

文章编号: 1000-7032(2021)04-0518-08

微热通道电极结构宽条形半导体激光器输出特性

蔡元红, 高 欣, 王警辉, 王芝浩, 薄报学*

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了抑制宽条形半导体激光器的热透镜效应, 提高慢轴光束质量, 本文提出并制作了一种微热通道电极结构激光器。该芯片 p 面注入区电极处被设计为较厚的高热导率的电极结构, 封装后激光器两侧与热沉之间形成空气间隙, 抑制激光器有源区横向热流, 使激光器内温度分布均匀, 有效地降低慢轴发散角。对该激光器的封装模型进行了稳态热分析, 优化了微热通道电极结构的厚度和宽度, 并制作了波长为 940 nm 的微热通道电极结构激光器。测试结果表明, 在注入电流为 2 A 时, 微热通道电极结构激光器的发散角相对于普通电极结构激光器降低了 24%, 有效地降低了激光器慢轴光束发散角。

关键词: 宽条形半导体激光器; 热透镜; 微热通道电极结构; 慢轴发散角

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200365

Output Characteristics of Broad-area Stripe Semiconductor Lasers with Microthermal Channel Anode Structure

CAI Yuan-hong, GAO Xin, WANG Jing-hui, WANG Zhi-hao, BO Bao-xue*

(State Key Laboratory of High-power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: bbx@cust.edu.cn

Abstract: In order to suppress the thermal lens effect of broad-area stripe semiconductor lasers, and thus improve the slow-axis beam quality of semiconductor lasers, a laser with microthermal channels anode structure is proposed and fabricated. The injection region electrode on the p-side of laser is designed as a thick electrode structure of high thermal conductivity. After packaging, an air gap is formed between the p-side of laser and the top side of AlN heat sink to suppress the transverse heat flow in the current injection region, so that the temperature distribution of the emission region is uniform and the slow-axis divergence angle is effectively reduced. The thickness and width of microthermal channels anode structure are optimized by steady-state thermal analysis of the laser packaging model. A 940 nm micro thermal channel anode structure laser is fabricated. The measurement results show that the divergence angle of the microthermal channels anode structure laser at 2 A is 24%, lower than that of the normal anode structure laser, which effectively reduces the laser slow-axis beam divergence angle.

Key words: wide stripe semiconductor laser; thermal lens; microthermal channel anode structure; slow-axis divergence angle

收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61774024); 国家重点研发计划(2017YFB0405100); 吉林省科技发展计划(20190302007GX)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (61774024); National Key R&D Project (2017YFB0405100); Science and Technology Development Plan of Jilin Province(20190302007GX)

1 引言

半导体激光器具有电光效率高、体积小、质量轻、寿命长、性能稳定、可靠性好等众多优点,已被广泛应用在材料、军事、通讯、信息存储与处理等领域^[1-6]。宽条形半导体激光器作为高功率半导体激光器的常用结构,存在慢轴远场发散角随着注入电流的增加而明显增大的现象,导致高功率工作时的光束质量严重退化^[7-10]。研究认为,废热引起的热透镜效应是导致慢轴远场发散角增大的主要原因之一^[11-12]。针对半导体激光器热透镜效应导致的光束质量退化,研究人员提出了一些改善方案。2013年,Piprek^[13]提出了一种在芯片与热沉间加入基座热沉的方法,降低了慢轴方向的发散角。2015年,Winterfeldt等^[14-15]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,使得激光器热透镜效应引起的光束参数积(BPP)降低了35%。2020年,赵碧瑶^[16]采用了一种边缘绝热封装方式,当芯片与热沉的接触宽度为200 μm时,慢轴发散角降低了28%,光束参数积和光束质量因子也分别降低了28%和24%。

以上研究大都通过改变热沉结构的方式来改善热透镜效应,显然这种方式会受到热沉制作成本的限制。因此,本文提出并制作了一种微热通道电极结构激光器芯片。该芯片不受制于热沉结构亦能改善热透镜效应,且通过仿真模拟,验证了微热通道电极结构激光器对热透镜效应的改善效果,并与实验测试结果进行了对比和分析。

2 模拟分析

2.1 宽条形半导体激光器热源

宽条形半导体激光器的电流注入条形宽度一般在50~200 μm,光电转换效率接近50%,侧向热传导易使激光器产生明显的热透镜效应,导致慢轴发散角增大^[17-18]。这些废热主要来源于有源区注入载流子的非辐射复合、辐射吸收、自发辐射吸收,激光器各结构层产生的焦耳热功率可以表达为^[17]:

$$Q = \frac{V_j}{d_{\text{active}}} \{ j_{\text{th}}(1 - \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}) + (j - j_{\text{th}}) \times [1 - \eta_{\text{ex}} - (1 - \eta_i)] \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}} \} + j^2 \rho_i, \quad (1)$$

其中, V_j 为PN结上的电压, d_{active} 为有源区的厚度, j_{th} 为阈值电流密度, η_{sp} 为自发发射内量子效率, f_{sp} 为自发辐射光子从有源区的逃逸因子, j 为注入电流密度, η_{ex} 为外微分量子效率, η_i 为受激辐射内量子效率, ρ_i 为除有源层外各材料层的电阻率。激光器产生的废热主要以热传导的方式向热沉散发^[19],其传导方式基于稳态热传导方程^[16]:

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

其中, Q 表示热功率密度, K 表示热导率, T 表示温度, x 轴、 y 轴、 z 轴方向分别表示慢轴(平行于PN结)方向、快轴(垂直于PN结)方向和激光发射(沿谐振器)方向。

2.2 宽条形半导体激光器热透镜效应

对于一般的宽条形半导体激光器,慢轴方向的折射率分布可以近似为缓变波导,从而对激光器光场起到限制作用^[8]。激光器工作时,波导材料的折射率分布主要受到温度分布和载流子浓度分布的影响^[11],可表达为:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T - a_{\text{tc}} \cdot \Delta N_{\text{tc}}, \quad (3)$$

其中, Δn 为折射率变化量, ΔT 为温度变化量, $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为温度折射率系数, a_{tc} 为载流子折射率系数, ΔN_{tc} 为载流子密度变化量。激光器工作的结温升通常大于25℃,温度导致的折射率增加量达到近0.01;激光器的阈值载流子密度约在 10^{18} cm^{-3} 量级,由此载流子注入引起的折射率变化量约为0.001。因此,激光器高功率工作时的侧向温度分布对侧向波导具有相对更大的影响。

激光器侧向波导的温度分布导致横向折射率呈梯度分布^[10],可以近似表示为:

$$n_{(x)}^2 = n_{(0)}^2 (1 - \alpha^2 x^2), \quad (4)$$

其中, $n_{(0)}$ 为中心位置折射率, α 表示折射率分布的不均匀程度。该折射率分布可对波导传输光束产生自聚焦透镜作用,增大输出光束的发散角。

2.3 微热通道电极结构仿真及分析

设计的微热通道电极结构激光器是将芯片p面注入区电极处采用高热导率材料,而注入区两侧采用低热导率材料制作,其基本结构如图1所示,插图微热通道电极结构激光器的实际封装模型。这种芯片封装后会使得芯片两侧区域向热沉垂直散热能力远小于中心区域,从而使高热导率

区域在芯片与热沉之间形成一个微型热通道。由于注入区两侧区域的垂直散热受到抑制,芯片有源区的横向热流将减少,热流将集中于热通道方向,从而减小热透镜效应。

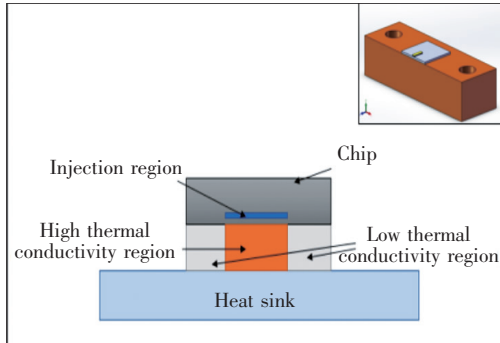


图 1 微热通道电极结构激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the microthermal channels anode structure laser

通过 ANSYS 模拟的普通电极结构激光器和微热通道电极结构激光器的热流和温度分布如图 2 和图 3 所示,热功率设定为 10 W。模拟涉及的激光器结构材料及参数如表 1 所示。

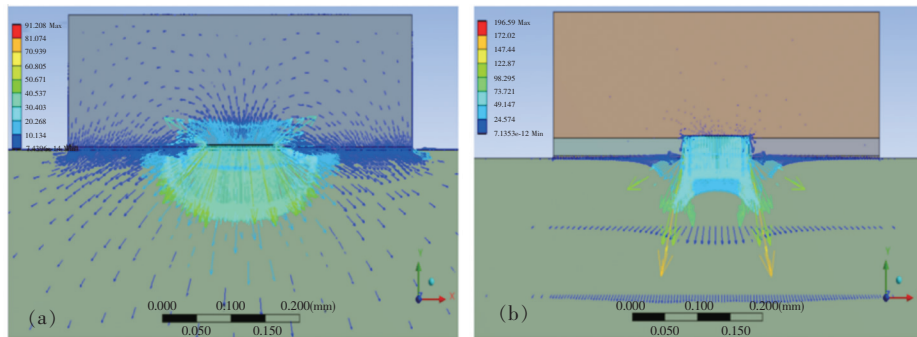


图 2 普通电极结构激光器(a)和微热通道电极结构激光器(b)热流图

Fig. 2 Heat flow diagram of normal anode structure laser(a) and microthermal channel anode structure laser(b)

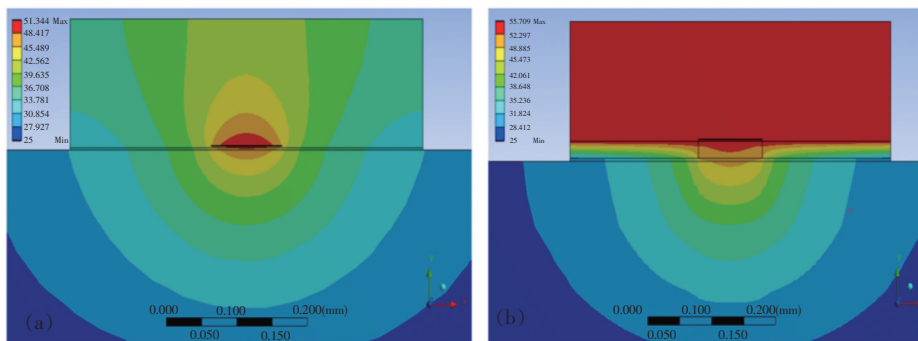


图 3 普通电极结构激光器(a)和微热通道电极结构激光器(b)温度分布云图

Fig. 3 Temperature distribution cloud map of normal anode structure laser(a) and microthermal channel anode structure laser(b)

表 1 激光器结构的材料参数

Tab. 1 Material parameters of laser structure

Structural layer	Materials	Size	Thermal
		$L \times W \times H /$ mm	conductivity/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Laser chip	GaAs	$2 \times 0.5 \times 0.14$	55
Active region	InGaAs/ GaAs	$2 \times 0.1 \times 0.001$	55
Solder	AuSn	$2 \times 0.5 \times 0.003$	57
Submount	AlN	$6 \times 6 \times 0.3$	180
Heat sink	Cu	$25 \times 8.1 \times 5.1$	398

由图 3 可以看出,微热通道电极结构激光器的内部温度分布均匀性明显高于普通结构激光器。由图 2(a)可以看出主要原因是由于激光器有源区的横向热流导致波导内的温度分布呈中心温度高、边缘温度低的现象。图 2(b)中,微热通道电极结构的引入限制了芯片有源区两侧向热沉传热,芯片有源区的横向热流减小,从而使两侧温度升高,激光器内部温度分布趋于均匀,如图 3(b)所示。

2.4 微热通道电极结构优化

微热通道电极结构是激光器与热沉之间主要的热传递通道,要求其材质导热性较好。因此本文采用 Cu 作为激光器的微热通道电极结构材料,其热导率为 $398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;而低热导率区为空气间隙,其导热率为 $0.023 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,能有效地限制芯片边缘的热传递。

通过分析可知,芯片会受微热通道电极结构的厚度与宽度的影响。微热通道电极结构会导致芯片热阻增加,且微热通道电极结构厚度越大,热阻越大,引起激光器结温升高,如图4所示。由图4(a)可以看出,普通电极结构激光器的注入区结平面温度分布呈现为中间高、边缘低的不均匀现象。有源区中心温度最高,达到 $50.8 \text{ }^\circ\text{C}$,芯片边缘温度为 $31.6 \text{ }^\circ\text{C}$,结平面温度分布极不均匀;而微热通道电极结构激光器的结平面温度明显分布均匀,并且随着微热通道电极结构厚度的增加均匀性得到进一步改善。同时,微热通道电极结构

也会导致激光器结温上升,这是由于激光器发光区产生的热量只能通过微热通道电极结构传热,传热路径受到限制,会引起一定的结温升。如图4(b)所示,激光器的中心结温会随微热通道电极厚度的增加而增大,但其注入区的温度差会逐渐减小。这是由于随着微热通道电极厚度的逐渐增加,加大了对有源区的横向热流限制,微热通道电极结构调控温度分布的能力得到增强,芯片内部温度分布更加均匀。由图4可以看出,当微热通道电极厚度达到 $20 \text{ } \mu\text{m}$ 以上,其温度分布将趋于稳定,注入区温度差为 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$,中心结温为 $56.5 \text{ }^\circ\text{C}$,相对于普通电极结构激光器结温升高 $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据以上分析,将微热通道电极结构厚度设置为 $20 \text{ } \mu\text{m}$,模拟了热功率为 10 W 时,宽度为 $100, 150, 250, 350, 450, 500 \text{ } \mu\text{m}$ 的微热通道电极结构激光器结平面温度分布,其结果如图5所示。由图5(a)可以看出,随着微热通道电极结构的宽度增加,激光器的中心结温明显下降,但注入区的温度分布均匀性大幅降低;通过图5(b)可以看出,

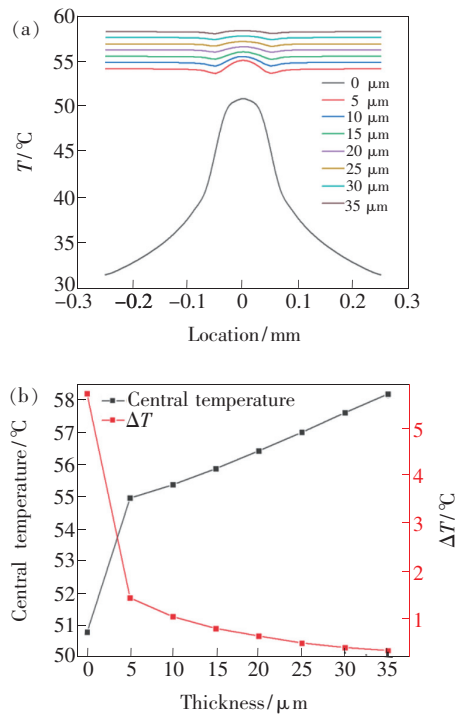


图4 不同厚度微热通道电极结构激光器的结温。(a)结平面温度分布;(b)激光器注入区温度差和中心结温。

Fig.4 Junction temperature of microthermal channels anode structure lasers with different thickness. (a) Junction plane temperature distribution. (b) Temperature difference within the laser injection region and the central junction temperature.

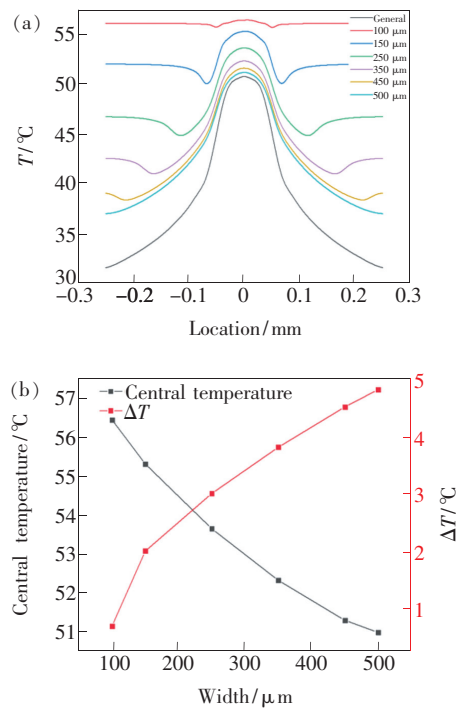


图5 不同宽度微热通道电极结构激光器的结温。(a)结平面温分布;(b)激光器注入区温度差和中心结温。

Fig.5 Junction temperature of microthermal channels anode structure lasers with different widths. (a) Junction plane temperature distribution. (b) Temperature difference within the laser injection region and the central junction temperature.

当微热通道结构宽度增加到 $500\ \mu\text{m}$ 时,激光器最高结温降低到 $51.2\ ^\circ\text{C}$,接近于普通电极结构激光器结温。随着微热通道电极结构宽度的增加,注入区温度差增大。当宽度增加到 $150\ \mu\text{m}$ 时,注入区温度差快速地由 $0.7\ ^\circ\text{C}$ 增加到 $2.2\ ^\circ\text{C}$,随后近似呈线性增加;宽度为 $500\ \mu\text{m}$ 时,注入区温度差增加至 $4.8\ ^\circ\text{C}$ 。

微热通道电极结构会引起芯片一定的温升,并随着其厚度的增加而增大。厚度过小,芯片内部温度调控不明显;微热通道宽度增加会降低其对横向热流的限制,由此设计微热通道电极厚度为 $20\ \mu\text{m}$ 左右,宽度为 $100\ \mu\text{m}$,可以有效限制横向热流,改善注入区的温度分布均匀性。

2.5 不同热功率 (P_{thermal}) 条件下微热通道电极结构激光器热分析

为了更加准确地说明微热通道电极结构对热透镜效应的改善情况,对比了 $100\ \mu\text{m}$ 条宽、 $20\ \mu\text{m}$ 厚微热通道电极结构激光器与普通电极结构激光器的热特性,如图 6 所示。可以看出,两种激光器的温度分布均匀性会随 P_{thermal} 的增加而逐渐变差,但普通电极结构激光器变化更为明显。

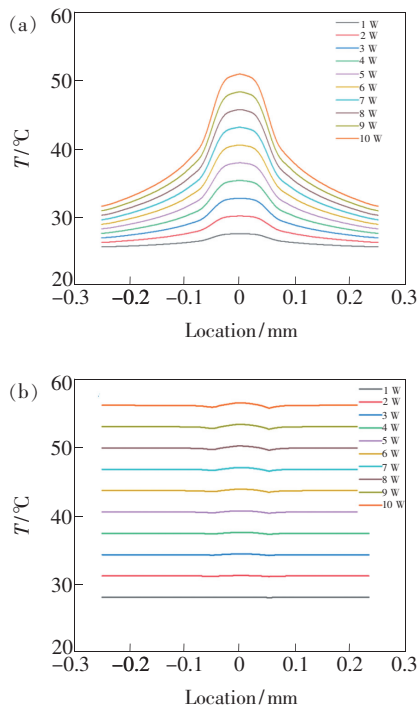


图 6 不同热功率条件下,激光器的结平面温度分布。(a)普通电极结构激光器;(b)微热通道电极结构激光器。

Fig. 6 Junction temperature of lasers at different thermal power conditions. (a) Normal anode structure laser. (b) Microthermal channels anode structure laser.

图 7 为不同热功率 (P_{thermal}) 条件下激光器的中心结温和注入区温度差特性。当热功率 (P_{thermal}) 较小时,两种激光器的中心结温相差较小,几乎一致,但注入区温度差差别较大;随着 P_{thermal} 的增加,两种激光器的中心结温都随之增加,其中微热通道电极结构激光器的中心结温增加较快。 $P_{\text{thermal}} = 10\ \text{W}$ 时,普通电极结构激光器的中心结温为 $50.7\ ^\circ\text{C}$,微热通道电极结构激光器的中心结温为 $56.5\ ^\circ\text{C}$ 。以上结果说明微热通道电极结构激光器的热阻略大,计算得到普通电极结构激光器的热阻为 $2.58\ ^\circ\text{C}/\text{W}$,微热通道电极结构激光器热阻为 $3.15\ ^\circ\text{C}/\text{W}$ 。从图 7(b) 可以看出,当 $P_{\text{thermal}} = 10\ \text{W}$ 时,普通电极结构激光器的注入区温度差达到了 $5.7\ ^\circ\text{C}$,而微热通道电极结构激光器的注入区温度差仅为 $0.8\ ^\circ\text{C}$ 。因此,微热通道电极结构对大功率激光器热透镜效应的改善具有明显作用。

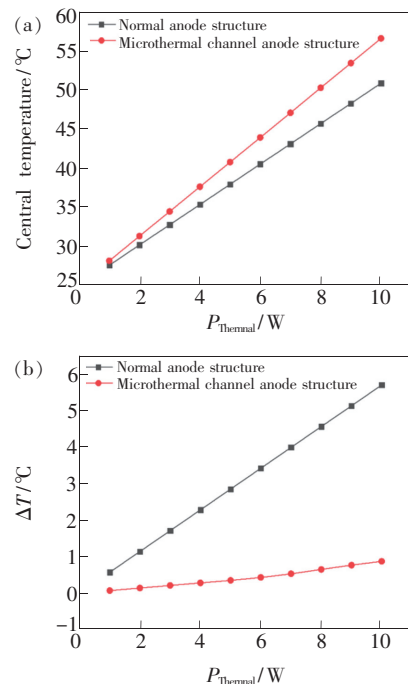


图 7 激光器不同热功率下的中心结温(a)和注入区温度差(b)的关系

Fig. 7 Relationship between laser thermal power and central junction temperature (a), temperature difference within the laser injection region (b).

3 实验与分析

3.1 微热通道电极结构激光器的实验制作

实验采用波长为 $940\ \text{nm}$ 、有源区为 InGaAs /

GaAs 应变量子阱的宽条形 F-P 腔激光器,条形电流注入区宽度为 $100\ \mu\text{m}$,腔长为 $2\ 000\ \mu\text{m}$,周期为 $500\ \mu\text{m}$ 。微热通道电极结构的 Cu 热通道厚度为 $20\ \mu\text{m}$,宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 。Cu 热通道采用电镀工艺在外延片的 p 面电极条上进行图形电镀而成,通过控制电镀电流密度调控电镀速率,得到表面平整、致密的条形厚 Cu 膜。然后利用划片机解理成单个激光器芯片。采用 p 面朝下的封装方式,用 AuSn 焊料将芯片焊装在 AlN 过渡热沉上,使微热通道电极结构的两侧与 AlN 过渡热沉表面之间形成空气间隙。AlN 过渡热沉焊装在 Cu 热沉表面,并通过 TEC 进行激光器工作温度的精密控制。封装完成后的激光器如图 8 所示。

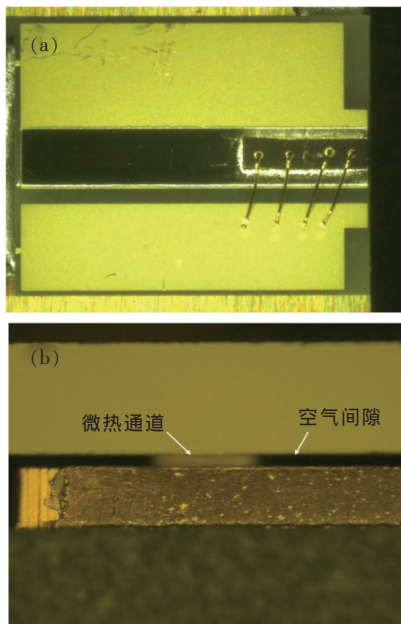


图 8 激光器封装照片。(a) AlN 热沉封装激光器;(b) 微热通道电极结构激光器前端面。

Fig. 8 Packaged laser. (a) AlN heat-sink packaged laser. (b) Front view of the microthermal channels anode structure laser.

3.2 实验结果与分析

对普通电极结构和微热通道电极结构激光器进行 AlN 热沉封装,分别在连续工作条件下进行 P - I - V 、光谱和输出光束远场测试,激光器工作温度设定为 $15\ ^\circ\text{C}$ 。图 9 所示为测试芯片的典型光电特性。

图 9(a) 为普通电极条形激光器与微热通道电极结构激光器的 P - I - V 曲线。由图中可以看出,微热通道电极结构激光器的阈值电流为 $0.23\ \text{A}$,

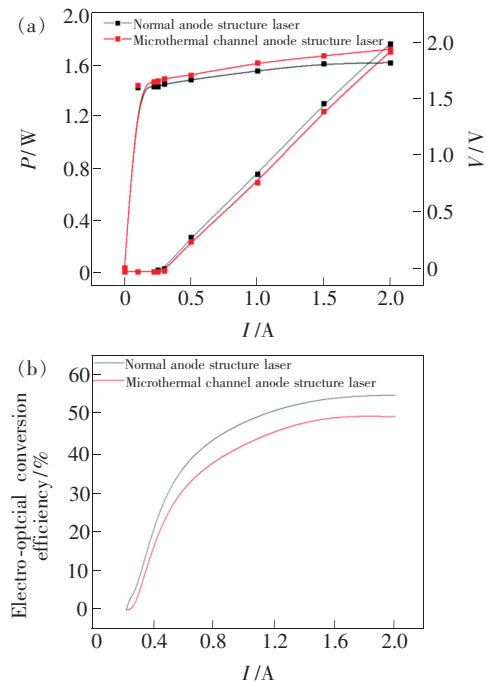


图 9 连续工作条件下,普通电极结构激光器与微热通道电极结构激光器的光电性能。(a) P - I - V 曲线;(b) 电光转换效率。

Fig. 9 Optoelectronic performance of the normal anode structure laser and the microthermal channels anode structure laser under CW condition. (a) P - I - V curve. (b) Electro-optical conversion efficiency.

普通激光器阈值电流为 $0.22\ \text{A}$ 。微热通道电极结构激光器的输出功率略低于普通激光器,在 $2.0\ \text{A}$ 的工作电流下,微热通道电极结构激光器的输出功率为 $1.7\ \text{W}$,普通电极结构激光器的输出功率为 $1.77\ \text{W}$ 。由 I - V 曲线可以看出,微热通道电极结构激光器的微分电阻为 $0.15\ \Omega$,普通电极激光器的微分电阻为 $0.1\ \Omega$ 。微热通道电极结构激光器的微分电阻略高于普通电极激光器,这可能是由于图形电镀电极的材料致密性较低引起,可以通过优化电镀工艺或采用溅射 Cu 工艺得到改善。从图 9(b) 可以看出,在 $2.0\ \text{A}$ 工作电流下,普通电极结构激光器的电光转换效率为 56.6% ,而微热通道电极结构激光器的电光转换效率为 50.2% ,其电光效率的降低主要由以上微分电阻的增加引起。

半导体激光器的激射波长受到结温的明显影响,表现为随着结温的升高会出现波长红移。表 2 给出了两种电极结构激光器的波长红移量和计算热阻值。可以看出,微热通道电极结构激光器

的封装热阻略大于普通电极结构激光器,与理论分析相符。

表 2 激光器的波长红移量和热阻值

Tab. 2 Wavelength redshift and thermal resistance values of measured lasers

Laser structure	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$R_{\text{th}}/(\text{°C} \cdot \text{W}^{-1})$
Normal anode	4.69	1.05
Microthermal channel anode	5.72	1.1

最后,测试了普通电极结构激光器和微热通道电极结构激光器的慢轴方向光束发散特性,测试结果如图 10 所示。可以看出,微热通道电极结构激光器的慢轴方向光束发散角明显低于普通电极结构激光器。当注入电流 $I=0.5\text{ A}$ 时,普通电极结构激光器的发散角为 3.5° ,微热通道电极结构激光器的发散角为 3° ;当 $I=2\text{ A}$ 时,普通电极结构激光器的发散角为 5.2° ,微热通道电极结构激光器发散角为 4° 。随着注入电流的增加,两种结构激光器的发散角差值明显增大。这是由于随着注入电流的增加,激光器热功率增加,激光器内部结温升高,普通电极结构激光器的注入区温度分布开始趋于不均匀,热透镜效应增加,导致发散角逐渐变大。微热通道电极结构激光器能够限制激光器的有源区横向热流,抑制热透镜效应,激光器发散角的增大将会受到明显抑制。以上测试结果也与前面模拟的激光器发散角变化特性基本一致,说明微热通道电极结构可成为改善高功率宽条形半导体激光器慢轴光束质量的有效探索途径。

参 考 文 献:

- [1] 董彦,梁琼,王志刚. 大功率半导体激光器应用 [J]. 光电技术应用, 2003,18(4):21-25.
DONG Y, LIANG Q, WANG Z G. Application of high power semiconductor laser [J]. *Electro-Opt. Technol. Appl.*, 2003,18(4):21-25. (in Chinese)
- [2] LIN L. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2000,34(4-6):231-253.
- [3] NISHIYAMA T, TOMII N, SATO M, *et al.*. Clinical evaluation of OSADA LIGHTSURGE 3000, a high power diode laser [J]. *Nippon Laser Igakkaishi*, 1995,16(2):9-18.
- [4] 马晓辉,史全林,徐莉,等. 高功率半导体激光器光纤耦合模块 [J]. 红外与激光工程, 2009,38(4):674-678.
MA X H, SHI Q L, XU L, *et al.*. High-power laser diode fiber-coupled module [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2009,38(4):674-678. (in Chinese)
- [5] 雷志锋,杨少华,黄云. 高功率半导体激光器的可靠性与寿命评价 [J]. 应用光学, 2008,29(1):90-95.
LEI Z F, YANG S H, HUANG Y. Reliability and lifetime assessment of high-power diode laser [J]. *J. Appl. Opt.*, 2008,29(1):90-95. (in Chinese)

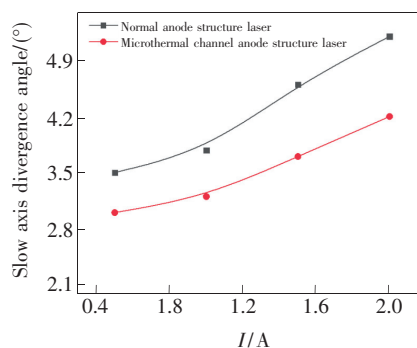


图 10 不同注入电流下激光器慢轴方向光束发散角

Fig. 10 Slow axis beam divergence angle of lasers at different injection currents

4 结 论

本文首先从理论上分析了激光器温度分布不均匀与热透镜效应的关系,提出了微热通道电极结构激光器芯片,通过抑制芯片有源区的横向热流,调控激光器内部温度分布,抑制热透镜效应,减小慢轴光束发散角。其次,通过电镀铜工艺制备了波长为 940 nm 的微热通道电极结构激光器,AlN 热沉焊装测试表明,微热通道结构能够有效地抑制热透镜效应、降低慢轴方向光束发散角。工作电流为 2 A 时,微热通道电极结构激光器的发散角降低了 24% ,在高注入电流条件下,微热通道电极结构激光器的热透镜效应抑制作用有明显改善。实验表明,微热通道电极结构的引入会导致激光器微分电阻略有增加,热阻增加 4% 左右。

- [6] CRUMP P, ERBERT G, WENZEL H, *et al.*. Efficient high-power laser diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2013, 19(4):1501211-1-11.
- [7] 闫宏宇, 高欣, 宋健, 等. 976 nm 宽条形高功率半导体激光器的光束质量 M^2 评价 [J]. *发光学报*, 2019, 40(2):196-203.
YAN H Y, GAO X, SONG J, *et al.*. Evaluation of beam quality M^2 for 976 nm wide stripe high power semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(2):196-203. (in Chinese)
- [8] WENZEL H, DALLMER M, ERBERT G. Thermal lensing in high-power ridge-waveguide lasers [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2008, 40(5-6):379-384.
- [9] O'CALLAGHAN J R, HOULIHAN J, VOIGNIER V, *et al.*. Spatial coherence and thermal lensing in broad-area semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, 40(1):1-9.
- [10] CHAN P K L, PIPE K P, PLANT J J, *et al.*. Temperature mapping and thermal lensing in large-mode, high-power laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(20):201110-1-3.
- [11] 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):1005004-1-7.
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]. *Chin. J. Lasers*, 2018, 45(10):1005004-1-7. (in Chinese)
- [12] AN H Y, XIONG Y H, JIANG C L J, *et al.*. Methods for slow axis beam quality improvement of high power broad area diode lasers [C]. *Proceedings of SPIE 8965, High-power Diode Laser Technology and Applications XII, San Francisco, California, United States*, 2014:8965U.
- [13] PIPREK J. Inverse thermal lens effects on the far-field blooming of broad area laser diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2013, 25(10):958-960.
- [14] WINTERFELDT M, CRUMP P, KNIGGE S, *et al.*. High beam quality in broad area lasers *via* suppression of lateral carrier accumulation [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(17):1809-1812.
- [15] WINTERFELDT M, CRUMP P, WENZEL H, *et al.*. Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 116(6):063103.
- [16] 赵碧瑶, 井红旗, 仲莉, 等. 半导体激光器边缘绝热封装改善慢轴光束质量 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1):0105002-1-11.
ZHAO B Y, JING H Q, ZHONG L, *et al.*. Improving slow-axis laser beam quality of semiconductor laser with edge adiabatic package [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(1):0105002-1-11. (in Chinese)
- [17] 王文, 高欣, 周泽鹏, 等. 百瓦级多芯片半导体激光器稳态热分析 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5):1438-1443.
WANG W, GAO X, ZHOU Z P, *et al.*. Steady-state thermal analysis of hundred-watt semiconductor laser with multichip-packaging [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014, 43(5):1438-1443. (in Chinese)
- [18] 宋云菲, 王贞福, 李特, 等. 808 nm 半导体激光芯片电光转换效率的温度特性机理研究 [J]. *物理学报*, 2017, 66(10):101-106.
SONG Y F, WANG Z F, LI T, *et al.*. Efficiency analysis of 808 nm laser diode array under different operating temperatures [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2017, 66(10):101-106. (in Chinese)
- [19] 曹伟冬, 冯源, 晏长岭, 等. 基于 ANSYS Workbench 半导体激光器封装热特性分析 [J]. *现代物理*, 2018, 8(4):26078-1-7.
CAO W D, FENG Y, YAN C L, *et al.*. Analysis of thermal characteristics of semiconductor laser packaging based on ANSYS workbench [J]. *Mod. Phys.*, 2018, 8(4):26078-1-7. (in Chinese)



蔡元红(1996-),男,四川南充人,硕士研究生,2018年于长春理工大学光电信息学院获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器方面的研究。
E-mail: 1083907345@qq.com



薄报学(1964-),男,河南淇县人,博士,教授,2002年于吉林大学获得博士学位,主要从事高功率半导体激光器技术与应用的研究。
E-mail: bbx@cust.edu.cn