

文章编号: 0253-2239(2010)05-1390-06

# 808 nm 边发射二极管激光器特征温度

梁雪梅<sup>1,2</sup> 秦 莉<sup>1</sup> 王 焯<sup>1,2</sup> 杨 晔<sup>1,2</sup> 李再金<sup>1</sup> 王 超<sup>1</sup> 宁永强<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要** 研究了波导层材料为  $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  时的 3 种不同厚度(0.4, 0.5 和 0.6  $\mu\text{m}$ ) 和 3 种不同的 AlGaAs 基大光学腔( $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ -1  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ -1.5  $\mu\text{m}$  和  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -2  $\mu\text{m}$ ) 的 808 nm 边发射二极管激光器的输出特性。理论计算模拟了不同结构器件的功率-电流特性( $P$ - $I$ ) 曲线, 采用线性拟合的方法计算阈值电流, 并计算了器件的特征温度。实验结果验证了理论计算结果。波导层厚度变化的研究说明, 当单量子阱的厚度不变时, 波导层越厚, 器件的特征温度越高, 器件的性能也就越好。大光学腔变化的研究表明, 由于 Al 的组分  $x=0.45$  时会产生有效的垂直光斑尺寸和更低的电阻, 使得 2  $\mu\text{m}$ -LOC 结构的器件性能最好。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 边发射二极管激光器; 特征温度; 量子阱结构; 功率-电流特性

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1390

## 808 nm Edge-Emitting Diode Lasers Characteristic Temperatures

Liang Xuemei<sup>1,2</sup> Qin Li<sup>1</sup> Wang Ye<sup>1,2</sup> Yang Ye<sup>1,2</sup> Li Zaijin<sup>1</sup>

Wang Chao<sup>1</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Output characteristics of laser diodes (LDs) emitting at 808 nm with 3 different thicknesses of waveguide-layer made from  $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  (0.4, 0.5 and 0.6  $\mu\text{m}$ ) and 3 different AlGaAs-based large optical cavities (LOC) ( $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ -1  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ -1.5  $\mu\text{m}$  and  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ -2  $\mu\text{m}$ ) were studied.  $P$ - $I$  curves of these different structures were simulated, threshold currents were computed by the means of linear fitting, and characteristic temperatures of these devices was calculated. The experimental results authenticated the theoretical calculation results. The research of different waveguide-layer thickness showed that when thickness of single quantum well was fixed, the thicker the waveguide layer was, the higher the characteristic temperature was, and the better the device performance. The study of different large optical cavity indicated LD with 2  $\mu\text{m}$ -LOC was the best of those three as a result of an aluminum content of  $x=0.45$  yielding an effective vertical spot size of 1.0  $\mu\text{m}$  and a lower electrical resistance.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; edge-emitting diode lasers; characteristic temperature; quantum well structure;  $P$ - $I$  characteristic

## 1 引 言

808 nm 光谱范围的高功率二极管激光器常是诸

如 Nd:YAG 和掺铒、掺镱光纤放大器和激光器以及许多其他掺杂稀土元素化合物晶体的重要光学抽运

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60676034, 60706007)、中国科学院知识创新工程领域前沿和吉林省科技发展计划项目(20080335, 20086011)资助课题。

作者简介: 梁雪梅(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事半导体激光器件的设计与实验方面的研究。

E-mail: liangxuemei1026@hotmail.com

导师简介: 王立军(1946—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn(通信联系人)

源。这些系统常被用于把二极管激光器的多模输出信号转换为高质量的单模输出, 变换波长, 并能够产生高能量的脉冲列。此外, 半导体激光也可以应用于印刷、打标、硬钎焊、金属切割、热处理和照明<sup>[1~9]</sup>。在工业, 军事和医学领域的广泛应用, 就需要更高的功率转换效率, 高的输出功率, 好的可靠性。因此, 人们一直致力于提高效率 and 输出功率, 连续和准连续的器件, 通过优化量子阱区域的结构, 达到阈值降低, 外部微分效率增强和调节特征温度的目的。

激光器的输出特性, 尤其是工作温度虽然决定于工作电流的大小和热沉温度的高低, 但是也受特征温度的影响与制约。相关的物理机制包括对温度的依赖性, 载流子的密度等。阈值电流的温度敏感性是随着温度的升高而增加。

本文以宽度 150  $\mu\text{m}$  的边发射二极管激光器为例, 研究了量子阱结构变化对器件特征温度的影响。

## 2 理论模型

### 2.1 器件结构

808 nm 边发射二极管激光器外延片采用低压金属氧化物化学气相沉积法(LP-MOCVD)在 GaAs 衬底的(100)方向生长而成。808 nm 边发射二极管激光器的典型结构如图 1 所示。有源区是由一个厚度为 17 nm 张应变的 GaAsP 单量子阱夹在 AlGaAs 波导层中所组成的。波导层夹在 Al<sub>0.70</sub>Ga<sub>0.3</sub>As 包层中间。文中发光条的宽度均为 150  $\mu\text{m}$ ,

台面宽度为 500  $\mu\text{m}$ 。量子阱的厚度是在考虑到较低的阈值电流密度和较小的温度敏感度而仔细优化的<sup>[10]</sup>。

### 2.2 理论计算

半导体激光器中的光行为由波动方程和光子速率方程描述。TE 模的波动方程为

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \epsilon(x, y)k_0^2 - \beta^2 \right] \cdot E(x, y) = 0, \quad (1)$$

式  $\epsilon(x, y)$  为介电常数,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为激光波长),  $\beta$  为模式传播常数,  $E(x, y)$  为光场。

在平衡条件下, 电子和光子随时间变化的耦合速率方程可以简化为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed_a} - \frac{N}{\tau_r} - R_{st}S, \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = R_{st}S + \frac{N}{\tau_r} - \frac{S}{\tau_p}, \quad (3)$$

式中  $d_a$  是有源区厚度,  $S$  是单个模内光子密度,  $R_{st}$  为受激发射速率,  $N$  是电子浓度,  $\tau_r$  是电子的自发发射复合寿命,  $\tau_p$  是光子寿命<sup>[11]</sup>。

为了描述整个激光器的行为, 模式输出功率是一个重要的参数:

$$P = \frac{1}{2} \frac{c^2}{\bar{n}\lambda} h \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \cdot \sum N_p, \quad (4)$$

式中  $\bar{n}$  为有源区材料折射率,  $L$  为激光器腔长,  $R_1$  和  $R_2$  为前后腔面反射率,  $N_p$  为第  $p$  个模式在腔内的光子数。

半导体激光器阈值电流和外微分量子效率随温度呈指数关系变化<sup>[12]</sup>:

$$I_{th,a2} = I_{th,a1} \exp\left(\frac{T_{a2} - T_{a1}}{T_0}\right), \quad (5)$$

$$\eta_{d,a2} = \eta_{d,a1} \exp\left(\frac{T_{a1} - T_{a2}}{T_1}\right), \quad (6)$$

式中  $I_{th,a1}$ ,  $I_{th,a2}$ ,  $\eta_{d,a1}$ ,  $\eta_{d,a2}$  分别是  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$  温度下的阈值电流和外微分量子效率,  $T_0$ ,  $T_1$  分别为阈值电流和外微分量子效率的特征温度。考虑温度影响后输出光功率可以表示为

$$P_{out} = v_d \eta_d(T_r) \exp\left(\frac{-\Delta T}{T_1}\right) \cdot \left[ I - I_{th}(T_r) \exp\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right) \right], \quad (7)$$

电光转换效率  $\eta_c$  为

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{v_d \eta_d(T_r) \exp(-\Delta T/T_1) \{ I - I_{th}(T_r) \exp[(\Delta T)/T_0] \}}{I(v_d + IR_s)}, \quad (8)$$

式中  $v_d$  为结电压,  $I$  为工作电流,  $P_{in}$  为峰值电功率,  $R_s$  为串联电阻,  $I_{th}(T_r)$ ,  $\eta_d(T_r)$  分别是器件在  $T_r$  热沉温度下工作时的阈值电流和外微分量子效率,  $\Delta T$  为有源区温升。

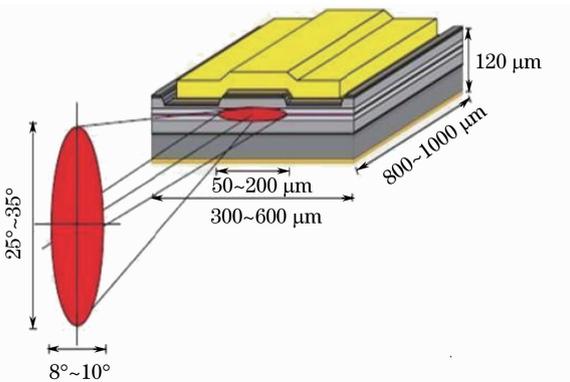


图 1 808 nm 边发射二极管激光器典型结构

Fig. 1 Typical structure of 808 nm edge-emitting diode laser

基于上述方程,利用有限元方法搭建了边发射二极管激光器温度特性的计算模块。通过建立材料库,对中心波长、阈值范围、光功率密度、计算精度和扫描步长等参量的设置,计算了器件的  $P-I$  输出特性。

### 2.3 理论计算结果

为了研究波导层厚度的变化对 808 nm 边发射二极管激光器特征温度的影响,理论计算模拟了当波导层材料为  $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  时的 3 种不同厚度,结构简表如表 1 所示。波导层厚度的变化对输出特性影响如图 2 所示。随着波导层厚度从 0.4  $\mu\text{m}$  和 0.5  $\mu\text{m}$  增加到 0.6  $\mu\text{m}$ , 阈值电流也是逐渐增加的,但功率转换效率几乎一样。温度不论是 200 K 或者

250 K 时,总体的变化趋势基本没有改变。

表 1 单量子阱不同波导层厚度结构简图

Table 1 Structural sketch of single quantum well structures with different waveguide layer thicknesses

$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	Cladding layer	1200 nm
$\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$	Waveguide layer	Change from 400, 500 to 600 $\mu\text{m}$
GaAsP	SQW	17 nm
$\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$	Waveguide layer	Change from 400, 500 to 600 $\mu\text{m}$
$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	Cladding layer	1200 nm

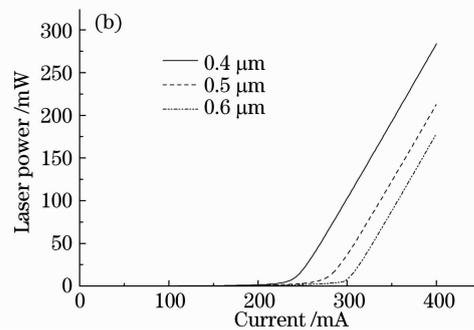
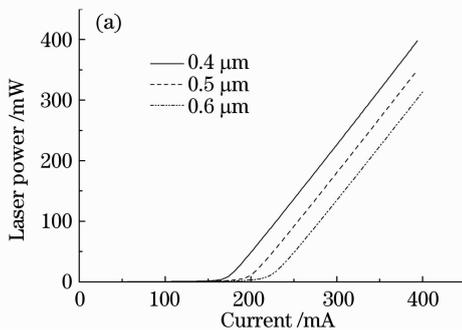


图 2 波导层厚度的变化对输出特性的影响

Fig. 2 Output characteristics with different waveguide layer thicknesses

特征温度  $T_0$  是由在不同温度  $T_1$  和  $T_2$  条件下所得到的阈值电流  $I_1$  和  $I_2$  确定的:

$$T_0 = (T_2 - T_1) / [\ln(I_2) - \ln(I_1)], \quad (9)$$

$T_1 = 200 \text{ K}$ ,  $T_2 = 250 \text{ K}$ , 如图 2 所示,  $P-I$  特性曲线线性不是很好,对于这种线性不是很好的曲线,有四种方法可用来计算激光器阈值电流:1)线性拟合;2)两段拟合;3) $P-I$  特性曲线一阶微分;4) $P-I$  特性曲线二阶微分。根据四种方法测得的阈值电流,都与实际值存在差异,但差异都不大(不超过 2%)<sup>[13]</sup>,考虑到方法的易行性,采用了线性拟合的方法计算阈值电流。即在线性较好的部分,取两个点,计算出斜率,画出直线,该直线与横轴交点即为阈值电流,不同波导层厚度情况下的特征温度可以利用(9)式计算出来(如表 2 所示)。

表 2 波导层厚度, 阈值电流  $I_1$  和  $I_2$  以及特征温度

Table 2 Waveguide layer thicknesses, threshold current  $I_1$  and  $I_2$  and characteristic temperatures

Waveguide layer thickness / $\mu\text{m}$	0.4	0.5	0.6
$I_1 / \text{mA}$	172	200	224
$I_2 / \text{mA}$	242	280	300
$T_0 / \text{K}$	146	149	171

从表 2 中可以看到,对于所研究的结构,随着波导层厚度的逐渐增加,器件的特征温度逐步增加,在相同的量子阱结构条件下,可能是因为波导层越厚,光传播的路程越长,虽然光增益会增加,但是相应的内部损耗也增大,器件的阈值电流就越大,特征温度就越高。这说明,对于单量子阱结构,当阱的厚度不变时,波导层越厚,器件的特征温度越高,器件的性能也就越好。

为了研究大光学腔(LOC)的变化对器件特征温度的影响,尝试了 3 种不同的 AlGaAs 基大光学腔。一个厚度为 17 nm 张应变的 GaAsP 单量子阱夹在由  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  制成的阶跃折射率变大(所谓的阶跃折射率变大,是指从外到内,即从包层到波导层再到单量子阱区的折射率逐渐变大的结构,即渐变折射率波导)的波导大光学腔(STBW-LOC)结构中。之所以采用 STBW-LOC 这种结构,一是因为高掺杂包层的光场重叠减少而产生低的光学损失;二是因为垂直光斑尺寸增大而使面负载减少。直接应用于材料加工的 808 nm 边发射二极管激光器,几千瓦的输出功率和小的光斑尺寸是十分必要的,

并且需要非常低的耦合损耗<sup>[14]</sup>。研究了具有宽波导层的 1  $\mu\text{m}$ -LOC(所谓的 1  $\mu\text{m}$  是指波导层  $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  的厚度,由于量子阱 GaAsP 厚度为 17 nm,相对于 1  $\mu\text{m}$  而言非常小,所以称为 1  $\mu\text{m}$  大光学腔

表 3 LOC 结构的材料、厚度、组分及其折射率

Table 3 Materials, thicknesses, compositions and refractive index of the used LOC structures

		1 $\mu\text{m}$ -LOC	1.5 $\mu\text{m}$ -LOC	2 $\mu\text{m}$ -LOC
LOC structure	$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ cladding	1200 nm, $n=3.27$	1000 nm	800 nm
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ waveguide	500 nm, $x=0.65, n=3.31$	750 nm, $x=0.6, n=3.35$	1000 nm, $x=0.45, n=3.48$
	GaAsP SQW	17 nm, $n=3.72$	17 nm	17 nm
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ waveguide	500 nm, $x=0.65, n=3.31$	750 nm, $x=0.6, n=3.35$	1000 nm, $x=0.45, n=3.48$
	$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ cladding	1400 nm, $n=3.27$	950 nm	500 nm

LOC 结构的变化对输出特性影响如图 3 所示。随着 LOC 结构从 1  $\mu\text{m}$ -LOC, 1.5  $\mu\text{m}$ -LOC 增加到 2  $\mu\text{m}$ -LOC, 阈值电流也是逐渐增加的, 但功率转换效率几乎不变。温度不论是 200 K 或者 250 K 时, 总体的变化趋势基本没有改变。不同 LOC 结构的特征温度也通过(9)式推算出来(如表 4 所示)。发现 1.5  $\mu\text{m}$ -LOC 结构的特征温度是 3 种结构中最低

即 1  $\mu\text{m}$ -LOC), 1.5  $\mu\text{m}$ -LOC 和 2  $\mu\text{m}$ -LOC 结构(参数如表 3 所示)。所有结构的波导层均是夹在 Al 的组分  $x=0.70$  的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  包层中间。

的, 而 2  $\mu\text{m}$ -LOC 结构的特征温度是最高的。对于 2  $\mu\text{m}$ -LOC 结构, 波导层在  $x=0.30$  到  $x=0.65$  范围内是可以自由选择的, 因为在这个范围内 Al 组分的变化对光斑尺寸的影响很小<sup>[10]</sup>。选择 Al 的组分  $x=0.45$ , 因为相比于其他结构, Al 的组分  $x=0.45$  时会产生有效的垂直光斑尺寸和更低的电阻。使得 2  $\mu\text{m}$ -LOC 结构的器件性能最好。

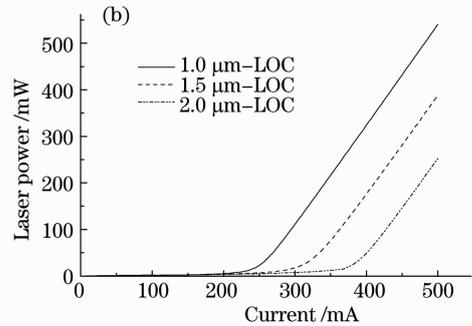
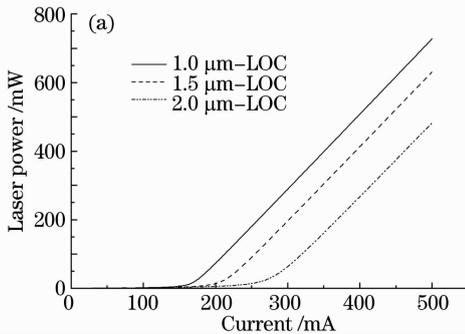


图 3 LOC 结构的变化对输出特性的影响

Fig. 3 Output characteristics with different large optical cavity LOC

表 4 LOC, 阈值电流  $I_1$  和  $I_2$  以及特征温度

Table 4 LOC, threshold current  $I_1$  and  $I_2$  and characteristic temperatures

LOC / $\mu\text{m}$	1	1.5	2
$I_1$ / mA	166	209	275
$I_2$ / mA	250	318	381
$T_0$ / K	122	119	153

### 3 实验结果与讨论

实验中, 采用的边发射二极管激光器变温测试原理, 如图 4 所示。

温控装置由人工智能工业调节器 AI 708P、加热片、铜热沉片、支架、220 V 电源、散热片、风扇以及热电偶 WRNK-112 组成。其中 AI 708P 的温度分辨率可达 0.5  $^{\circ}\text{C}$ , 它的核心部件为固态继电器。

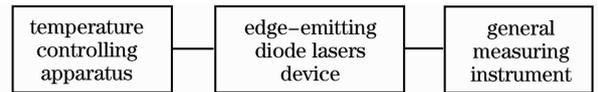


图 4 变温测试原理图

Fig. 4 Schematic diagram of temperature-change testing

铜热沉片通过加热片来加热升温, 加热片的面积为 40 mm  $\times$  40 mm, 它的工作电压为交流 220V, 热电偶的测量范围为 0~1200  $^{\circ}\text{C}$ , 分度号为 K, 它用来探测铜的温度, 然后把探测信号传给 AI 708P, AI708P 通过固态继电器对电路进行快速的通断, 达到控制温度的目的。铜热沉的散热是通过散热片和风扇进行的。

把边发射二极管激光器装在铜热沉上, 由于铜具有良好的热导率, 所以铜热沉的温度近似为边发射二极管激光器的工作温度。用综合参数测试仪对

边发射二极管激光器进行测试。

采用脉冲电流注入方式(脉冲宽度为 50  $\mu\text{s}$ , 占空比为 5:1000)对宽度为 150  $\mu\text{m}$  的边发射二极管激光器进行了变温测试。采用窄脉冲电流注入的目的是要减少注入电流发热对器件温度设定的准确性的影响。

根据理论计算模拟的结果,生长了 808 nm 边发射二极管激光器波导层厚度分别为 0.4, 0.5 和

0.6  $\mu\text{m}$  的 GaAsP 单量子阱结构,以及 1  $\mu\text{m}$ -LOC, 1.5  $\mu\text{m}$ -LOC 和 2  $\mu\text{m}$ -LOC 这 3 种结构的外延片,经过减薄、光刻和腐蚀等一系列工艺步骤加工为管芯,通过封装键合,在封闭条件下,温度控制在 170  $^{\circ}\text{C}$  左右,通入保护气,防止氧化,利用蒸镀钢焊料把管芯焊接到大小为 8 mm $\times$ 8 mm 厚 5 mm 的铜热沉上成为器件。因为工艺步骤繁多复杂,测试的结果难免会与理论计算模拟的结果产生误差,如图 5 所示。

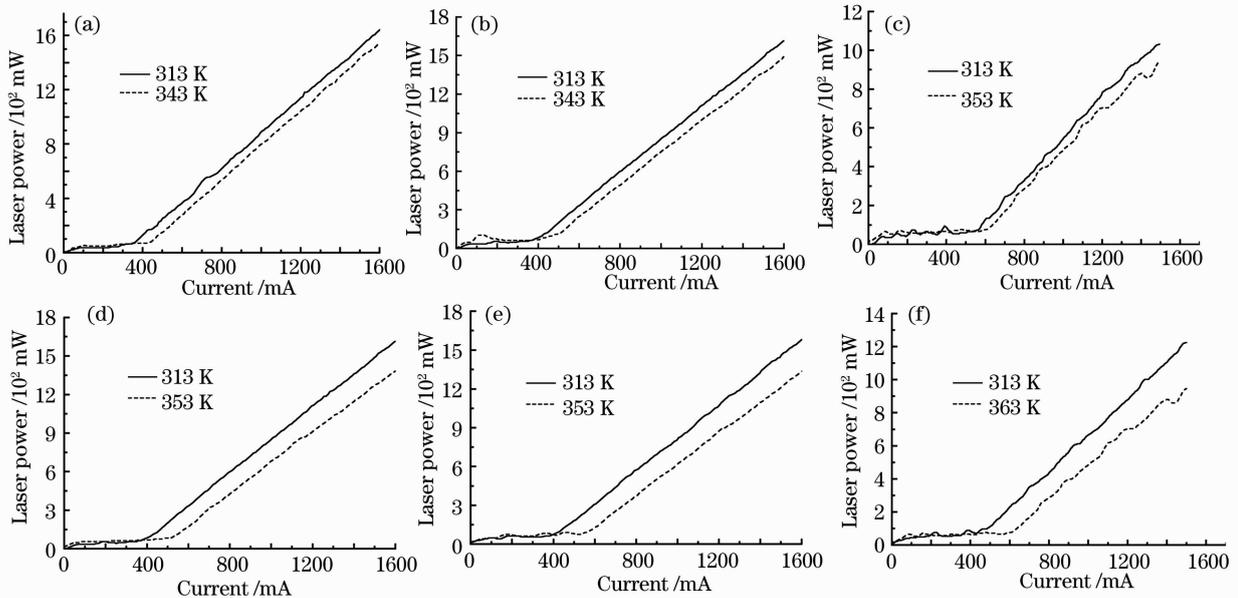


图 5 各种结构的  $P$ - $I$  特性曲线。(a) 0.4  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.6  $\mu\text{m}$ ; (c) 0.6  $\mu\text{m}$  厚的波导层; (d) 1  $\mu\text{m}$ ;  
(e) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.0  $\mu\text{m}$  LOC 结构

Fig. 5  $P$ - $I$  characteristics curve of different structures, (a) 0.4  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.6  $\mu\text{m}$ ; (c) 0.6  $\mu\text{m}$  waveguide; (d) 1  $\mu\text{m}$ ;  
(e) 1.5  $\mu\text{m}$ ; (f) 2.0  $\mu\text{m}$  LOC structure

从图 5(A) 中可以看到,  $I_1 = 312$  mA,  $I_2 = 381$  mA, 而  $T_1 = 313$  K,  $T_2 = 343$  K, 根据(9)式计算得到波导层厚度为 0.4  $\mu\text{m}$  的 GaAsP 单量子阱结构的 808 nm 边发射二极管激光器特征温度为 150 K。同样的, 根据(9)式可计算出如图 5(b) 和图 5(c) 所示的波导层厚度为 0.5  $\mu\text{m}$  和 0.6  $\mu\text{m}$  结构的特征温度分别为 157 K 和 200 K; 如图 5(d), (e), (f) 所示的 1  $\mu\text{m}$ -LOC, 1.5  $\mu\text{m}$ -LOC 和 2  $\mu\text{m}$ -LOC 这 3 种结构的特征温度分别为 146 K, 126 K 和 140 K。虽然实验测试的器件特征温度与理论计算模拟的结果相差 10% 左右, 但考虑到器件制备过程中存在的误差, 特征温度的实验结果可以说是较好的验证了理论计算值。

## 4 结 论

理论计算模拟了不同波导层厚度(0.4, 0.5 与 0.6  $\mu\text{m}$ )的和不同大光学腔(1, 1.5 与 2  $\mu\text{m}$ )结构时器件的功率-电流特性( $P$ - $I$ )曲线, 计算了器件的特

征温度。并通过实验验证了理论计算结果。通过对量子阱结构改变对 808 nm 边发射二极管激光器特征温度的影响的研究, 可以看到温度变化是影响 808 nm 边发射二极管激光器性能的一个重要因素。因此, 在设计和制作器件时, 增大特征温度才能进一步提高 808 nm 边发射二极管激光器的性能。

## 参 考 文 献

- 1 R. Williamson, Manoj Kanskar. Improving the efficiency of high-power diode lasers. Compound Semiconductor, compoundsemiconductor.net
- 2 Deng Xinli, Liu Yun, Yin Honghe *et al.*. Theoretical analysis and experiment of "smile" correction for diode laser bar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 505~508  
邓鑫李, 刘云, 尹红贺等. 半导体激光线阵弯曲矫正方法的理论分析与实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 505~508
- 3 Zhong Li, Wang Jun, Feng Xiaoming *et al.*. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1037~1042  
仲莉, 王俊, 冯小明等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1037~1042
- 4 Tan Zuojun, Chen Haiqing, Kang Jingran *et al.*. Design of

- MEMS deformable micro-mirror for compensating thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 853~858  
谭佐军, 陈海清, 康竟然等. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的 MEMS 微变形镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 853~858
- 5 Zhigang Liu, Gaozhan Fang, Kecheng Feng. High packing density laser diode stack arrays using Al-free active region laser bars with a broad waveguide and discrete copper microchannel-cooled heatsinks[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 214~216
- 6 Xu Liujing, Zhao Hong, Zhang Dayong *et al.*. Narrow pumping width technology in miniature high-repetition diode-pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 21~24  
徐饕婧, 赵 鸿, 张大勇等. 微型高重复频率激光二极管抽运固体激光器的窄脉宽抽运技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 21~24
- 7 Wang Cuiluan, Han Lin, Wu Peng *et al.*. Study of the beam shaping of laser diode arrays using two parallel plane mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1097~1100  
王翠鸾, 韩 淋, 吴 芄等. 双平行平面反射镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1097~1100
- 8 Chunting Wu, Youlun Ju, Yufeng Li *et al.*. Diode-end-pumped composite Tm:YAG rod with undoped ends at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 594~596
- 9 S. M. Thahab, H. Abu Hassan, Z. Hassan. InGaN/GaN laser diode characterization and quantum well number effect[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 226~230
- 10 H. Wenzel, G. Erbert, F. Bugge *et al.*. Optimization of GaAsP-QW's for high power diode lasers at 800 nm[C]. *SPIE*, 2000, **3947**: 32~39
- 11 Jiang Jianping. *Semiconductor Laser* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 109~110  
江剑平. *半导体激光器* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 109~110
- 12 Roland Diehl. *High Power Diode Lasers* [M]. Heidelberg: Springer, 2000. 200~201
- 13 Calculation method discrepancy of threshold current. Technical document of ILX Lightwave Corporation
- 14 H. G. Treusch, J. Harrison, B. Morris *et al.*. Compact high brightness and high power diode laser source for material processing[C]. *SPIE*, 2000, **3945**: 23~31