

半导体激光器边缘绝热封装改善慢轴光束质量

赵碧瑶^{1,2}, 井红旗^{1*}, 仲莉^{1,2}, 曼玉选^{1,2}, 班雪峰^{1,2}, 刘素平¹, 马晓宇^{1,2}

¹中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 为了削弱激光器工作时芯片横向温度不均而导致的热透镜效应对慢轴发散角的影响, 提高慢轴的光束质量, 引入了边缘绝热封装方式, 即在激光器芯片两侧与过渡热沉之间加入空气隙, 以降低两侧的传导散热。利用有限元分析软件 ANSYS 18.0 对该封装结构中激光器芯片的温度进行仿真。结果表明: 当工作电流为 1.6 A, 芯片与热沉的接触宽为 200 μm 时, 慢轴发散角由普通封装时的 11.5° 减小至 8.2°, 降幅为 28%, 光束参数积和光束质量因子也分别降低了 28% 和 24%, 热阻增大了 6%。边缘绝热封装对器件激光波长、阈值电流、电光转换效率的影响很小。

关键词 激光器; 边缘绝热封装; 慢轴光束质量; 热分析; 半导体激光器

中图分类号 TN243

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0105002

Improving Slow-Axis Laser Beam Quality of Semiconductor Laser with Edge Adiabatic Package

Zhao Biyao^{1,2}, Jing Hongqi^{1*}, Zhong Li^{1,2}, Man Yuxuan^{1,2}, Ban Xuefeng^{1,2},
Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2}

¹National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract Nonuniform lateral temperature distribution causes the thermal lens effect on the far-field slow-axis divergence angle. To alleviate this effect and improve the slow-axis beam quality, we incorporated a method of adiabatic package by implanting an air gap between the chip and the transition heat sink to reduce the conduction heat dissipation on both sides. Herein, the finite element analysis software ANSYS 18.0 was used to analyze the temperature distribution of chips with the edge adiabatic package. The results show that a chip with contact width 200 μm can reduce the slow-axis divergence angle by approximately 28%, from 11.5° to 8.2°, when the working current is 1.6 A. Likewise, it can reduce the beam parameter product and the beam quality factor by 28% and 24%, respectively. The increase in thermal resistance is 6%. Finally, the implementation of edge adiabatic package has little effect on the lasing wavelength, threshold current, and electro-optical conversion efficiency of the device.

Key words lasers; edge adiabatic package; slow-axis beam quality; thermal analysis; semiconductor laser

OCIS codes 140.2020; 140.3295; 140.5960; 140.6810

1 引 言

半导体激光器具有效率高、成本低、体积小等优点, 在材料加工、泵浦固态激光器、医疗美容、通信等领域都有成熟应用。激光测距和准直应用对激光光束的质量要求较高, 从而对大功率半导体激光器的

光束质量提出了更高的要求。半导体激光器在工作时, 随着工作电流增大, 激光器产热增多, 激光器的性能会受到自加热的影响, 导致光束远场发散角增大, 光束质量恶化, 大大限制了激光器的应用^[1]。

2011年, Bai等^[2]提出将金作为过渡热沉的材料, 该过渡热沉可分为两部分, 中间的金柱用于散

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(41414010302)

* E-mail: jinghq@semi.ac.cn

热,两边的金柱起机械支撑的作用。这种结构改善了激光器芯片的散热,从而减小了慢轴远场发散角,使得激光器在工作电流为 14 A 时的线性亮度提高了约 14%。2013 年,Piprek^[3]提出了一种在芯片与热沉间加入基座热沉的方法,并进行仿真模拟,这种方法改善了芯片的微观导热路径,降低了光束慢轴方向的远场晕染。2015 年,Winterfeldt 等^[4]提出了一种通过限制横向载流子积累从而提高激光器光束质量的方案,该方案使得由激光器自加热引起的光束参数积(BPP)增大降低了 35%,慢轴方向光束参数产物 BPP_{lat} 减少,线性亮度增加至 3.5 W/(mm·mrad)。

本文提出了一种新型的边缘绝热封装结构,在该结构中,芯片过渡热沉的接触宽度小于激光器芯片的宽度,激光器芯片两侧与底部热沉间留有空气隙。这种结构可使激光器芯片中心的导热优于两侧,激光器芯片横向的温度分布更均匀。所提出的边缘绝热封装结构可在不改变芯片外延结构的条件下,削弱热透镜效应,改善慢轴光束质量。

2 激光器热透镜效应与边缘绝热封装

2.1 激光器产热

目前,国内外学者对固体激光器热透镜效应的研究已较为完善,但对半导体激光器热透镜效应的研究仍相对较少^[5-6]。Ⅲ-V 族半导体激光器相比其他激光器具有较高的光电转换效率。商业化激光器产品的光电转换效率在 50% 左右,其他的注入功率基本以热能的形式耗散掉。激光器工作时的热主要来源于电流经过激光器芯片各层结构时产生的焦耳热、欧姆接触产热,以及电子和空穴的非辐射复合、辐射吸收和自发辐射产热等。激光器的热量主要包括以下 4 个来源。

1) 除有源区外,各层材料通过电流时引起的焦耳热的热流密度 Q_1 ,其表达式为

$$Q_1 = \sum_i j^2 \rho_i; \quad (1)$$

2) 有源区自发辐射、非辐射复合和辐射吸收产生的热流密度 Q_2 ,其表达式为

$$Q_2 = \frac{V_j}{d_a} [j_{th} + (j - j_{th})(1 - \eta_i)](1 - \eta_{sp} f_{sp}); \quad (2)$$

3) 各层材料对有源区自发辐射逃逸光子的吸收热流密度 Q_3 ,其表达式为

$$Q_3 = \frac{V_j}{d_a} j_{th} \eta_{sp} f_{sp}; \quad (3)$$

4) 欧姆接触电阻产生的热流密度 Q_4 ,其表达式为

$$Q_4 = j^2 \rho_c. \quad (4)$$

式中: j 为注入电流密度; ρ_i 为各层材料电阻率; V_j 为结电压; d_a 为有源区厚度; j_{th} 为阈值电流密度; η_i 为受激辐射内量子效率; η_{sp} 为自发辐射内量子效率; f_{sp} 为自发辐射从光子逃离有源区的逃逸系数; ρ_c 为欧姆接触层电阻率。

激光器稳态工作时,热量传导遵循

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Q}{k}, \quad (5)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (6)$$

式中: Q 为热功率密度,等于各种热源产热之和; k 为热导率; T 为温度; x 为慢轴方向; y 为快轴方向; z 为激光出射(沿谐振腔)方向。(5)式给出了激光器在激射模式工作条件下,忽略器件与热沉、空气间的热对流时,温度在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的变化率之和与器件总热功率的关系。激光器产生的热量主要通过热沉以热传导的方式向外扩散。

2.2 半导体激光器的热透镜效应

波导层材料的折射率决定了其对激光器光场的限制作用,从而会影响到发散角。波导层材料折射率受激光器工作时温度分布和载流子浓度的影响,这一影响可以表示为

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T - \alpha_{fc} \cdot \Delta N_{fc}, \quad (7)$$

式中: $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为折射率随温度的变化; ΔT 为温度变化量; α_{fc} 为折射率随载流子浓度变化的系数; ΔN_{fc} 为载流子浓度的变化量。对于 GaAs 材料系半导体激光器,当激光器处于正常激射工作状态附近时,温度导致的折射率增加量将近 0.01,载流子对注入引起的折射率增加量约为 0.001,因此激光器的自加热引起的温度升高对波导的影响更大^[7-8]。

激光器热透镜理论最早由 Gordon 等提出,之后,Hu 和 Whinnery 给出了高斯光束经过热透镜后的光强变化公式。在光束与介质达到热平衡的极短时间内,激光工作时内部的温度从中心向四周逐渐降低,存在温度梯度,从而导致折射率分布不均匀。当高斯光束经过折射率分布不均匀的吸收介质时,该介质可视为光束的透镜,这就是热透镜或热晕染现象^[9-12]。

根据梯度折射率理论可知,对于半导体激光器这种中心区域折射率高、两侧区域折射率低的有源

层来说,热透镜效应对光束的传输可等效为波导中加入了凸透镜,该等效凸透镜焦距即为热透镜焦距^[10],可表示为

$$f = \frac{1}{n_0 \alpha \sin(\alpha l)}, \quad (8)$$

式中: n_0 为初始折射率; α 为折射率分布情况,反映温度分布的不均匀性,可由温度分布曲线得到; l 为自聚焦透镜的厚度。孔径角可以看作是发散角的变化量 $\Delta\theta$,根据几何光学,可将慢轴发散角的增大量定量表示为

$$\Delta\theta = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{w}{2f}\right), \quad (9)$$

式中: $\Delta\theta$ 为慢轴发散角的增大量; w 为有源区的侧向宽度。依据(9)式可对不同温度工作条件下激光器的热透镜焦距和慢轴发散角增量进行定量计算。

2.3 激光器的热阻

激光器有源区的温度对激光器的光电性能和寿命都有很大影响。激光器的热阻是衡量激光器散热性能的重要参数,反映了激光器的散热性能^[13-14]。热阻 R_{th} 的表达式为

$$R_{th} = \frac{T_{j_1} - T_{j_2}}{P_{thermal1} - P_{thermal2}} = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)/\alpha'}{P_{thermal1} - P_{thermal2}}, \quad (10)$$

式中: T_{j_1} 、 T_{j_2} 为在两种电流密度 j_1 、 j_2 下激光器的结温; $P_{thermal1}$ 、 $P_{thermal2}$ 在两种电流密度 j_1 、 j_2 下激光器的热功率; α' 为温度波长系数,在同类激光器中保持不变,可以通过大量实验测量得到,单位为 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 或 nm/K 。对于激光器来说,未被转化成光能的其他电能基本上以热能的形式耗散掉,表达式为

$$P_{thermal} = I_0 \cdot V_0 - P_{out}, \quad (11)$$

式中: I_0 、 V_0 分别为激光器的工作电流和工作电压; P_{out} 为输出光功率。激光器结温上升会导致芯片有源区的禁带宽度 E_g 变窄,波长红移。波长红移与激光器的结温变化可看作是线性关系,即

$$\Delta\lambda = \alpha' \cdot \Delta T. \quad (12)$$

2.4 半导体激光器边缘绝热封装

当激光器的注入电流增大时,对于宽条形半导体激光器来说,一方面,电流的增大会激发出激光高阶模式(如厄米特-高斯光束、拉盖尔-高斯光束等),而不再是基模形式;另一方面,随着注入电流增大,各层通过电流时产生的焦耳热、非辐射复合等热量会使芯片工作时的中心温度升高,折射率随温度的升高而变化。有源区材料在垂直方向上的折射率引导机

制较强,因此快轴方向的发散角、束宽变化较小,快轴方向的光束质量较稳定;但有源区材料在水平方向上的折射率引导机制较弱,因此慢轴方向的发散角、束宽等随芯片温度的变化较大,易受热透镜效应的影响,慢轴方向光束质量随温度升高严重劣化。

可以通过改进激光器的封装结构来增强芯片散热,以保证激光器可以在良好的状态下工作^[2,15]。激光器的COS(chip on submount)封装就是将芯片与过渡热沉通过焊料高温烧结在一起,形成电流回路,从而将激光器芯片产生的热量通过热沉散掉,再将COS用金属等其他材料的保护罩密封起来,形成晶体管外形封装、蝶形封装等。当芯片过渡热沉的接触宽度小于激光器芯片宽度时,封装后的激光器芯片两侧与底部热沉间留有空气隙,称为边缘绝热封装,其原理示意图如图1所示。普通封装芯片直接与底部热沉接触,热流从中心向外流动,导致温度和折射率下降;引入空气隙之后,空气隙阻挡了芯片边缘处的垂直热流,几乎所有的热量都通过过渡热沉中间接触区流向底部热沉,使得激光器芯片中心的导热优于两侧。激光器芯片的两侧虽然没有热源,但由于没有垂直散热通道,热积累将导致其温度升高,使得整个激光器芯片的温度分布趋于均匀,进而使得折射率的横向分布趋于均匀,从而削弱了热透镜效应,使激光器表现出更优良的远场特性,光束质量得以改善。

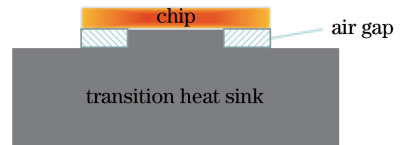


图1 边缘绝热封装原理示意图

Fig. 1 Diagram of edge adiabatic package principle

3 半导体激光器边缘绝热封装COS的热分析

半导体激光器边缘绝热封装COS的结构设计优化及数值模拟采用有限元分析软件ANSYS 18.0进行。ANSYS 18.0有限元法按照特定的方式将连续的结构分离成数量有限的微元组合来代替原有结构进行求解,可通过改变划分网格的数量决定微元的数量,从而决定模型的准确度^[14]。利用SolidWorks软件分别建立半导体激光器、过渡热沉、焊料的三维模型,将模型文件导入到ANSYS 18.0软件中,并划分网格,设定初始条件和边界条件,并施加载荷。ANSYS 18.0基于热传导方程进

行热分析(主要依据为傅里叶定律),即

$$Q = -k \frac{dT}{dx}, \quad (13)$$

表 1 ANSYS 18.0 相关材料参数

Table 1 Related material parameters of ANSYS 18.0

Index	Material	Size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	$k / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Chip	GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$500 \times 900 \times 1.2$	0.55
Heat source	GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$100 \times 900 \times 0.1$	0.55
Solder layer	In	$200 \times 900 \times 10$	0.82
Transition heat sink	BeO	$4000 \times 4500 \times 100$	2.60

在 ANSYS 18.0 建模中,有源层、焊料层是关键区域,对计算的准确性起决定性作用,该部分网格的划分要密集,以使建立的模型更精确。BeO 陶瓷过渡热沉部分可采用较稀疏的网格,避免网格划分过密,使计算规模过大。为了简化数学模型,针对模型作如下近似处理。

1) 因半导体激光器多为非对称结构,N 型波导层的厚度大于 P 型波导层,激光器工作时发热区域主要集中在有源区,而有源区距离 P 面较近,采用倒装可减小热阻,增强散热,故本文假设热源施加在 P 面表面。

2) 在实际应用中,过渡热沉底面与外加制冷器接触,过渡热沉可看作是恒温(温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$),其他

式中: dT/dx 表示 x 方向的温度梯度,忽略芯片表面的辐射散热和空气对流散热; k 为导热系数。热特性分析涉及各层材料参数如表 1 所示^[16-17]。

与空气接触的面不考虑其与空气的对流和热辐射;

3) 封装所用焊料较薄,对热效应的作用不大,可忽略各处焊料对热的影响;

4) 材料热导率随温度的变化忽略不计。

对芯片在横向(慢轴方向)与热沉接触宽度(W)分别为 $100, 200, 300, 400, 500\text{ }\mu\text{m}$ 的激光器工作时的产热情况进行模拟,得到在不同接触宽度、不同热功率下激光器的温度分布。

3.1 不同热功率下激光器边缘绝热封装 COS 的热分析

当 W 为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同热功率(P_{th})下半导体激光器边缘绝热封装 COS 的温度分布云图如图 2 所示。

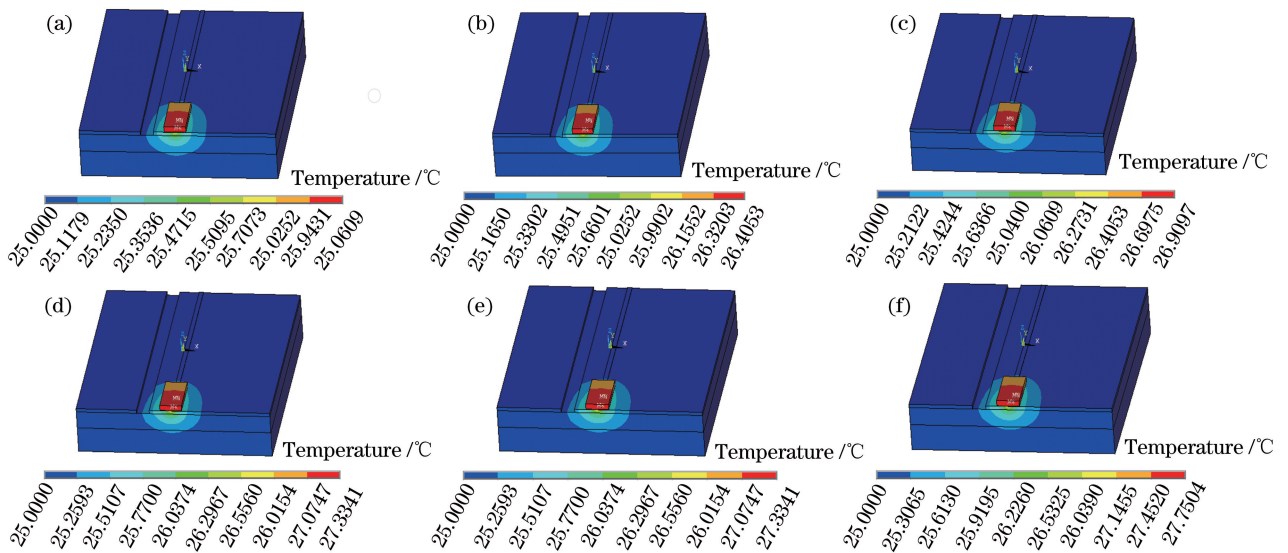


图 2 接触宽度 $W=100\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同热功率 P_{th} 下激光器 COS 的温度分布。(a) $P_{th}=0.5\text{ W}$; (b) $P_{th}=0.7\text{ W}$; (c) $P_{th}=0.9\text{ W}$; (d) $P_{th}=1.1\text{ W}$; (e) $P_{th}=1.3\text{ W}$; (f) $P_{th}=1.5\text{ W}$

Fig. 2 Temperature distributions of laser COS under different thermal powers P_{th} when contact width

$W=100\text{ }\mu\text{m}$. (a) $P_{th}=0.5\text{ W}$; (b) $P_{th}=0.7\text{ W}$; (c) $P_{th}=0.9\text{ W}$; (d) $P_{th}=1.1\text{ W}$; (e) $P_{th}=1.3\text{ W}$; (f) $P_{th}=1.5\text{ W}$

从图 2 可以看出,芯片温度的最高点在有源区中心,芯片出光面的温度分布为从中心向两侧逐渐降低。慢轴(平行于 PN 结)方向的温度分布数据如

图 3 所示。从图 3 可以看出:在 $W=100\text{ }\mu\text{m}$ 的条件下,当 $P_{th}=0.5\text{ W}$ 时,芯片的工作温度在慢轴方向从两侧到中心由 $25.94\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $26.06\text{ }^\circ\text{C}$,温差为

0.18 °C, 温度梯度较小; 当 $P_{th} = 1.5$ W 时, 芯片工作温度在慢轴方向从两侧到中心由 27.82 °C 升高到 28.18 °C, 温差为 0.36 °C; 当 P_{th} 从 0.5 W 升高至 1.5 W 时, 激光器芯片温度整体升高了 2 °C, 且芯片两侧与其中心区域的温差增大, 芯片横向温度梯度有所变大。随着热功率增大, 芯片的结温随之升高, 平行结平面方向的温度分布变得陡峭, 折射率变化明显, 由(8)、(9)式可以计算得到热透镜焦距随热功率的升高而减小, 从而使得慢轴发散角随热功率的增大而增大。

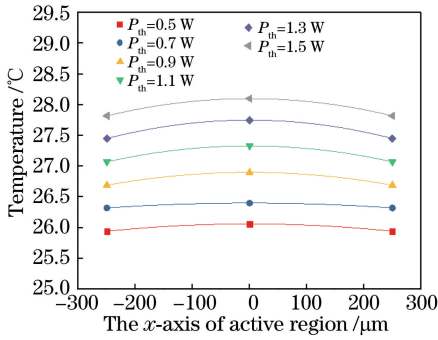


图 3 不同热功率 P_{th} 下有源区沿慢轴方向的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of active region along slow axis under different thermal powers P_{th}

3.2 不同接触宽度 W 下激光器边缘绝热封装 COS 的热分析

激光器芯片与过渡热沉间的接触宽度 W 的改变会导致激光器的散热发生变化, 进而对激光器的热阻有所影响。接触宽度 W 决定了激光器芯片工作时在水平方向上的温度梯度, 影响水平方向的材料折射率和热透镜效应, 从而影响激光器的慢轴发散角。

空气的导热能力差, 热导率仅为 0.02 W/(cm·K), 空气隙的引入会使激光器 COS 的整体散热能力稍有降低, 导致激光器芯片的结温小幅升高。在 $P_{th} = 1.3$ W 的情况下, 芯片中心的最高温度随 W 的变化如图 4 所示, 可见: 当 $W = 500$ μm 时, 芯片中心的最高温度为 27.47 °C; 当 $W = 100$ μm 时, 芯片中心的最高温度为 27.75 °C, 相比前者只升高了 0.28 °C, 即温度只有升高了 1%; 随着接触宽度 W 减小, 芯片中心的最高温度稍有升高。不同接触宽度 W 下 COS 的热阻如图 5 所示, 可见: 当 $W = 500$ μm 时, 芯片的 R_{th} 为 1.9 °C/W; 热阻数值随接触宽度 W 的减小而略微增大, 当 $W = 100$ μm 时, 芯片的 R_{th} 为 2.11 °C/W, 较前者有约 10% 的增加。由模拟结果可知, 边缘绝热封装对芯片中心温度升高的影响很小, 可以忽略不计。经边

缘绝热封装后, COS 的热阻会稍有增大, 但在可接受范围内。

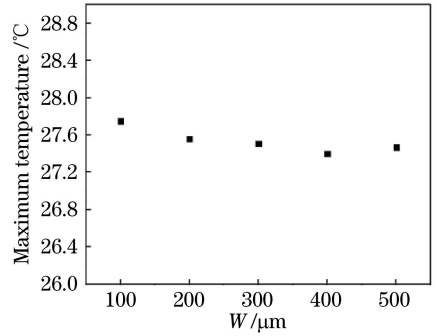


图 4 不同接触宽度 W 下芯片中心的最高温度
Fig. 4 Maximum temperature at center of chip under different contact widths W

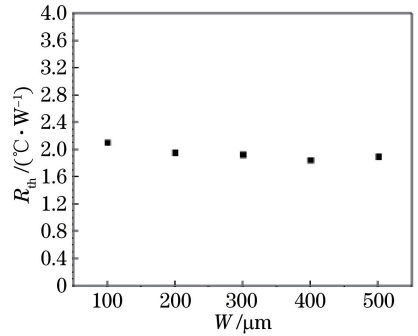


图 5 不同接触宽度 W 下激光器的 COS 热阻
Fig. 5 Thermal resistance of laser COS under different contact widths W

在 $P_{th} = 1.3$ W 的条件下, 当 W 分别为 100, 200, 300, 400, 500 μm 时, 激光器芯片的工作温度分布如图 6 所示。从图 6 可以看出, 芯片温度的最高点在有源区中心, 芯片出光面的温度从中心向两侧逐渐降低。慢轴(平行于 PN 结)方向的温度分布数据如图 7 所示。当 $W = 500$ μm 时, 芯片的工作温度在慢轴方向从两侧到中心由 26.09 °C 升高到 27.47 °C, 温差为 1.38 °C; 当 $W = 100$ μm 时, 芯片的工作温度在慢轴方向从两侧到中心由 27.45 °C 升高到 27.75 °C, 温差仅为 0.3 °C。随着芯片与热沉接触宽度的减小, 芯片沿慢轴方向的温度均匀性变好。折射率分布的均匀程度与温度分布的均匀程度成正相关, 由此可推测折射率分布的均匀性亦提高。由(8)、(9)式可知, 芯片的等效热透镜焦距变大, 慢轴远场发散角变小。

4 实验方案

4.1 边缘绝热封装实验

采用波长为 808 nm 的脊型 F-P 腔 InGaAs/

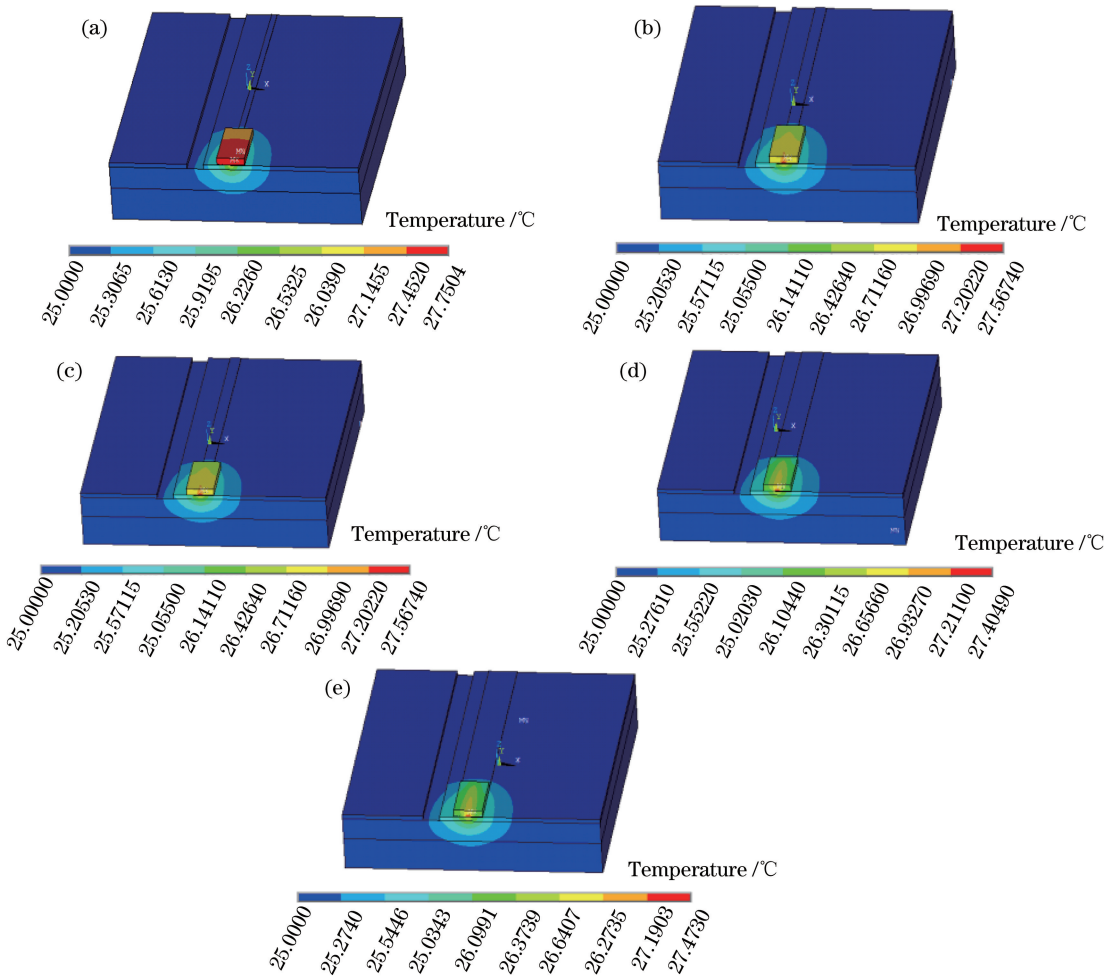


图 6 不同接触宽度 W 下芯片温度的变化。

(a) $W=100 \mu\text{m}$; (b) $W=200 \mu\text{m}$; (c) $W=300 \mu\text{m}$; (d) $W=400 \mu\text{m}$; (e) $W=500 \mu\text{m}$

Fig. 6 Variation in chip temperature with contact width W . (a) $W=100 \mu\text{m}$; (b) $W=200 \mu\text{m}$;

(c) $W=300 \mu\text{m}$; (d) $W=400 \mu\text{m}$; (e) $W=500 \mu\text{m}$

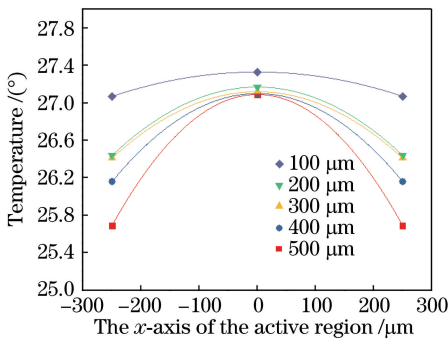


图 7 不同接触宽度 W 下有源区沿慢轴方向的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of active region along slow axis under different contact widths W

GaAs 单管半导体激光器进行实验, 脊型条宽为 $100 \mu\text{m}$, 腔长为 $900 \mu\text{m}$, 周期为 $500 \mu\text{m}$ 。采用软焊料(钢焊料)进行烧结、封装, 热沉材料选用 BeO 陶瓷, 并在其上镀一层 $50 \mu\text{m}$ 厚的金, 以保证芯片与

热沉接触良好。

BeO 的热导率为 $260 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 比热容为 $1088 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 密度为 $3030 \text{ kg}/\text{m}^3$, 具有良好的导热性能, 适合作为激光器的热沉材料。为保证后续金丝键合工艺中金线与热沉的良好接触, 实验时在 BeO 陶瓷上镀上一层厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的金。选用划片机在陶瓷热沉中心处留下宽度分别为 $500, 400, 300, 200 \mu\text{m}$ 的凸起长条, 凸起高度约为 $150 \mu\text{m}$ 。在凸起长条两侧各留出 $200 \mu\text{m}$ 的凹槽, 即为边缘绝热封装中的空气隙。在凸起长条表面涂覆钢焊料, 以控制芯片与热沉的接触宽度。将过渡热沉置于三氯甲烷中浸泡, 然后用去离子水清洗, 最后用氮气烘干, 以保证过渡热沉干燥洁净。划片时为后续金丝键合工艺划出 $200 \mu\text{m}$ 宽的沟槽, 可防止通电时正负极短路^[18]。边缘绝招封装结构如图 8(b) 所示, 普通封装结构如图 8(c) 所示, 芯片直接与过渡

热沉接触。采用 Flipchip 型倒装焊的封装方法,即激光器芯片的 P 面与带有焊料的过渡热沉接触,烧结时在真空腔中通入助焊气体——甲酸(HCOOH),目的是使钢焊料更好还原,以保证烧结

效果。用 Fineplacet 贴片机进行烧结。将焊在 BeO 陶瓷热沉上的芯片与热沉进行金丝热压键合,金丝键合之后的激光器边缘绝热封装 COS 实验图如图 9 所示。

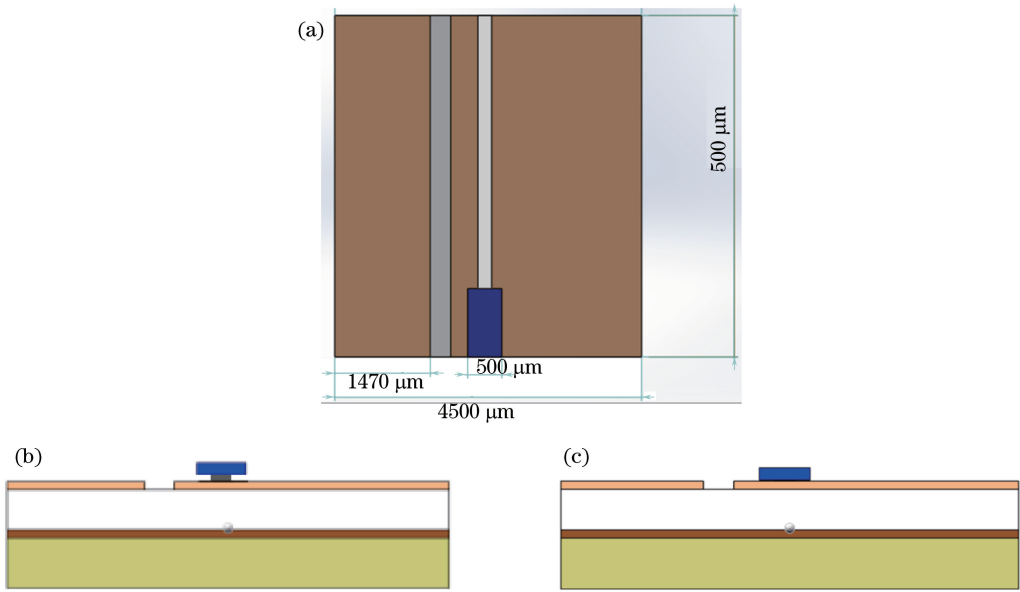


图 8 边缘绝热封装结构以及普通封装结构。

(a) 边缘绝热封装结构的俯视图;(b)边缘绝热封装结构的侧视图;(c)普通封装结构侧视图

Fig. 8 Structures of edge adiabatic package and normal package. (a) Top view of edge adiabatic package structure; (b) side view of edge adiabatic package structure; (c) side view of normal package structure

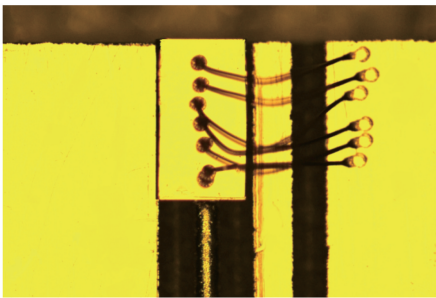


图 9 边缘绝热封装 COS 实验图

Fig. 9 COS experimental diagram of edge adiabatic package

4.2 参数测量方法

半导体激光器的近场光斑难以捕捉,实验中通过测量远场特性来描述光束质量。高斯光束经透镜变换后光束质量不变,通过测量变换后的光束参数反推出初始光束参数值是比较方便的。激光器的快轴发散角较大,需对激光器的快轴出光进行准直,用圆柱透镜对快轴光束进行压缩,快轴光束准直扩束后不会影响慢轴发散角的测量。采用透镜准直后,光束变换为可测量的分布状态,在光路中加入衰减片对大功率激光进行均匀衰减,得到不改变功率密度分布的弱功率激光。采用功率衰减结合 CCD 图

像采集分析测量的方法,通过移动 CCD 位置,得到不同位置下的激光光斑图像,记录每次移动位置的坐标及相应的光斑尺寸。根据 ISO 11146 标准,为保证精度,至少在 10 个位置下进行测量,然后用数值计算软件拟合出传输光束的方程,测得与激光器光束质量相关的参数,如慢轴发散角、光束参数积 BPP、光束质量因子 M^2 。测量的主要误差为相机自身噪声、积分、分辨率误差和透镜球差等,仪器误差小于 5%,在可接受的范围内^[5]。

激光器热阻的测量基于(10)~(12)式进行,在不同的工作电流下测量激光器的功率-电流曲线和光谱图,得到其工作电压、输出功率和峰值波长,再由(11)式得到不同工作电流下的热功率。对于本实验中的 GaAs 材料系激光器而言, α' 取值为 $0.29 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[5,15]。

5 实验结果与分析

5.1 边缘绝热封装与普通封装方式下的慢轴光束质量

图 10 为激光器采用不同 W 时,边缘绝热封装和普通封装方式下的慢轴发散角、BPP 和 M^2 随工

作电流变化的实测数值拟合曲线。从图 10(a)可以看出:对于普通封装的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,慢轴发散角由 6.5° 增大到 11.5° ,变化量为 5.0° ;对于 $W=200\ \mu\text{m}$ 的边缘绝热封装的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,慢轴发散角由 5.8° 增大到 8.2° ,变化量为 2.4° ;采用边缘绝热封装的激光器芯片时,慢轴发散角在工作电流较小时与普通封装的差别不大,随电流逐渐增大,边缘绝热封装表现出了对慢轴远场热晕染现象的控制;当工作电流为 1.6 A 时,慢轴发散角由普通封装下的 11.5° 减小至边缘绝热封装下的 8.2° ,降幅为 28%。这与 Piprek 等^[3]的研究结果一致,说明采用增加空气隙的边缘绝热封装方式可减小慢轴发散角。

从图 10(b)可以看出:采用普通封装方式的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,光束参数积 BPP 从 $11.3\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 升高到 $20.0\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$,变化量为 $8.7\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$;对于 $W=200\ \mu\text{m}$ 的绝热封装的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,光束参数积 BPP 由 $10.6\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 升高到 $14.3\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$,变化量为 $3.7\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$;在大的工作电流 (1.6 A) 下, BPP 由普通封装方式的 $20.0\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 降低至绝热封装方

式的 $14.3\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$,降幅为 28.5%。

从图 10(c)可以看出:采用普通封装方式的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,光束质量因子 M^2 由 12.7 增大到 19.4,增大量为 6.7;对于 $W=200\ \mu\text{m}$ 的边缘绝热封装下的激光器芯片,当工作电流从 0.4 A 增加到 1.6 A 时,光束质量因子 M^2 由 10.3 增大到 14.6,增大量为 4.3;在大的工作电流 (1.6 A) 下, M^2 由普通封装方式的 19.4 降低至绝热封装方式的 14.6,降幅为 24%。 M^2 因子越大,光束相比理想高斯光束来说越发散,光束质量越差。从以上实验结果可以看出,采用边缘绝热封装方式的激光器芯片在远场慢轴方向上更加准直,聚焦性更好,衍射程度更小,而且随着工作电流增大,光束质量因子 M^2 的变化量更小,说明光束质量的劣化程度有所减弱。

从图 10 可以看出,随着工作电流升高,慢轴发散角、BPP 和 M^2 均出现了增大的趋势,说明激光光束质量恶化。工作电流的增大带来了热功率的增大,在激光器工作电流较小(阈值附近)时,反波导效应占主导地位,此时慢轴远场发散角较小;随着工作电流继续增大,折射率引导机制在光场限制中占主导地位,热透镜现象明显增强,热透镜焦距缩短,慢轴远场发散角增大,光束质量降低,与 3.2 节的仿真结果一致。

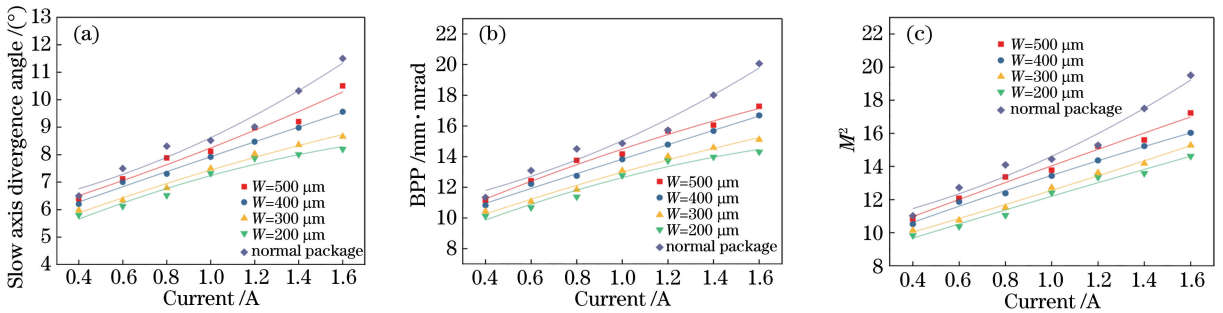


图 10 边缘绝热封装和普通封装方式下与光束质量相关的参数随电流的变化。(a)慢轴发散角;(b) BPP;(c) M^2

Fig. 10 Variations in parameters related to beam quality with current for edge adiabatic package and normal package. (a) Slow axis divergence angle; (b) BPP; (c) M^2

图 11 展示了 W 分别为 200, 300, 400, 500 μm 的边缘绝热封装的激光器芯片在不同工作电流下的慢轴发散角,可以看出:边缘绝热封装对慢轴发散角的限制作用随接触宽度 W 的减小而增强;在小的工作电流 (0.4 A) 条件下, W 为 200, 300, 400, 500 μm 的激光器芯片的慢轴发散角分别为 5.8° 、 5.9° 、 6.2° 、 6.3° ;在较大的工作电流 (1.6 A) 下, W 为 200, 300, 400, 500 μm 的激光器芯片的慢轴发散角分别为 8.2° 、 8.7° 、 9.6° 、 10.5° ;随着接触宽度 W 的减小,慢轴发散角呈现减小的趋势,尤其是在高工作电流下,发

散角的减小更为显著。相应地, BPP 和 M^2 也呈现出相同的趋势。在小的工作电流 (0.4 A) 下, W 为 200, 300, 400, 500 μm 的激光器的 BPP 分别为 10.1, 10.4, 10.8, 11.1 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$, M^2 因子分别为 9.8, 10.1, 10.5, 10.8;当工作电流为 1.6 A 时, W 为 200, 300, 400, 500 μm 的激光器芯片的 BPP 分别为 14.3, 15.1, 16.6, 17.2 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$, M^2 因子分别为 14.6, 15.2, 16.0, 17.2。

随着芯片在慢轴方向与过渡热沉接触宽度 W 的减小,芯片与过渡热沉间的空气隙的宽度增大,

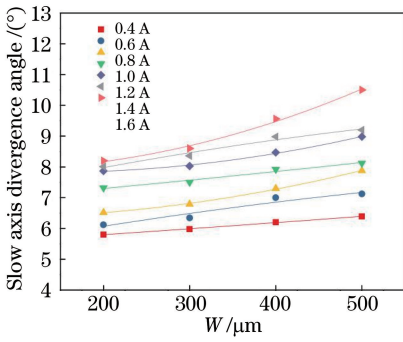


图 11 慢轴发散角随接触宽度 W 的变化

Fig. 11 Slow axis divergence angle versus contact width W

芯片通过中心凸台的导热变多,芯片有源区的横向温度分布更加均匀。从 ANSYS 18.0 仿真结果(图 2、3)中也可看出,折射率更加均匀,热透镜效应变弱,慢轴发散角也因此降低,慢轴光束质量得到改善,与仿真分析结果一致。从有源区沿慢轴方向的温度分布(图 6)中可以看出,温度分布更加均匀,(3)式中折射率分布因子数值变小,等效热透镜焦距 f 变大,激光器热透镜效应减弱,慢轴发散角的数值变小,慢轴光束质量有了更大改善。慢轴发散角、BPP 和 M^2 拟合曲线的斜率也相应变小,说明慢轴发散角、BPP 和 M^2 随着工作电流增大变得更加稳定。

5.2 边缘绝热封装激光器 COS 的热阻

当激光器芯片处于超过阈值的正常激射状态时,不同接触宽度下激光器热阻的仿真与实验结果如图 12 所示。由 3.2 节的仿真结果可知:当 $W = 500 \mu\text{m}$ 时,芯片的热阻 R_{th} 为 $1.9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$;当 $W = 200 \mu\text{m}$ 时,芯片的热阻 R_{th} 为 $1.96 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。实验结果如下:当 $W = 500 \mu\text{m}$ 时,激光器芯片 COS 的热阻 R_{th} 为 $2.25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$;当 $W = 200 \mu\text{m}$ 时,激光器芯片 COS 的热阻的 R_{th} 为 $2.4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。在实际封装中,人为操作存在热接触不够理想等误差,故而导致实验测得的热阻值相比仿真结果稍有增大,但与仿真结果相比,变化趋势是一致的,且数值相差不大。随着接触宽度 W 的减小,激光器的热阻 R_{th} 也出现约 6% 的小幅上升。激光器结温上升会影响激光器的输出波长, GaAs 材料激光器的中心波长 λ 随着有源区温度的升高而红移^[19]。当 $W = 500 \mu\text{m}$ 时,激光器中心波长 $\lambda = 806.3 \text{ nm}$;当 $W = 200 \mu\text{m}$ 时,激光器中心波长 $\lambda = 806.9 \text{ nm}$,中心波长较前者出现了 0.6 nm 的红移,可近似认为对激光器散热特性的影响不大。

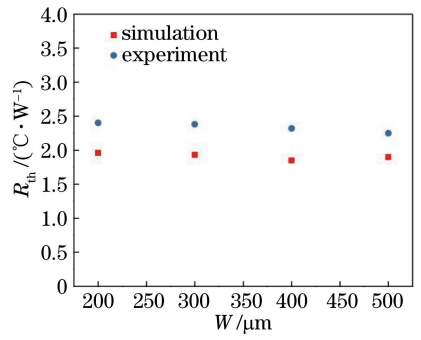


图 12 不同接触宽度 W 下激光器的热阻 R_{th}

Fig. 12 Thermal resistance R_{th} of laser under different contact widths W

5.3 边缘绝热封装对器件性能的影响

激光器热阻的大小可反映结温的变化,边缘绝热封装会使结温上升,从而导致激光器的激射波长、阈值电流、电光转换效率等性能恶化,因此,研究温度变化对激光器芯片性能的影响是至关重要的。半导体激光器的阈值电流 I_{th} 与结温相关,内部结温升高会导致阈值电流增大^[21]。实验测得当 $W = 500 \mu\text{m}$ 时,激光器阈值电流 $I_{\text{th}} = 0.17 \text{ A}$;当 $W = 200 \mu\text{m}$ 时,激光器阈值电流 $I_{\text{th}} = 0.18 \text{ A}$,较前者升高了 0.01 A。激光器电光转换效率在很大程度上依赖于器件的结温。当器件温度较低时,载流子还不足以获得足够的能量而跃出势垒,这有利于发光效率的提升。实验测得当 $W = 500 \mu\text{m}$ 时,激光器的电光转换效率 $\eta = 63\%$;当 $W = 200 \mu\text{m}$ 时,激光器的电光转换效率 $\eta = 60\%$,较前者降低了 3%。可以看出,激光器边缘绝热封装结温升高对器件光电特性(如阈值电流、电光转换效率)的影响很小,在可接受的范围内。边缘绝热封装器件与普通封装器件的光电特性对比如表 2 所示。

表 2 边缘绝热封装器件与普通封装器件的光电特性对比

Table 2 Comparison of photoelectric characteristics of edge adiabatic packages and normal package devices

Contact width $W / \mu\text{m}$	Threshold current I_{th} / A	Electro-optical conversion efficiency $\eta / \%$
200	0.18	60
500	0.17	63

6 结 论

改善慢轴光束质量对扩展半导体激光器的应用具有重要意义。削弱激光器的热透镜效应是改善半导体激光器慢轴光束质量的一个重要措施。分析了半导体激光器热透镜效应产生的原因和对光束质量

的影响,提出了边缘绝热封装的封装方法,并进行了理论分析;此外,基于有限元分析软件 ANSYS 18.0 对激光器工作芯片的热量分布进行了数值模拟,并对 808 nm InGaAs/GaAs 宽条形半导体激光器进行了边缘绝热封装实验,对其光束质量、热阻、激射波长、阈值电流、电光转换效率进行了测量。

在半导体激光器的边缘绝热封装中,激光器芯片与热沉之间留有空气隙,可削弱激光器工作时芯片横向温度不均而导致的热透镜效应,减小激光器的慢轴发散角。实验结果表明,普通封装与接触宽度 $W=200\ \mu\text{m}$ 的边缘绝热封装方式相比,在工作电流为 1.6 A 时,慢轴发散角由 11.5° (普通封装) 减小至 8.2° (边缘绝热封装),降幅为 28%。相应地,光束参数积 BPP 和光束质量因子 M^2 也分别降低了 28% 和 24%,且慢轴发散角、BPP 和 M^2 随电流变化更稳定,说明边缘绝热封装可以改善光束质量。热阻测量结果与仿真结果基本一致,当工作电流为 1.6 A 时,实测热阻 R_{th} 由普通封装的 $2.25\ \text{℃/W}$ 增大至边缘绝热封装的 $2.4\ \text{℃/W}$,即边缘绝热封装使热阻有所增大,增幅为 6%。激光器边缘绝热封装中的结温上升对器件光电特性(如激射波长、阈值电流、电光转换效率等)的影响均在 5% 以下,可以认为边缘绝热封装对器件性能的影响较小。边缘绝热封装方式对改善半导体激光器慢轴光束质量具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] Dai Z, Michalzik R, Unger P, et al. Numerical simulation of broad-area high-power semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(12): 2240-2254.
- [2] Bai J G, Leisher P, Zhang S G, et al. Mitigation of thermal lensing effect as a brightness limitation of high-power broad area diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7953: 79531F.
- [3] Piprek J. Inverse thermal lens effects on the far-field blooming of broad area laser diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 958-960.
- [4] Winterfeldt M, Crump P, Knigge S, et al. High beam quality in broad area lasers via suppression of lateral carrier accumulation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1809-1812.
- [5] Song J, Gao X, Yan H Y, et al. Thermal lens effect of high power semiconductor laser waveguide and its influence on beam divergence angle of slow axis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1005004.

宋健,高欣,闫宏宇,等. 大功率半导体激光器波导热透镜效应及对慢轴光束发散角的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1005004.

- [6] Puchert R, Menzel U, Bärwolff A, et al. Influence of heat source distributions in GaAs/GaAlAs quantum-well high-power laser arrays on temperature profile and thermal resistance [J]. Journal of Thermal Analysis, 1997, 48(6): 1273-1282.
- [7] Yuan Z B, Wang J W, Wu D, et al. Static and transient thermal behavior of high power semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 1957-1962.
袁振邦,王警卫,吴迪,等. 大功率半导体激光器阵列的稳态和瞬态热行为 [J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1957-1962.
- [8] Rieprich J, Winterfeldt M, Tomm J, et al. Assessment of factors regulating the thermal lens profile and lateral brightness in high power diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10085: 1008502.
- [9] Sheldon S J, Knight L V, Thorne J M. Laser-induced thermal lens effect: a new theoretical model [J]. Applied Optics, 1982, 21(9): 1663-1669.
- [10] Merchand E. Gradient index optics [M]. Netherlands: Elsevier, 2012: 43-48.
- [11] Piprek J. Self-consistent analysis of thermal far-field blooming of broad-area laser diodes [J]. Optical and Quantum Electronics, 2013, 45(7): 581-588.
- [12] Akhmanov S, Krindach D, Migulin A, et al. Thermal self-actions of laser beams [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1968, 4(10): 568-575.
- [13] Wang Z Q, Yao S, Cui B F, et al. Thermal characteristic of high beam quality laser diode array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2497-2501.
王智群,尧舜,崔碧峰,等. 高光束质量大功率半导体激光阵列的热特性 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2497-2501.
- [14] Both W, Piprek J. Thermal resistance of ridge-waveguide laser diodes based on GaAs, GaSb or InP [J]. Journal of Thermal Analysis, 1991, 37(1): 61-71.
- [15] Kim Y, Yang J T, Choi W Y. High-power broad-area laser diode performance improvement with a double pedestal structure [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(4): 042004.
- [16] Bärwolff A, Puchert R, Enders P, et al. Analysis of thermal behaviour of high power semiconductor laser arrays by means of the finite element method (FEM) [J]. Journal of Thermal Analysis, 1995, 45(3): 417-436.

- [17] 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.
- [18] Qiao C, Su R G, Li X, et al. Design and fabrication of 980 nm distributed Bragg reflection semiconductor laser with high power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0701002.
乔闯, 苏瑞巩, 李翔, 等. 980 nm 高功率 DBR 半导体激光器的设计及工艺 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0701002.
- [19] Kondow M, Kitatani T, Nakahara K, et al. Temperature dependence of lasing wavelength in a GaInNAs laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 777-779.
- [20] Chen T R, Chen P C, Ungar J, et al. Low-threshold and high-temperature operation of InGaAlAs-InP lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(1): 17-18.
- [21] Chen H T, Che X H, Xu H W, et al. Study on high-power laser diodes as pumping source at high operating temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2799-2802.
陈宏泰, 车相辉, 徐会武, 等. 高工作温度抽运用大功率激光二极管研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2799-2802.