

文章编号: 0258-7025(2010)11-2799-04

高工作温度抽运用大功率激光二极管研究

陈宏泰 车相辉 徐会武 张世祖 林 琳 任永学 安振峰

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要 理论分析了工作温度对大功率激光二极管的工作波长、电光效率和器件寿命等的影响,采用波长补偿、高特征温度无铝材料设计外延和一体化烧焊等技术,设计制作了 808 nm 准连续波(QCW)高温激光器阵列。在热沉温度 70 °C 的工作条件下,80 A 单条输出功率大于 65 W,20 °C~70 °C 范围内特征温度 T_0 达到 145 K。10 叠层阵列电光效率达到 53%,工作寿命大于 10^9 次脉冲。

关键词 激光器;大功率激光二极管;高工作温度;特征温度;一体化烧焊

中图分类号 TN248.4;TN365 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2799

Study on High-Power Laser Diodes as Pumping Source at High Operating Temperature

Chen Hongtai Che Xianghui Xu Huiwu Zhang Shizu

Lin Lin Ren Yongxue An Zhenfeng

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract Based on the theoretical analysis for the influence of operating temperature on the operating wavelength electro-optical conversion efficiency and lifetime of the device, the high-power 808 nm quasi-continuous wave (QCW) laser diode array was fabricated with the technology of wavelength compensating, Al-free active region epitaxial material with high characteristic temperature and integrative soldering. When the heat sink temperature was 70 °C, a CW output power of 65 W of a single bar was achieved at a driving current of 80 A. A characteristic temperature of a single bar in the range of 20 °C~70 °C was estimated to be about 145 K. Under quasi-continuous wave (2% duty factor) operation condition, the laser diode array stacked with 10 bars achieved an electro-optical conversion efficiency of 53%, and a lifetime in excess of 10^9 shots.

Key words lasers; high-power laser diode; high operating temperature; characteristic temperature; integrative soldering

1 引 言

808~976 nm 波段大功率激光二极管(LD)主要应用于固体激光介质的抽运源^[1~3]。固体激光介质的吸收半峰全宽在纳米量级,而半导体激光器工作波长随温度变化率约为 0.3 nm/°C,所以需要精确的温控系统。激光二极管的温控系统的主要压力在制冷部分,为了减小制冷器的压力甚至达到无制冷系统的效果,有效减小激光二极管抽运固体激光器(DPL)的体积和重量,需要适合高温工作的激光二极管抽运源^[4,5]。

针对大功率高温工作,美国相干公司研制了一种无铝激光器,热沉温度 75 °C,峰值功率 55 W,经 10^9 次 400 μ s 脉冲后其功率衰减小于 9%。SDL 公司的单管产品在 94 °C 的工作温度连续输出 2.9 W 的光功率,寿命大于 3000 h^[6,7]。

本文设计制作了适合高温工作的 808 nm 激光二极管,并对器件性能进行了测试。

2 原理分析

工作温度主要影响激光二极管三个方面的性

收稿日期: 2009-12-25; 收到修改稿日期: 2010-01-28

作者简介: 陈宏泰(1976—),男,高级工程师,主要从事半导体激光器研制和金属有机化学气相沉积(MOCVD)外延工艺等方面的研究。E-mail: cht1129@163.com

能: 激光波长、电光效率、器件寿命。

2.1 激光波长

描述波长随温度变化的物理量是波长的温度漂移系数 $d\lambda/dT$, 文献和这里的测试结果表明, 808~976 nm 波段法布里-珀罗(F-P)腔激光器的 $d\lambda/dT$ 为 0.26~0.33 nm/°C^[8]。LD 激光波长的温度依赖性是由量子阱材料特性和 F-P 腔决定的, 是器件的固有特性。器件工作温度从 25 °C 升高到 55 °C 将导致波长变长约 9 nm, 而固体激光介质的吸收半峰全宽只有几纳米, 因此, 抽运效率急速下降。

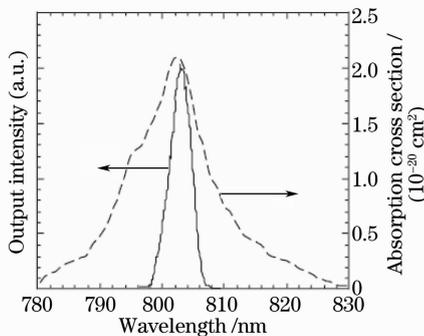


图1 钕玻璃激光器介质吸收谱与半导体激光器发射谱
Fig. 1 Absorption spectrum of Nd glass laser medium and output spectrum of semiconductor laser

针对波长漂移问题, 有两种解决方案:

1) 采用内光栅结构, 利用光栅选模锁定激光波长, 减小温度漂移系数。其基本原理在通信用分布反馈激光二极管(DFB-LD)、分布布拉格反射器激光二极管(DBR-LD)中已经有全面的研究和验证, 美国 QPC 公司已推出带内光栅结构的大功率半导体激光器器件, $d\lambda/dT$ 约为 0.07 nm/°C, 基本解决了波长漂移问题, 实现了宽温区工作。但是, 该方案工艺难度大、成本高、成品率低。

2) 波长补偿。根据波长漂移系数设计器件激光波长, 使得工作温度下的波长满足器件指标。这里采用该方式解决波长漂移问题。

2.2 电光效率

外量子效率和阈值电流都跟温度有关。描述阈值电流密度(J_{th})和外量子效率(η_d)随温度变化的物理量为 T_0 和 T_1 。根据实验测定, J_{th} 和 η_d 随 T 的变化满足指数关系

$$J_{th}(T + \Delta T) = J_{th}(T) \exp(\Delta T/T_0), \quad (1)$$

$$\eta_d(T + \Delta T) = \eta_d(T) \exp(-\Delta T/T_1), \quad (2)$$

式中 T_0, T_1 是表征半导体激光器温度稳定性的重要参数, 通称特征温度^[8,9]。

阈值电流密度、外量子效率随温度变化的结果

导致最大电光效率随温度升高而减小。单 bar 的最大功率转换效率随温度的变化如图 2 所示。

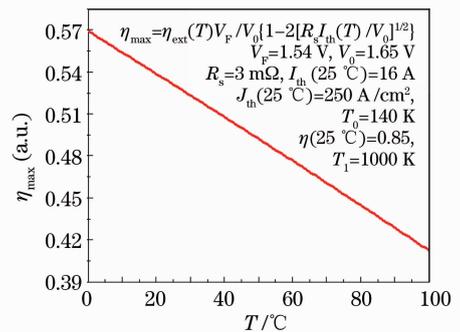


图2 最大功率转换效率随温度的变化

Fig. 2 Maximal power conversion efficiency as a function of operating temperature

由图 2 可以看出, 电光效率随温度的升高而降低。所以, 提高高温下激光器的功率转换效率有效方法是提高特征温度。对 GaAs 基激光器, 影响特征温度的主要原因是结内热逃逸电流和非辐射复合电流。减小漏电流的途径有:

- 1) 降低载流子密度: 增大光场限制因子、采用长腔长结构等方式减小阈值电流密度;
- 2) 增加载流子限制: 采用应变补偿量子阱结构、优化光波导结构。

2.3 器件寿命

半导体的失效变化过程与温度有密切关系, 高温工作对激光器的可靠性是严峻的考验。根据 Arrhenius 经验公式和文献报道结果, 工作结温升高 30 °C, 寿命减小 1 个数量级。因此提高器件在高温沉温度下的寿命的方法主要有两个方面, 即降低工作区实际温度和减小主要退化模式的退化。

决定器件长期寿命的主要因素是材料的腔面退化。腔面退化的主要原因是腔面处存在两个正反馈循环:

- 1) 腔面漏电流在非辐射复合中心处复合, 导致腔面温升, 而腔面温度的升高导致更多的非辐射复合中心和漏电流, 最后导致腔面的烧毁;
- 2) 光子在腔面的吸收导致腔面温升, 温升导致禁带收缩, 导致光吸收加剧, 最后导致腔面烧毁。

针对上述原因, 采用无铝材料, 减小腔面退化速率。

减低工作区温度的有效方法是优化散热结构。传统的准连续阵列散热结构采用单 bar 烧结, 然后进行老化筛选, 最后采用胶粘接在绝缘片上的方案。该方案在激光器芯片成品率不高时是必要的, 当工

作占空比低产热少时也是可行的。但是,当占空比高,散热成为必须考虑的内容时,该方案会热阻太大,结温过高。该方案的主要热阻在导电胶和绝缘片上,0.2%占空比将导致大于 11 °C 的温升,2%的占空比下将导致结温升超过 110 °C,是不能忍受的^[10]。

这里开发了一体化烧焊技术。首先采用高温焊料将多个 Bar 与载体的一次烧结,保证堆叠的平整

度;然后再采用低温焊料将载体芯片和绝缘片、管壳一体化烧结,减小组件的整体热阻。热模拟结果显示,该结构的整体温升小于 15 °C,如图 3 所示。

3 实验及结果

设计生长的无铝激光器材料,其基本材料结构如表 1 所示。

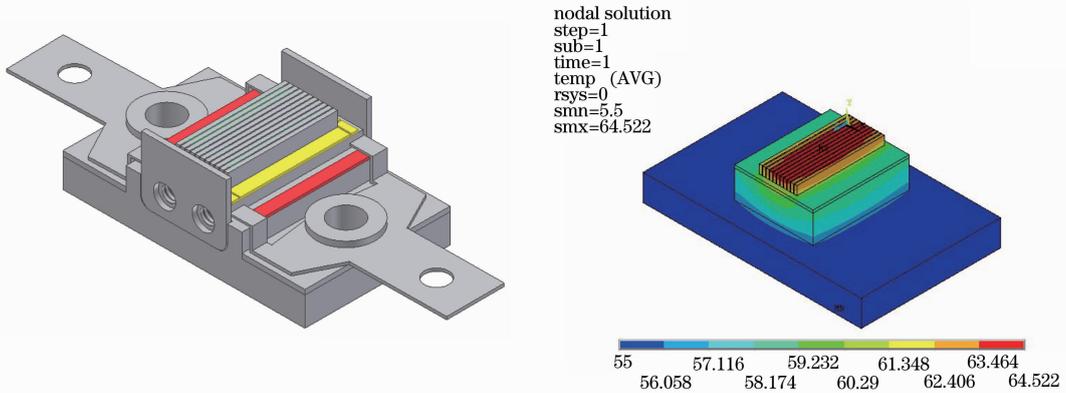


图 3 一体化烧焊准连续组装结构和热模拟(200 μs ,100 Hz)

Fig.3 Schematic quasi-continuous wave laser array structure assembled with the integrative soldering technology and thermal simulation results (200 μs , 100 Hz) of the laser array

表 1 808 nm 外延材料各层组分及厚度

Table 1 Composition and thickness of 808 nm epitaxial layers

	Material	x	Thickness / μm	Doping /(10^{18} cm^{-3})
Cap	GaAs		0.15	20
Spacer	Ga_xInP	0.515	0.05	
P-cladding	$(\text{Al}_x\text{Ga})\text{InP}$	0.3	1	1
WG	Ga_xInP	0.515	0.4	
QW	InGaAsP		0.01	
WG	Ga_xInP	0.515	0.4	
N-cladding	$(\text{Al}_x\text{Ga})\text{InP}$	0.3	1.1	-1
Spacer	Ga_xInP	0.515	0.05	-1
Buffer	GaAs		0.2	-1

外延工艺采用低压有机金属化学气相沉积法(LP-MOCVD)外延系统。采用 TMGa, TMIn, TMAI 作为 III 族源, AsH₃, PH₃ 作为 V 族源, SiH₄, TMZn 作为掺杂源。反应室压力为 10 kPa, P⁺层生长温度为 600 °C,其余为 700 °C。

外延材料经过光刻、腐蚀、金属化、解理和腔面镀高反射/减反射膜等激光器芯片制作工艺,制作成标准厘米准连续波(QCW)bar 条,单元发光区 90 μm ,周期 130 μm ,腔长 1000 μm 。将 bar 条烧结在 Cu 载体上,进行了不同温度下的 P-I 特性、光场分布等测试分析。准连续工作条件为 200 μs ,

100 Hz。热沉温度为 70 °C 时,80 A 输出大于 65 W。20 °C~70 °C 范围内,材料的特征温度 T_0 达到 145 K,如图 4 所示,其中 A 为数值拟合常量。

采用基于一次烧结成型技术的一体化烧焊技术,制作了准连续 10 叠层阵列。热沉温度为 55 °C,200 μs ,100 Hz 准连续工作条件下,100 A 下输出光功率 985 W,激射波长为 808 nm,电光效率达到 53%,如图 5 所示。寿命实验表明,峰值功率 600 W,热沉温度 55 °C,2%占空比下,经 10⁹ 次 200 μs 脉冲后其功率衰减约为 10%。

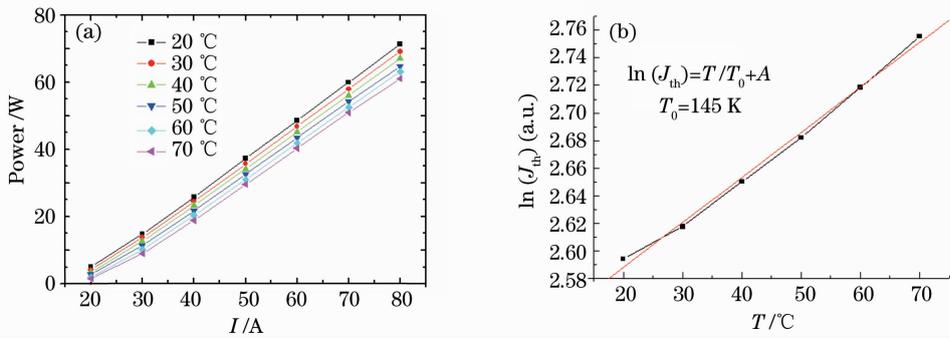


图4 标准厘米 bar 条在不同温度下的 $P-I$ 特性及 T_0 值

Fig. 4 Comparison between $P-I$ characteristics of the standard centimeter bars at different operating temperatures and T_0

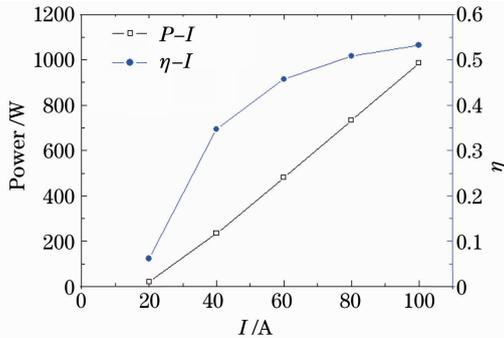


图5 10 叠层阵列在 55 °C 工作温度下的 $P-I$ 特性及
电光转换效率

Fig. 5 $P-I$ characteristics and electro-optical conversion efficiency of the 10 bars stacked arrays at operating temperature of 55 °C

4 结 论

外延生长了热沉温度 55 °C 下, 波长 808 nm 的无铝材料。制作了标准的 1 cm 准连续工作 bar 条, 该芯片的特征温度达 14 °C/K。采用该芯片制作了 10 叠层阵列, 55 °C 工作温度下输出功率 985 W。

参 考 文 献

- Li Lina. The development and application of all-solid-state laser [J]. *Advanced Materials Industry*, 2008, (4): 18~20
李丽娜. 全固态激光器的研发与应用概况[J]. *新材料产业*, 2008, (4): 18~20
- Wang Jun, Bai Yiming, Chong Feng *et al.*. High power laser diode array with 60% electro-optical efficiency [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1323~1327

- 王俊, 白一鸣, 崇 锋 等. 60% 电光效率高功率激光二极管阵列[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1323~1327
- Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd: YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 35~38
姚震宇, 蒋建锋, 涂 波 等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd: YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 35~38
- Jin Yujian, Wang Pengfei, Li Jiuxi *et al.*. Hot management research for diode-pumped solid-state-laser [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(3): 187~189
金煜坚, 王鹏飞, 李久喜 等. 二极管泵浦固体激光器的热管理研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(3): 187~189
- Li Mingshan, Zhang Wenping, Wang Shiyu *et al.*. Optimal thermal dissipation of LD in high power DPL under high temperature environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 221~225
李明山, 张文平, 王石语 等. 高温环境下大功率 DPL 的 LD 最佳散热效果[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2): 221~225
- Huang Zhe. High-efficiency and high-power 808 nm laser arrays and the stacked arrays applied at elevated temperature [J]. *Optics Mechanics & Electronics Information*, 2004, (11): 1~9
黄 哲. 高效率、大功率 808 nm 激光器阵列和为高温运转优化的叠层阵列[J]. *光机电信息*, 2004, (11): 1~9
- P. Bourne, H. Asonen, F. Fang *et al.*. 795 nm-emitting 40 W CW high-temperature laser diode bars with Al-free active area [C]. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, IEEE*, 1998: 276~277
- Jiang Jianping. *Semiconductor Laser* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
江剑平. *半导体激光器* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- Gao Xin, Qu Yi, Bo Baoxue *et al.*. 808 nm high power semiconductor lasers with high characteristic temperature [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, **20**(6): 388~389, 392
高 欣, 曲 轶, 薄报学 等. 具有高特征温度的 808 nm 大功率半导体激光器[J]. *半导体光电*, 1999, **20**(6): 388~389, 392
- T. Kawashima, T. Kanzaki, M. Matsui *et al.*. Quasi-CW 110 kW AlGaAs laser diode array module for inertial fusion energy laser driver [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(12): 6852~6858