热沉上,使有源区的热量避开高热阻的芯片衬底直接传导到热沉散热,有效减小了封装结构热阻。最终设计的倒装贴片型非制冷 980 nm 半导体激光器如图 1 所示。

在半导体激光器中,引起激光器芯片温度升高的热源主要来自以下几部分:

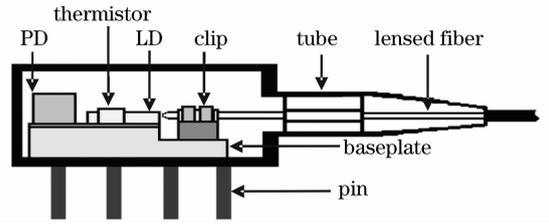


图 1 非制冷半导体激光器封装结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of uncooled semiconductor laser package

1) 有源区中由于非辐射复合,辐射吸收和自发发射的吸收产生大量的热,热源项 g_{active} 表达式为^[7]

$$g_{\text{active}} = \frac{V_j}{d_{\text{active}}} \{ j_{\text{th}} (1 - f \eta_{\text{sp}}) + (j - j_{\text{th}}) [1 - \eta_{\text{ext}} - (1 - \eta_i) \eta_{\text{sp}} f] \}, \quad (1)$$

式中 V_j 为加到 p-n 结上的电压降, j 为注入电流密度, j_{th} 为阈值电流密度, η_{ext} , η_i 和 η_{sp} 为受激辐射外、内微分量子效率和自发发射内微分量子效率,参数 f 为有源区自发发射透射出两边限制层的光能比例。对四元系器件来说

$$f = 1 - [1 - (n_c/n_a)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

n_a 和 n_c 分别为有源层和光限制层的折射率。

2) 电极层中热量主要是表面接触电阻产生的焦耳热,热源项 g_0 为

$$g_0 = j^2 \frac{\rho_{\infty}}{d_0}, \quad (3)$$

ρ_{∞} 表示电极层与 P 型 GaAs 的接触电阻值, d_0 为该层的厚度。

3) 其他各层中热量主要是由于体内电阻产生的焦耳热,热源项 g_i 为

$$g_i = j^2 \rho_i, \quad (4)$$

ρ_i 为各层的电阻率。

针对所设计的非制冷 980 nm 半导体激光器结构,采用有限元法模拟其热特性。模拟软件选用 Ansys10.0,主要对正装贴片(衬底层焊接到热沉上)和倒装贴片(外延层焊接到热沉上)的激光器热特性进行了分析、比较。

图 2 给出了 460 mA 驱动电流和 25℃ 环境温度下,倒装与正装贴片型激光器出光端面的二维热场分布,图 3 为 650 mA 驱动电流和 40℃ 环境温度下,倒装与正装贴片型激光器出光端面的二维热场分布。其中,管壳基底为高热导率材料 CuW。由图 2,3 可见,器件的温升集中在有源区,热量主要经热沉散出,也有部分热量由衬底侧面散出。在 460 mA 驱动电流和 25℃ 环境温度时,倒装贴片结构的有源

区最高温度为42 ℃，与正装结构有源区的最高温度50 ℃相比，降低了8 ℃。在650 mA极值驱动电流和40 ℃环境温度时，倒装贴片的激光器有源区最高温度为57 ℃，与正装贴片结构有源区的最高温度66 ℃相比，有9 ℃温度的降低。模拟结果说明，所设计的倒装贴片型激光器相比于正装贴片型激光器能够减少芯片衬底的热阻，有效降低了芯片有源区的温度。

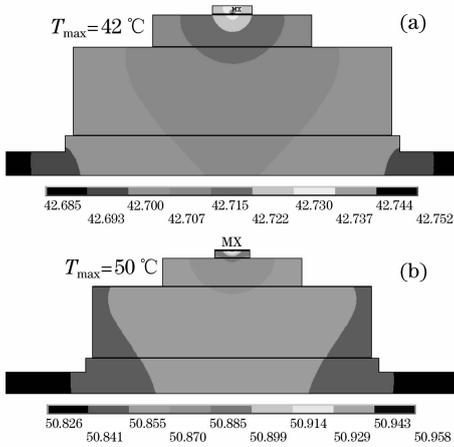


图2 460 mA 驱动电流和 25 ℃ 环境温度下激光器的热场分布。(a) 倒装贴片型激光器；(b) 正装贴片型激光器
Fig.2 Thermal distribution of laser under 460 mA drive current at 25 ℃. (a) epi-down bonded laser; (b) epi-up bonded laser

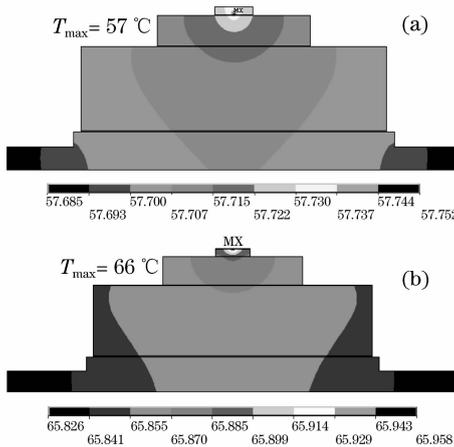


图3 650 mA 驱动电流和 40 ℃ 环境温度下激光器的热场分布。(a) 倒装贴片型激光器；(b) 正装贴片型激光器
Fig.3 Thermal distribution of laser under 650 mA drive current at 40 ℃. (a) epi-down bonded laser; (b) epi-up bonded laser

图4给出了倒装与正装贴片型激光器在室温条件下的瞬态温升曲线。图中两者温升曲线在激光器工作前100 μs时非常接近，此时温度曲线对应的是热量在有源区及其周边区域的扩散情况。在热量进

一步传导过程中，正装贴片结构的升温速率就明显比倒装贴片结构快，这时的温度曲线说明倒装贴片型激光器热传导避开了高热阻的芯片衬底，散热性能得到了提高，其芯片热积累较少。

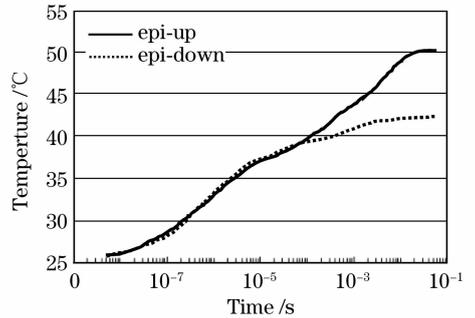


图4 有限元法分析正装贴片与倒装贴片型激光器的温升曲线
Fig.4 Temperature curves of epi-up and epi-down bonded lasers from finite-element analysis

3 非制冷 980 nm 半导体激光器倒装贴片封装工艺

在激光器倒装贴片封装工艺方面，不仅要求芯片和封装结构能有效地将有源区产生的热量传递到热沉上，还必须避免对激光器芯片产生额外的应力。焊接材料和焊接衬底(热沉)对倒装贴片的焊接质量、性能和稳定性至关重要。在激光器封装工艺中，通常使用的软焊料有共晶锡化铅(PbSn)或钢等，这类焊料在激光器使用过程中不仅会降低光纤耦合效率，同时还会产生焊料的蠕变，形成茎须，致使激光器出纤功率衰减或芯片的毁灭性破裂^[8]，且含铅焊料属非环保材料已受到欧盟禁用。为此选用具有无助焊剂焊接、无焊料蠕变以及抗热疲劳等优点的硬焊料共晶锡化金(AuSn)来解决这些问题。共晶锡化金焊料在贴片过程中能够严格控制其在热沉表面上的厚度，更适合标准化微细加工工艺，这也是保证高质量和可重复贴片的关键。

在倒装贴片的工艺过程中，为了改善锡化金焊料自身高熔点(283 ℃)以及较差延展性对芯片造成的影响，在热沉的选取上还需考虑到其热膨胀系数与激光器芯片($\text{GaAs}: 6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)的匹配程度。匹配的热膨胀系数能够降低激光器芯片在焊接时因降温产生的热应力，保证激光器芯片的贴片质量。最终采用具有 $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 热膨胀系数和 $180 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 高热导率的氮化铝(AlN)材料作为热沉，确保了倒装芯片贴片的质量以及良好的导热

性,提高了半导体激光器的稳定性。

在倒装贴片的封装结构中,共晶锡化金焊料与电极层相连形成了一个 Au-AuSn 结构。然而,这是一个不稳定的合金结构,随着激光器使用时间的不断增加,金层会与 AuSn 焊料发生反应形成 Au_5Sn , $AuSn_4$ 和其他金属化合物^[9,10],此反应使金层逐渐变薄甚至消失,这将严重影响到激光器的热特性,所形成的金锡化合物也将减小焊接强度,使焊料层出现裂缝和 Kirkendall 空洞^[11]。因此,为了改善半导体激光器热特性并稳定激光器工作性能,在金层和 AuSn 焊料之间加入铬(Cr)来充当扩散势垒层以保护金层厚度,在铬层上淀积一层钛(Ti)以增加 Cr 与 Au 的粘附力,并在铬层下方加入金层以提高 AuSn 焊料的润湿性能。最终所设计的电极层结构如图 5 所示,新型 Au-Ti-Cr-Au 电极层结构不仅保证了金层厚度,并且具有很高的焊接强度,能够明显改善激光器热性能。

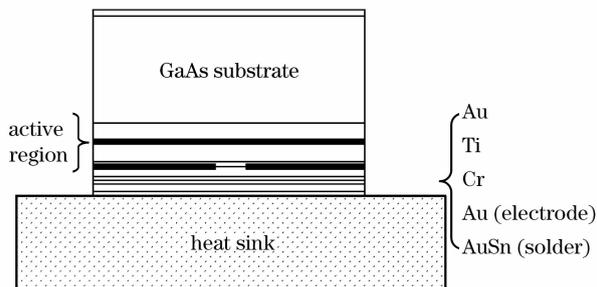


图 5 电极层结构示意图

Fig. 5 Schematic structure of epi-side metallization

通常,金层厚度为 $5\ \mu\text{m}$ 的激光器模块相比于 $0.2\ \mu\text{m}$ 金层厚度的模块能减少将近 24% 的热阻^[12]。倒装贴片型激光器芯片有源区的热量主要通过电极层和热沉进行传递散热。电极层(Au)由于接近热源并具有很好的导热性($310\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),更多的热量能够通过其两侧传导至热沉,这样就较大地增加了热通道宽度,减小了热阻。此外,由于热量能够在更宽的热通道中传导,减少了有源区正下方的热传导密度,能够降低在焊接过程中因工艺技术问题导致焊料层空洞对激光器热特性的影响。因此,在外延层金属区中保证有一定厚度的金层十分重要。

4 光电性能测试

图 6 给出了 mini-DIL 封装的正装贴片与倒装贴片型 980 nm 激光器在不同驱动电流下的功率-电流 ($L-I$) 曲线。可以看出,激光器模块在 500 mA 驱

动电流时,最大出纤功率达到了 200 mW。由于具有较低的热阻,倒装贴片激光器的光学性能也得到了相应提高。相比正装贴片结构,倒装贴片型激光器的热反转光功率和驱动电流都有 20% 的提高。图 7 给出了带有光纤布拉格光栅(FBG)的倒装贴片型非制冷 980 nm 半导体激光器在工作温度为 $0\ ^\circ\text{C}$, $20\ ^\circ\text{C}$, $70\ ^\circ\text{C}$ 下,工作电流为 200 mA 时相应的输出光谱。从图 7 可以看出,倒装贴片型非制冷 980 nm 半导体激光器的输出光谱在 $0\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 之间非常稳定,中心波长漂移仅为 0.2 nm,半峰全宽小于 1.6 nm,边模抑制比保持在 45 dB 以上,最大出纤功率达 200 mW。

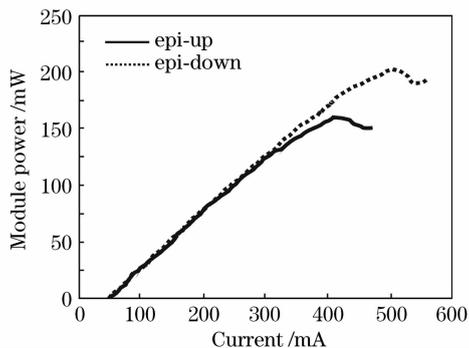


图 6 正装与倒装贴片型激光器模块 $L-I$ 特性比较

Fig. 6 Comparison of the $L-I$ characteristics for epi-up and epi-down bonded 980 nm pump laser

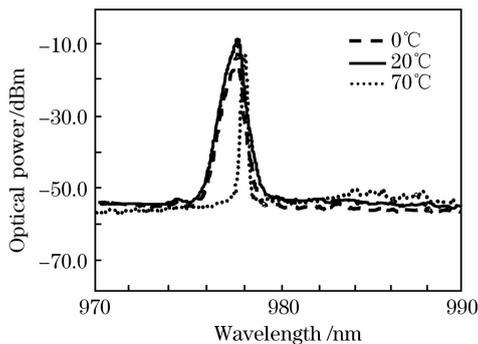


图 7 带 FBG 非制冷 980 nm 激光器输出光谱

Fig. 7 Spectrum of uncooled 980 nm laser with FBG

5 结 论

倒装贴片封装结构对于改善非制冷 980 nm 半导体激光器热特性、降低激光器工作温度和稳定激光器光电性能十分有效。改善热特性的关键就是使激光器模块中从芯片外延层到封装基底的每个组成部件的热阻和串联电阻达到最小值。这些可通过对外延结构和器件几何形状的优化,以及选取更好的热特性材料来实现。此外,采用适宜的焊接工艺来

得到无缝焊接面也非常重要。实验数据表明,所设计的半导体激光器封装结构能够有效降低热阻,并具有高达 200mW 的出纤功率,能够满足实际应用对非制冷激光器的要求。

参 考 文 献

- 1 Yi Li, Xinjian Yi, Tianxu Zhang. Nanostructure and thermal-optical properties of vanadium dioxide thin films [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12):719~721
- 2 Li Yi, Jiang Qunjie, Wu Bin *et al.*. Packaging technology of uncooled 980 nm pump laser modules [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(Suppl.):110~114
李 毅,蒋群杰,武 斌等. 非制冷 980 nm 泵浦激光器封装技术[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(增刊):110~114
- 3 Xingsheng Liu, Martin Hai Hu, Hong Ky Nguyen *et al.*. Comparison between epi-down and epi-up bonded high-power single-mode 980-nm semiconductor lasers [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, **27**(4):640~646
- 4 Zilun Chen, Jing Hou, Zongfu Jiang. Theoretical analysis of thermal effects in fiber laser from the moment when pump is turned on to steady-state [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):178~180
- 5 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):497~501
邵 杰,李小莉,冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):497~501
- 6 Hu Shuangshuang, Li Yi, Jiang Qunjie *et al.*. Wavelength locker of pump laser based on dual fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):44~48
胡双双,李 毅,蒋群杰等. 基于双光纤布拉格光栅的抽运激光器波长锁定器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):44~48
- 7 Takeshi Kobayashi, Yoshitake Furukawa. Temperature distributions in the GaAs-AlGaAs double-heterostructure laser below and above the threshold current [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**(12):1981~1986
- 8 K. Mizuishi. Some aspects of bonding-solder deterioration observed in long-lived semiconductor-lasers; solder migration and whisker growth [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**(2):289~295
- 9 M. T. Sheen, C. M. Chang, H. C. Teng *et al.*. The influence of thermal aging on joint strength and fracture surface of Pb/Sn and Au/Sn solders in laser diode packages [J]. *J. Electron. Mater.*, 2002, **31**(8):895~902
- 10 P. G. Kim, K. N. Tu. Morphology of wetting reaction of eutectic SnPb solder on Au foils [J]. *Appl. Phys.*, 1996, **80**(7):3822~3827
- 11 E. Zakel, H. Reichl. Au-Sn bonding metallurgy of TAB contacts and its influence on the Kirkendall effect in the ternary Cu-Au-Sn [J]. *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, 1993, **16**(3):323~332
- 12 Xingsheng Liu, Martin Hai Hu, Catherine G. Caneau *et al.*. Thermal management strategies for high power semiconductor pump lasers [C]. *Proc. Int. Conf. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2004, **2**:493~500