

文章编号: 0258-7025(2009)01-0104-06

# 带非吸收窗口的大功率 657 nm 半导体激光器

林 涛<sup>1</sup> 段玉鹏<sup>2</sup> 郑 凯<sup>3</sup> 崇 峰<sup>3</sup> 马晓宇<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 西安理工大学电子工程系, 陕西 西安 710048  
<sup>2</sup> 西北大学物理系, 陕西 西安 710069; <sup>3</sup> 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要** 在激光器腔面处制作非吸收窗口(NAW)可以有效地减少光吸收,防止激光器过早出现光学灾变损伤(COD),是提高大功率半导体激光器的功率特性的重要手段之一。采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术二次外延生长了大功率657 nm红光半导体激光器结构,通过闭管扩散 Zn 的方法在腔面附近制作了非吸收窗口。实验发现扩散温度550 ℃,扩散时间20 min时,得到的非吸收窗口最为有效,激光器连续工作的无扭折输出功率大于100 mW,超过常规的无窗口结构激光器的最大输出功率的两倍,激光器的斜率效率提高了23%。测量该类器件的温度特性发现,环境温度为20~70 ℃时,其输出功率均可大于50 mW,计算得到激光器的特征温度约为89 K,波长增加率约为0.24 nm/℃。

**关键词** 激光器;半导体激光器;光学灾变损伤;非吸收窗口;量子阱混杂;AlGaInP

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0104

## High Power 657 nm Laser Diodes with Nonabsorbing Windows

Lin Tao<sup>1</sup> Duan Yupeng<sup>2</sup> Zheng Kai<sup>3</sup> Chong Feng<sup>3</sup> Ma Xiaoyu<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China  
<sup>2</sup> Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China  
<sup>3</sup> Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** To fabricate nonabsorbing windows (NAWs) near the cavity facets can reduce the light absorption and prevent early catastrophic optical damage (COD) of the cavity facets, which is an important skill in improving the output characteristics of the high power laser diode (LD). High power 657 nm red LD wafer was epitaxied by a two-step metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) technique, and NAWs were fabricated by Zn impurity diffusion using a closed ampoule method. NAWs fabricated at a diffusion temperature of 550 ℃ and a diffusion time of 20 min are very effective in improving the LD's performance. Stable fundamental mode continuous wave operation is achieved at up to 100 mW without any kinks, which is three times of the maximum output power of conventional LD without the NAWs. The slope efficiency of the LD is also improved about 23% than that of the conventional LD. At ambient temperature of 20~70 ℃, the maximum outputs of the LDs are all over 50 mW, and the calculated characteristic temperature and the lasing wavelength increment are about 89 K and 0.24 nm/℃, respectively.

**Key words** lasers; laser diode; catastrophic optical damage; nonabsorbing window; quantum well intermixing; AlGaInP

## 1 引 言

AlGaInP 材料系红光半导体激光器具有体积小、重量轻、能耗少等其他类型激光器不可比拟的优点,目前已广泛应用在激光扫描、激光打印、激光显示和激光医疗、美容等领域<sup>[1]</sup>。对发光区仅数微米

宽的窄条形红光激光器,一个非常重要的应用是在光存储技术中进行信息读写,虽然相比其他大功率 AlGaInP 激光器,该类激光器对功率特性和光场特性要求更高,研制难度更大,但其广阔的应用市场使得众多科研院所和商业公司积极投资研发该类器

收稿日期:2008-04-02;收到修改稿日期:2008-06-16

基金项目:中国博士后科学基金(20070411137)资助项目。

作者简介:林 涛(1977—),男,博士,讲师,主要从事化合物半导体材料生长和光电子器件制作。

E-mail: llttlintao@163.com

件,这同时也促进其特性的快速提升<sup>[2,3]</sup>。

虽然早在 20 世纪 70 年代,人们就开始研究 AlGaInP 系半导体材料<sup>[4]</sup>,但在当时由于生长技术的限制,Al 原子的掺入,In 组分的相分离现象以及 AlGaInP 材料的高浓度 P 型掺杂<sup>[5]</sup>等问题一时难以解决,致使人们很长时间得不到适合半导体激光器的高质量  $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$  外延材料。金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术、分子束外延 (MBE) 技术以及相关产业的迅速发展,使得 GaInP, AlGaInP 材料品质得到很大提高,1987 年 M. Ikeda 等<sup>[6]</sup>采用 MOCVD 技术制作出 AlGaInP 多量子阱激光器,首次实现室温下连续激射。此后国外的多家公司纷纷推出自己的产品,Mitsubishi 公司报道的器件的最大输出功率可达 290 mW (腔长 1100  $\mu\text{m}$ , 激射波长 660 nm), 在环境温度 75  $^\circ\text{C}$ , 占空比 50%, 输出功率 140 mW 的条件下可连续工作 1000 h<sup>[7]</sup>; Samsung 报道的采用干法刻蚀制作的腔长 1500  $\mu\text{m}$  激光器, 环境温度 70  $^\circ\text{C}$ , 占空比 30% 时, 无扭折 (kink) 输出功率超过 200 mW<sup>[2]</sup>。国内相关的研究稍有滞后, 相比国外产品, 国内研发的器件的阈值电流、光场特性、器件寿命等指标均大体相当, 但输出功率差距较大。2004 年国内研制的红光激光器的最大无 kink 输出功率可达 45 mW<sup>[3]</sup>, 2005 年最大输出功率可达 184 mW, 但器件的无 kink 输出功率为 80 mW<sup>[8]</sup>。

对于 AlGaInP 材料的红光波段半导体激光器, 其激射波长更短, 光子能量比 AlGaAs 系更大, 器件的腔面光学灾变损伤 (COD) 现象就更为严重, 因此提高器件的 COD 功率也就成为当前的研究重点<sup>[9]</sup>。对多数大功率激光器而言, 高光功率密度工作时产生的腔面 COD 现象使得器件最大功率受到限制。引起腔面 COD 的主要因素有两个: 一是在应变量子阱激光器端面处, 由内部的双轴压应变变为单轴压应变, 产生应变部分释放, 这样导致端面处的带隙减小, 增加了光的吸收; 另一方面半导体激光器腔面处存在表面态和界面态, 这些都是非辐射复合中心, 它们的存在同样会导致光吸收, 增加腔面处的温升, 当热量的积累促使腔面温度升高到有源区材料的熔点时, 就会突然烧坏腔面, 出现 COD 现象<sup>[10]</sup>。提高激光器的 COD 输出功率, 就需要减小腔面附近处的电流密度、光吸收和表面复合速率等因素, 这在制作工艺中主要是通过采用应变补偿量子阱有源区、大光腔结构有源区<sup>[11]</sup>、非对称波导结构<sup>[12]</sup>、在腔面处制作各种类型的非吸收窗口 (NAW)<sup>[3,8,9]</sup> 以及优

化腔面镀膜材料、结构和工艺<sup>[13]</sup> 等来提高输出功率和器件寿命。

本文主要报道采用 Zn 扩散掺杂诱导量子阱混杂的方法, 在激光器腔面附近制作 NAW 来提高窄条型有源区激光器的 COD 输出功率, 经过该工艺后, 器件的输出功率有明显提高, 连续工作的无 kink 输出功率可超过 100 mW。同时该制作工艺成熟, 器件性能稳定, 研制的红光半导体激光器可应用于数字化视频光盘 (DVD) 读写等领域。

## 2 材料生长及器件制作

实验中采用低压 MOCVD 技术生长激光器的外延片, 设备为 Aixtron AIX-200 系统。载气为  $\text{H}_2$ , III 族源为三甲基铟 (TMIn)、三甲基镓 (TMGa)、三甲基铝 (TMAl); V 族源为 100% 的磷烷 ( $\text{PH}_3$ ) 和 100% 的砷烷 ( $\text{AsH}_3$ ); P 型和 N 型掺杂剂分别为二乙基锌 (DEZn) 和体积分数为 2% 的硅烷 ( $\text{SiH}_4$ )。生长温度为 650~730  $^\circ\text{C}$ , 反应室压力约为 10000 Pa。为了有效抑制 (Al)GaInP 的有序性生长, 衬底选用向  $\langle 111 \rangle$  A 方向偏角 15 $^\circ$  的 N 型 GaAs 的 (100) 面。激光器结构采用二次外延生长而成, 第一次外延时在 GaAs 衬底上依次生长下列各层: 0.2  $\mu\text{m}$  厚的 n-GaInP 缓冲层 (Si 掺杂, 电子浓度:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ); 1.25  $\mu\text{m}$  厚的 n-( $\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 下限制层 (Si 掺杂, 电子浓度:  $1 \times (10^{17} \sim 10^{18}) \sim 2 \times (10^{17} \sim 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$ ); 40 nm 厚不掺杂的 ( $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 下波导层; 不掺杂的有源区采用双量子阱结构, 阱区为 5 nm 厚的 GaInP (压应变是  $\Delta a/a = +1\%$ ), 垒区为 4 nm 厚的 ( $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 垒; 40 nm 厚的 ( $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 上波导层; 1.25  $\mu\text{m}$  厚的 p-( $\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 限制层 (Zn 掺杂, 空穴浓度:  $1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )。一次外延生长完成后, 采用光刻和湿法腐蚀技术形成发光区条宽 3  $\mu\text{m}$  的脊型, 然后再进行二次外延生长。二次外延是在制作了脊型发光区的一次外延片上再生长 2  $\mu\text{m}$  厚的 p-GaAs 层 (Zn 掺杂原子浓度:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 和 0.15  $\mu\text{m}$  厚的 p<sup>+</sup>-GaAs 接触层 (Zn 掺杂, 空穴浓度:  $1 \times (10^{19} \sim 10^{20}) \text{ cm}^{-3}$ )。

完成激光器外延生长后, 需要制作扩 Zn 窗口进行区域性 Zn 扩散, 而该窗口以后也将同时成为激光器的解理面窗口。首先, 在二次外延的结构上用常压 CVD 的方法生长一层致密的  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  薄膜; 然后用 HF 溶液腐蚀出扩散窗口, 窗口宽度为 50  $\mu\text{m}$ , 窗口周期为 1000  $\mu\text{m}$  (这个长度也是激光器

的腔长)。采用湿法腐蚀去掉窗口处的 GaAs 层,并控制腐蚀深度,使扩散窗口处的结构和此前报道的实验片相同<sup>[14]</sup>,这样既可以直接使用以前得到的 Zn 扩散条件,也可以去掉窗口处二次外延的 GaAs 层,提高 Zn 扩散效率,更好实现有源区的量子阱混杂。图 1 为激光器材料结构和器件结构示意图。

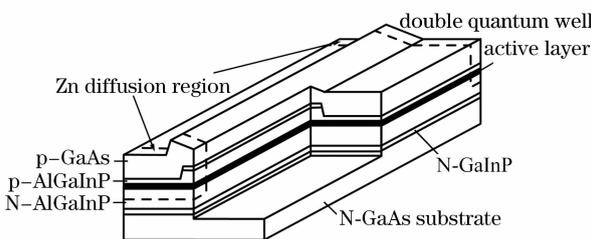


图 1 激光器材料结构和器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the LD's material and structure

Zn 杂质扩散实验中,选择的扩散源是  $Zn_3As_2$ , 扩散方式为闭管扩散。将  $Zn_3As_2$  和激光器外延片放入特制的石英管内,抽成高真空后,进行烧结密封。扩散时,样品与扩散源分别置于石英管的两端并固定两者位置,再将石英管放入扩散炉内,采用不同的扩散时间和扩散温度进行实验。扩散后的外延片直接采用常规激光器的制作工艺完成其余流程。实验中最终制作的 657 nm 激光器的有源区宽度为  $3\ \mu\text{m}$ ,腔长为  $1000\ \mu\text{m}$ ,前后腔面处各有  $25\ \mu\text{m}$  宽的非吸收窗口,同时前、后腔面镀了反射率分别为 5% 和 95% 的增透膜和高反膜。激光器管芯 p 面朝下烧结在 Si 热沉上,再进行 TO-5.6 型封装。

## 3 结果与分析

### 3.1 扩散条件对管芯特性的影响

此前的研究中发现对于和本文中激光器结构类似的外延片,在  $550\ ^\circ\text{C}$  下进行闭管扩 Zn 的扩散时间为 20~60 min 时,量子阱混杂会导致外延片的激光波长蓝移,但当扩散时间长于 60 min 时,则同时出现了蓝移和红移<sup>[14]</sup>。因此在实际的器件制作中只研究可实用化的扩散条件,所选择的扩散时间分别为 20 min, 40 min, 50 min。图 2 给出了扩 Zn 窗口处的光致发光谱(PL 谱)和 Zn 扩散宽度。图中只给出了扩散 20 min 后窗口处 PL 谱的变化,实线是扩 Zn 前,虚线是扩 Zn 后。可见 20 min 扩散诱导的量子阱混杂使得峰值波长蓝移 7 nm, 实验中测得 40 min, 50 min 扩散得到的峰值波长蓝移分别为 13 nm, 20 nm。图中插图表明,随着扩散时间增加,在 PL 谱

峰不断蓝移的同时,Zn 扩散宽度(沿着腔长方向)也不断增大,从原始  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  薄膜窗口宽度  $50\ \mu\text{m}$ , 扩展至  $90\ \mu\text{m}$  (20 min),  $120\ \mu\text{m}$  (40 min),  $130\ \mu\text{m}$  (50 min)。一方面,Zn 扩散宽度增大使得非吸收窗口区增大;另一方面,蓝移程度过大将减小阱深以及限制层和有源区的带阶差,削弱对载流子的限制<sup>[14]</sup>。前者将减小激光器的腔长,恶化器件相应特性;后者则增大电流泄漏,一会提高阈值电流密度,二是恶化器件热饱和现象。

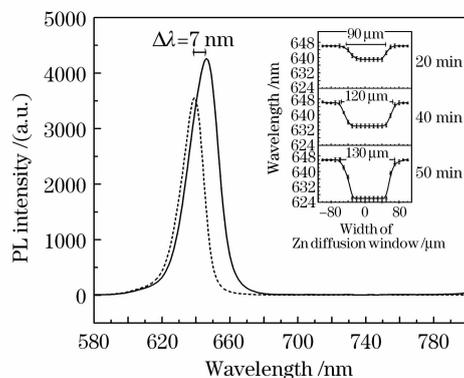


图 2 扩 Zn 窗口处的 PL 谱和 Zn 扩散宽度  
Fig. 2 PL spectra and width of the region at the Zn diffusion windows

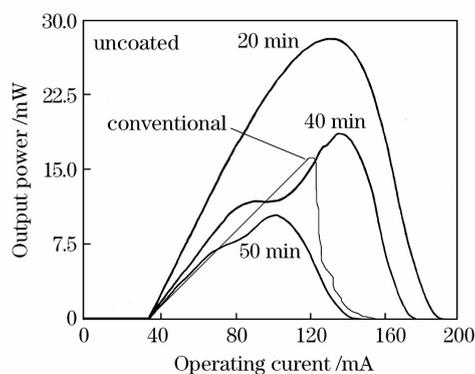


图 3 不同扩散时间下腔面不镀膜时激光器管芯的  $P-I$  特性

Fig. 3  $P-I$  characteristics of the uncoated LD chips with different diffusion time

图 3 为连续工作时,不同扩散时间下,腔面不镀膜时激光器管芯的  $P-I$  特性。从图中可以看出,扩散后形成的 NAW 对器件的阈值电流影响很小,但对器件的输出功率和斜率效率影响较大。对扩散时间为 20 min 的管芯,其最大输出功率由常规的无窗口结构激光器的 16 mW 提高到 28 mW,斜率效率也从  $0.2\ \text{W/A}$  提高到  $0.36\ \text{W/A}$ ,同时此前管芯中出现的 COD 导致的器件失效转变为激光器出现了热饱和效应。对于扩散时间为 40 min 的管芯,其  $P-I$

特性相比常规激光器并无明显提高,虽然其最大输出功率略有提高,但  $P-I$  曲线中出现了 kink,这对实际应用非常不利。对扩散 50 min 的管芯其输出功率反而低于常规激光器管芯,同时功率输出曲线也不再是平滑的直线。由于红光激光器的有源区为含 Al 材料,腔面在高功率密度和无保护情况下很容易失效,所以对不镀膜的管芯进行连续工作测试时,管芯腔面处的特征对输出特性影响较大。当在腔面处制作了合适的 NAW 后(非吸收区的禁带宽度的蓝移不能太少也不能太多),激光器腔面处的光吸收可有效减小,同时又不会牺牲激光器的有效腔长,也不会因为扩 Zn 温度过高或是时间过长而在有源区和腔面形成缺陷或是造成损伤,这会相应地提高器件的斜率效率和输出功率。由此可见 Zn 扩散条件选择合理可以有效改善激光器的功率性能,否则不但恶化激光器的性能而且将加剧激光器的退化,实验结果表明,对此种结构的激光器外延片,扩散温度 550 °C,扩散时间 20 min 可在激光器腔面处形成有效的非吸收窗口,同时该扩散条件又很好地保证了腔面处材料的完整性,没有引入其他损伤。

### 3.2 激光器的输出特性

在对扩散 20 min 的钽条(bar)和管芯分别进行了腔面镀膜和 TO-5.6 型封装后,对得到的激光器进行了连续工作条件下的光电特性测试。图 4 为 50 mW 功率输出下,激光器的  $P-I-V$  特性、光谱图和远场发散角(FFP)图。可知该器件的阈值电流为 38 mA,50 mW 输出下工作电流为 102 mA,斜率效率为 0.78 W/A。该功率输出下,激光器激光波长为 656.9 nm,波长的半峰全宽为 0.4 nm,水平发散角

和垂直发散角分别为  $\theta_{//} = 8.1^\circ$  和  $\theta_{\perp} = 29.4^\circ$ 。

对于大功率单模激光器,大电流工作时  $P-I$  曲线中经常出现 kink,它限制输出光功率,影响激光器在实际中的应用,是激光器的严重缺陷之一<sup>[7]</sup>。我们研制的带非吸收窗口的 660 nm 半导体激光器,其最大无 kink 输出功率达到 80 mW<sup>[8]</sup>。在经过 Zn 扩散条件优化后制作的激光器样品中,无 kink 输出功率超过 100 mW,而对不带 NAW 结构的器件其输出光功率达到 50 mW 左右时就发生了 COD 使得器件失效。图 5 为带非吸收窗口的激光器和常规激光器  $P-I$  特性的比较,其中  $I-V$  曲线为带非吸收窗口激光器的。

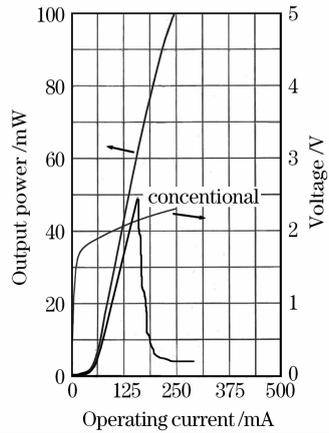


图 5 带非吸收窗口的激光器和常规激光器  $P-I$  特性比较

Fig. 5  $P-I$  characteristics comparison between the NAW LD and the conventional LD

### 3.3 激光器的温度特性

实验中对 TO-5.6 型封装后的激光器进行了连续工作条件下的温度特性测试。图 6 为 Zn 扩散 20 min 的激光器在不同温度下的  $P-I$  特性。可以看出环境温度 20~50 °C 时,器件  $P-I$  特性相对稳定,但在更高温度下激光器的  $P-I$  特性恶化较快。但即使环境温度为 70 °C,本文制作的激光器的输出功率仍超过 50mW;当温度升高到 80 °C 时,器件出现热饱和,最大输出功率约为 45 mW。根据特征温度计算公式:  $I_{th}(T + \Delta T) = I_{th}(T) \exp(\Delta T/T_0)$ ,对环境温度在 20~70 °C 范围之间时可以算出激光器的特征温度  $T_0$  约为 89 K。

图 7 给出了 Zn 扩散 20 min 的激光器的激光波长和波长半峰全宽(FWHM)随温度的变化关系。图中可知在输出功率 50 mW 的工作条件下,当环境温度在 20~70 °C 之间时,半峰全宽几乎不变,而峰值波长随温度升高基本呈线性增加,线性拟合得出

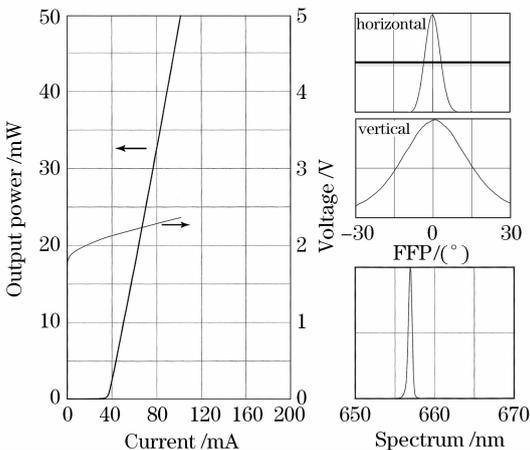


图 4 50 mW 功率输出下,激光器的  $P-I-V$  特性、光谱图和远场发散角图

Fig. 4  $P-I-V$  characteristics, lasing spectrum and far-field patterns of the LD at 50mW output

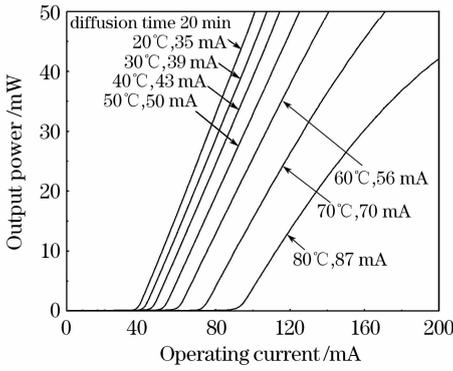


图 6 Zn 扩散 20 min 的激光器在不同温度下的  $P-I$  特性  
Fig. 6  $P-I$  characteristics at different ambient temperatures for the LD with 20 min Zn diffusion

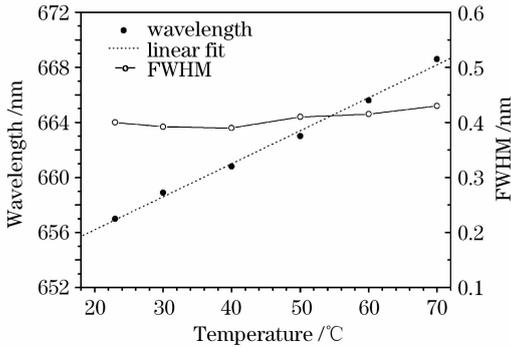


图 7 Zn 扩散 20 min 的激光器的激光波长和波长半峰全宽随温度的变化关系

Fig. 7 Temperature dependence of wavelengths and full-width at half-maximums (FWHMs) for the LD with 20 min Zn diffusion

波长增加率约为  $0.24 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由此可知对本文研制的激光器,工作温度在  $20\sim 70^\circ\text{C}$  之间时,如果知道某一温度  $T$  下的激光波长  $\lambda(T)$ ,则当温度升高  $\Delta T$  后,由于有源区材料的禁带宽度随温度的增加而变窄,使激光波长会发生红移,相应的波长  $\lambda(T + \Delta T)$  可由公式  $\lambda(T + \Delta T) = \lambda(T) + 0.24 \cdot \Delta T$  近似计算。

为了进一步比较不同扩 Zn 时间对激光器特性的影响,测量了 Zn 扩散 40 min 的激光器在不同温度下的  $P-I$  特性,如图 8 所示。图中仍然给出了不同温度对应的激光器的阈值电流。可见  $550^\circ\text{C}$ , 40 min 的扩散条件对激光器  $P-I$  特性的影响是非常严重的,虽然器件的输出功率也超过  $50 \text{ mW}$ ,但其  $P-I$  曲线很不规则,有的出现 Kink,无法在实际中应用;在环境温度超过  $60^\circ\text{C}$  时,器件中的电流泄漏已经相当严重,阈值电流增加很多,器件的  $P-I$  曲线开始出现热饱和,输出功率也急速下降。这再次说明 Zn 扩散条件的合理选择是非常重要的,不当的

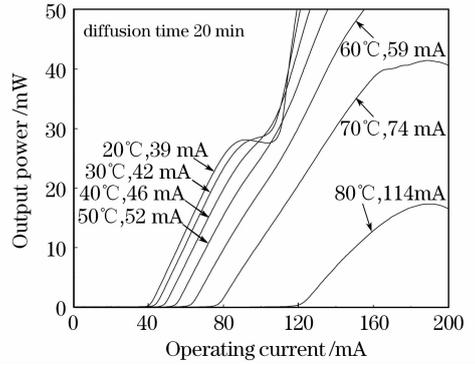


图 8 Zn 扩散 40 min 的激光器在不同温度下的  $P-I$  特性  
Fig. 8  $P-I$  characteristics at different ambient temperatures for the LD with 40 min Zn diffusion

非吸收窗口制作条件不但不能提高激光器功率特性,反而会恶化器件性能。

### 3.4 阈值电流与工作电流的批量特性

大功率  $657 \text{ nm}$  红光半导体激光器最终希望用于 DVD 数据读写,对于制作的 Zn 扩散 20 min 的激光器,随机抽取了 25 个样品,测量了其电流的批量特性。图 9 为 25 支激光器的阈值电流与工作电流的批量特性,图中可知阈值电流一致性很好,所有器件的阈值电流均在  $40 \text{ mA}$  左右;但对于  $50 \text{ mW}$  输出功率下的工作电流则有一定分散性,但均在  $88\sim 135 \text{ mA}$  之间,满足实用化要求。

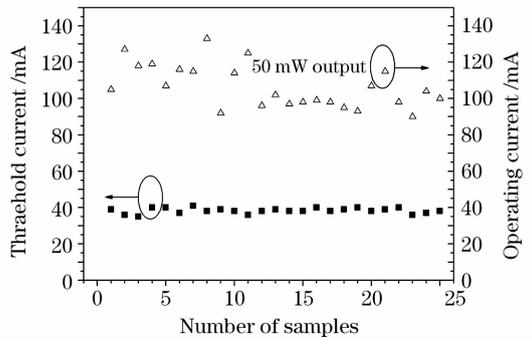


图 9 25 支激光器的阈值电流与工作电流的批量特性  
Fig. 9 Threshold currents and operating currents of 25 LDs

## 4 结论

采用 MOCVD 技术生长了  $657 \text{ nm}$  半导体激光器外延片,通过闭管 Zn 扩散掺杂诱导量子阱混杂技术在激光器腔面附近制作非吸收窗口来改善激光器的 COD 问题。研究了不同 Zn 扩散条件下制作的非吸收窗口对器件特性的影响,通过测试发现,扩散温度  $550^\circ\text{C}$ , 扩散时间 20 min 时得到的非吸收窗口使得激光器的性能有较大提升,其连续工作条件

下无 kink, 输出功率超过 100 mW。器件的阈值电流与工作电流的批量特性好, 温度特性好, 可应用于 DVD 数据读写等领域。

### 参 考 文 献

- 1 Gen-ichi Hatakoshi, Koichi Nitta, Kazuhiko Itaya *et al.*. High-power InGaAlP laser diodes for high-density optical recording [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**(Part 1, 2B):501~507
- 2 Byungjin Ma, Soohaeng Cho, Changyun Lee *et al.*. Realization of high-power highly efficient GaInP/AlGaInP ridge laser diodes for recordable/rewritable digital versatile discs [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(2A):774~777
- 3 Yun Xu, Qing Cao, Xiaopeng Zhu *et al.*. High power AlGaInP laser diodes with zinc-diffused window mirror structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11):647~649
- 4 G. B. Stringfellow. The importance of lattice mismatch in the growth of  $Ga_xIn_{1-x}P$  epitaxial crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(8):3455~3460
- 5 T. Yokotsuka, A. Takamori, M. Nakajima. Growth of heavily Be-doped AlInP by gas source molecular beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(14):1521~1523
- 6 M. Ikeda, A. Toda, K. Nakano *et al.*. Room-temperature continuous-wave operation of a GaInP/AlGaInP multiquantum well laser grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(16):1033~1034
- 7 Tetsuya Yagi, Harumi Nishiguchi, Yasuaki Yoshida *et al.*. High-power high-efficiency 660-nm laser diodes for DVD-R/RW [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, **9**(5):1260~1264
- 8 Zheng Kai, Ma Xiaoyu, Lin Tao *et al.*. Low-threshold-current and high-out-power 660 nm laser diodes with a p-GaAs current blocking layer for DVD-RAM/R [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(9):2269~2272
- 9 Xia Wei, Ma Deying, Wang Ling *et al.*. High power 650 nm red semiconductor laser with transparent window [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1182~1184  
夏 伟, 马德营, 王 翎等. 高透腔面大功率 650 nm 红光半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1182~1184
- 10 Kai Zheng, Tao Lin, Li Jiang *et al.*. High power red-light GaInP/AlGaInP laser diodes with nonabsorption windows based on Zn diffusion-induced quantum well intermixing [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1):27~29
- 11 N. Lichtenstein, R. Winterhoff, Ferdinand Scholz *et al.*. The impact of LOC structures on 670-nm (Al) GaInP high-power lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):564~570
- 12 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
- 13 Lu Peng, Liu Guojun, Bo Baoxue *et al.*. Improvement of cavity films and catastrophic optical damage on 980nm semiconductor laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(Suppl.):164~168  
芦 鹏, 刘国军, 薄报学等. 980 nm 半导体激光器腔面膜与腔面光学灾变的改善[J]. *中国激光*, 2008, **35**(增刊):164~168
- 14 Lin Tao, Zheng Kai, Ma XiaoYu. AlGaInP/GaInP quantum well intermixing induced by Zinc impurity diffusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11):2209~2214  
林 涛, 郑 凯, 马晓宇. Zn 杂质扩散诱导 AlGaInP/GaInP 量子阱混杂的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11):2209~2214