

# 高可靠性瓦级 660 nm 半导体激光器研制

朱振<sup>1</sup>, 张新<sup>1</sup>, 肖成峰<sup>1</sup>, 李沛旭<sup>1</sup>, 孙素娟<sup>1</sup>, 夏伟<sup>1,2\*</sup>, 徐现刚<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>山东华光光电子股份有限公司, 山东 济南 250100;

<sup>2</sup>济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250100;

<sup>3</sup>山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

**摘要** 利用 Zn 扩散形成非吸收窗口的技术, 制备了大功率 660 nm 半导体激光器。在芯片窗口区用选择性扩 Zn 方式, 使得窗口区有源层发光波长蓝移了 61 nm, 有效降低了腔面的光吸收。制备的激光器芯片有源区条宽为 150  $\mu\text{m}$ , 腔长为 1000  $\mu\text{m}$ , p 面朝下用 AuSn 焊料烧结于 AlN 陶瓷热沉上。封装后的器件最高输出功率达到了 4.2 W, 并且没有出现灾变性光学腔面损伤的现象。半导体激光器的水平发散角为 6°, 垂直发散角为 39°, 室温 1.5 A 电流下的激光峰值波长为 659 nm。使用简易的风冷散热条件, 在 1.5 A 连续电流下老化 10 只激光器, 4000 h 小时仍未出现失效现象。可见, 所制备的 660 nm 半导体激光器在瓦级以上功率连续输出时同时具有可靠性高及使用成本低的优势。

**关键词** 激光器; 瓦级激光器; Zn 扩散; 半导体激光器; 风冷

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0501002

## Fabrication of Highly Reliable Watt-Level 660 nm Semiconductor Lasers

Zhu Zhen<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Xiao Chengfeng<sup>1</sup>, Li Peixu<sup>1</sup>, Sun Sujuan<sup>1</sup>,  
Xia Wei<sup>1,2</sup>, Xu Xiangang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Shandong Huaguang Optoelectronics Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;

<sup>2</sup>School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250100, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

**Abstract** The high power 660 nm semiconductor laser is fabricated with non-absorbing window structure by Zn diffusion method. The photoluminescence wavelength of the active layer near the window region blue shifts by 61 nm with the selective Zn diffusion in the window region of the chips, which effectively reduces the optical absorption of the cavity facets. The stripe width is 150  $\mu\text{m}$  and the cavity length is 1000  $\mu\text{m}$ . The chips are sintered with AuSn solder by p-side down onto the AlN heat sink. The packaged device shows the highest output power of 4.2 W without catastrophic optical damage. The horizontal divergence angle of the semiconductor laser is 6° and the vertical divergence angle is 39°. The emission peak wavelength of the laser is 659 nm at room temperature and the current of 1.5 A. The 10 semiconductor lasers are aged at the current of 1.5 A in continuous-wave mode with the simple air-cooled heat dissipation condition, and no failure has ever occurred for 4000 h. Therefore, the 660 nm semiconductor laser with watt-level output power has the advantage of high reliability and low operating cost.

**Key words** lasers; watt-level laser; Zn diffusion; semiconductor laser; air cooling

**OCIS codes** 140.2020; 140.5960; 140.7300

收稿日期: 2017-11-07; 收到修改稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0404901)

作者简介: 朱振(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事半导体激光器的设计、生长及性能分析等方面的研究。

E-mail: zhuzhen2003@163.com

\* 通信联系人。E-mail: sps\_xiaw@ujn.edu.cn

# 1 引 言

大功率红光半导体激光器具有体积小、成本低、易于集成等优点,广泛应用于激光存储<sup>[1]</sup>、激光显示<sup>[2]</sup>、光动力理疗<sup>[3]</sup>、抽运飞秒  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$  及 Q 开关紫翠玉固体激光器<sup>[4]</sup>等方面。

相比于工业加工及抽运应用的 800~1000 nm 等近红外半导体激光器,大功率 660 nm 的红光半导体激光器制作难度更大。主要是受 AlGaInP 材料体系的限制,有源区及限制层的带隙差较小,因而对注入载流子的限制能力较差,容易产生泄露电流。这会使半导体激光器的内量子效率降低,功率转换效率下降。目前报道的大功率红光半导体激光器的功率转换效率一般为 30%~40%<sup>[2-3,5]</sup>,而 900 nm 激光器的转换效率高达 70%以上<sup>[6-7]</sup>。同时 AlGaInP 材料的热阻也高于 AlGaAs 材料,因此红光半导体激光器不适用于宽波导结构,在高功率下工作时对腔面的抗烧毁能力要求也更高<sup>[8]</sup>。已有文献报道红光半导体激光器单管额定功率最高在 1 W 左右<sup>[4,9]</sup>,远低于目前已经商用的 15 W 915 nm 半导体激光器<sup>[10]</sup>。

在大功率红光半导体激光器方面,日本处于领先地位。早在 2007 年,日本住友公司就实现了稳定性及均匀性良好的 4 英尺(1 英尺=0.0254 m)工艺线,制作的基横模 660 nm 红光半导体激光器可以在 75 °C 及 120 mW 下连续工作上千小时<sup>[11]</sup>。而在激光显示用的短波长 638 nm 红光半导体激光器方面,日本三菱公司也实现了 1 W 以内的连续输出<sup>[9]</sup>。但是在瓦级以上功率输出的 660 nm 半导体激光器方面却鲜有报道。只有德国莱布尼茨联合会费迪南德布劳恩(FBH)研究所做了一系列研究,他们使用 AlGaAs 作为 p 型限制层,将 ZnSe 作为腔面钝化膜,并用高导热的金刚石作为热沉,在 15 °C 下实现最高 3 W 的功率输出,并且在控温 15 °C 和功率 1.1 W 下老化 20000 h<sup>[3-5]</sup>。但金刚石热沉及低温控温设备增加了使用成本,该激光器不适合商业化的批量生产。国内的一些高校、研究所的科研人员也在这方面做过很多研究,但是受限于腔面的光学灾变损伤(COD),最高工作功率一直在 1 W 以下,而且工作温度也在 20 °C 以内<sup>[11-13]</sup>。

本文将固态扩 Zn 方式替代原有气态扩 Zn 方式,提高了非吸收窗口工艺的稳定性及重复性,同时优化外延材料质量及芯片烧结工艺,实现了 660 nm 半导体激光器瓦级以上功率的连续稳定输出,最高

输出功率达到 4.2 W,并且腔面没有 COD 现象。器件在室温下正常工作时只需要简易的风冷散热,这大大降低了客户的使用成本。

# 2 器件结构及工艺

大功率 660 nm 红光半导体激光器的结构如图 1 所示。外延层在偏向  $\langle 111 \rangle$  A 晶向 15° 的 n 型 GaAs(100)单晶衬底上使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统生长而成。其中, n 限制层为 1000 nm 厚的 Si 掺杂  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ , p 限制层为 1000 nm 厚的 Mg 掺杂  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ,有源层包括 8 nm 厚的压应变  $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.55}\text{P}$  单量子阱及 250 nm 厚的  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  波导层,欧姆接触层为 200 nm 厚的 Zn 掺杂 GaAs。限制层使用低折射率的  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  材料,可以有效地提高有源区的光限制因子,降低阈值电流密度<sup>[9]</sup>。同时使用扩散系数较低的 Mg 作为 p 限制层的掺杂原子,可以使掺杂浓度提高至  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上,以增加 p 限制层的有效势垒高度。此结构可以降低有源区电子向 p 型区的泄露,提高红光半导体激光器的功率转换效率。

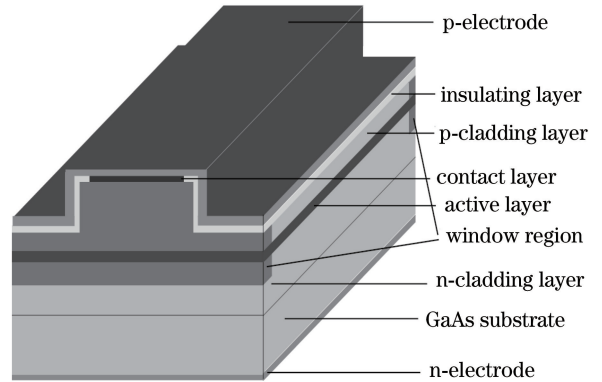


图 1 红光半导体激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the red-semiconductor laser

外延片生长完成后,用化学气相沉积(CVD)方法生长 ZnO 薄膜,并在窗口局部区域进行退火。Zn 原子会选择性地扩散至窗口区的有源层并诱导量子阱附近的 Al、Ga 原子混杂,从而增加扩散区量子阱的带隙,形成非吸收窗口<sup>[15]</sup>。图 2 所示为外延片正常区域和扩 Zn 区域有源层的光致发光(PL)谱。测试仪器为 Accent RPM2000,激发光波长为 532 nm。外延层量子阱未发生原子混杂的发光峰位于 649 nm。外延层扩 Zn 区域的量子阱由于 Zn 扩散的影响产生了原子混杂,带隙增加,发光峰蓝移至 588 nm。发光峰蓝移量达到了 61 nm,对应带隙增加约 0.2 eV。扩 Zn 区域作为半导体激光器的透明

窗口区,可以降低器件端面的光吸收,抑制 COD 的产生。早期红光激光器一般使用以  $Zn_3As_2$  为扩散源的气态扩散方式,这需要在封闭的空间和 As 蒸气的保护下进行闭管扩散<sup>[12-13]</sup>。封闭空间的大小、扩散时的真空度及扩散源的剂量都会影响扩散的结果,因此其工艺条件比较苛刻,不利于实际应用。相比而言,本文使用的固态扩 Zn 方式更为稳定和均匀,工艺窗口更宽,而且安全性也更高。

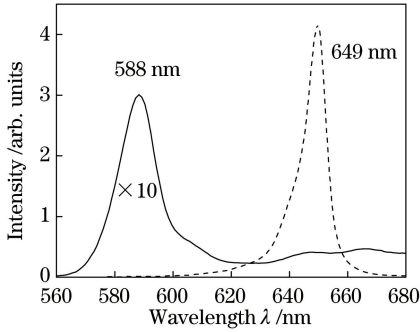


图2 正常区域(虚线)和扩 Zn 区域(实线)有源层的光致发光谱

Fig. 2 PL spectra of the active layer in the area of as-grown (dash line) and Zn diffused (solid line)

使用干法刻蚀工艺形成 150  $\mu m$  的宽条,并在宽条两侧覆盖  $SiO_2$  绝缘膜,产生电流注入区,同时对侧向光场形成弱折射率导引的限制。p 面金属电极为 Ti/Pt/Au, n 面金属电极为 Ge/Ni/Au。解理后的巴条前后腔面分别蒸镀增透及高反膜,腔长为 1000  $\mu m$ 。管芯 p 面朝下,使用 AuSn 硬焊料烧结于 AlN 陶瓷热沉上。

### 3 实验结果及分析

制作的大功率 660 nm 半导体激光器的功率-电流-电压(P-I-V)曲线如图 3 所示。功率测试使用积分球系统,环境温度为 25  $^{\circ}C$ 。器件的阈值电流约为 0.5 A,对应的阈值电流密度约为  $0.3 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由于非吸收窗口的使用,器件在 5 A 的电流下仍然没有发生 COD 现象。受限于热饱和,器件的最大输出功率为 4.2 W。此红光半导体激光器在 1.5 A 的工作电流下,输出功率为 1.2 W,此时的电-光转换效率为 41%。在已报道的大功率红光半导体激光器中,功率转换效率能达到 40% 的并不多,主要原因是大电流下的电子产生泄漏<sup>[2,3,5]</sup>。通过使用扩散系数较低的 Mg 作为 p 型掺杂原子,可以获得高掺杂浓度的限制层,从而提高对有源区电子的限制作用。限制层使用低折射率的  $Al_{0.5}In_{0.5}P$  材料,

提高了对有源区光子的限制作用<sup>[16]</sup>,因此获得了较低的阈值电流密度及较高的电光转换效率。

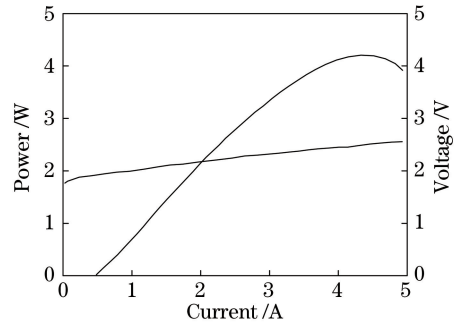


图3 大功率 660 nm 半导体激光器的功率-电流-电压曲线  
Fig. 3 P-I-V curves of the high power 660 nm semiconductor laser

图 4 是大功率 660 nm 半导体激光器在 1.5 A 工作电流下的远场分布(FFP)图。在垂直方向上,光束强度呈类高斯型分布。由于限制层  $Al_{0.5}In_{0.5}P$  对光的限制作用强,器件光束的垂直发散角达到了  $39^{\circ}$ ;而在水平方向上,使用了宽条结构,光模式较多,器件光束的水平发散角为  $6^{\circ}$ 。

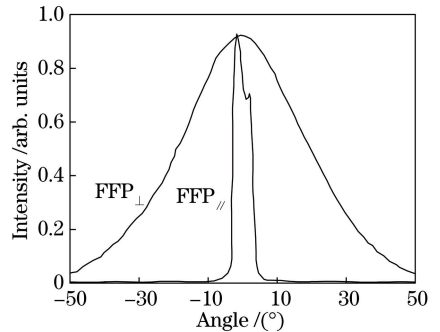


图4 大功率 660 nm 半导体激光器的远场分布  
Fig. 4 Far-field patterns of the high power 660 nm semiconductor laser

大功率 660 nm 半导体激光器的激光光谱如图 5 所示。光谱测试仪(AQ6370D, Yokogawa, 日本)的测试条件:温度为 25  $^{\circ}C$ ,电流为 1.5 A。峰值波长为 659 nm,等效半峰全宽约为 1 nm。

图 6 所示为 10 只大功率 660 nm 半导体激光器老化考评曲线。在长期老化过程中,为了防止腔面污染,激光器被密封于带玻璃视窗的管壳中。老化时使用的连续电流  $I = 1.5 \text{ A}$ ,器件初始功率约为 1.2 W。激光器没有使用半导体制冷或者水冷控温进行低温老化,而是使用简易的风冷散热。老化时的环境温度为 25~30  $^{\circ}C$ ,所以监控的功率有波动,但在经历初期衰减后,器件的整体功率保持在 1 W 左右。经过 4000 h 老化,未出现器件失效现象。

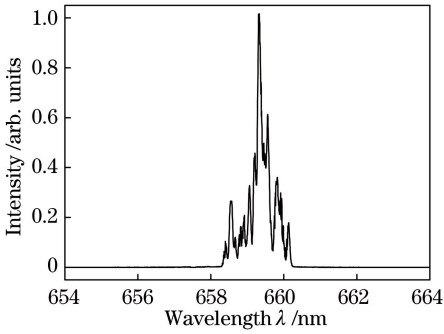


图 5 大功率 660 nm 半导体激光器在 1.5 A 电流下的激光光谱图

Fig. 5 Lasing spectrum of the high power 660 nm semiconductor laser measured at 1.5 A

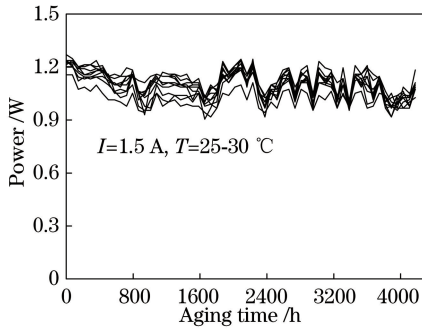


图 6 大功率 660 nm 半导体激光器在风冷散热条件下的老化考评

Fig. 6 Aging test of the high power 660 nm semiconductor lasers under air-cooled heat dissipation

## 4 结 论

通过外延结构优化及固态扩 Zn 形成非吸收窗口等技术实现了高可靠性工作的瓦级 660 nm 半导体激光器。器件最高输出功率达到了 4.2 W, 并且没有出现腔面 COD 的现象。在室温下使用风冷散热, 器件实现瓦级功率连续输出并且工作 4000 h 仍未出现失效现象。相比于本课题组之前的报道及同行的研究, 所制备的 660 nm 半导体激光器不仅实现了高可靠性的瓦级以上功率连续输出, 而且其后期使用成本较低。

## 参 考 文 献

[1] Hung C T, Huang S C, Lu T C. Effect of passivation layers on characteristics of AlGaInP ridge waveguide laser diodes [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 59: 110-115.  
 [2] Yagi T, Shimada N, Nishida T, *et al.* Highly-reliable operation of 638-nm broad stripe laser diode with high wall-plug efficiency for display applications

[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8640: 86400E.  
 [3] Sumpf B, Zorn M, Staske R, *et al.* 3-W broad area lasers and 12-W bars with conversion efficiencies up to 40% at 650 nm [J]. IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1188-1193.  
 [4] Sumpf B, Fricke J, Ressel P, *et al.* 20000 h reliable operation of 100 um stripe width 650 nm broad area lasers at more than 1.1 W output power [J]. Semiconductor Science Technology, 2011, 26(10): 105011.  
 [5] Sumpf B, Zorn M, Staske R, *et al.* High-efficient 650 nm laser bars with an output power of about 10 W and a wall-plug efficiency of 30% [J]. SPIE, 2006, 6133: 61330D.  
 [6] Crump P, Erbert G, Wenzel H, *et al.* Efficient high-power laser diodes [J]. IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1501211.  
 [7] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.  
 王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.  
 [8] Ohno T, Takiguchi M, Wakabayashi K, *et al.* Characteristics of red-emitting broad area stripe laser diodes with zinc diffused window structures [J]. SPIE, 2010, 7583: 75830W.  
 [9] Mitsuyama H, Motoda T, Nishida T, *et al.* Reliability study on high-power 638nm broad stripe laser diode [J]. Optical Review, 2014, 21(1): 43-47.  
 [10] Kennedy K, Hemenway M, Urbanek W, *et al.* High-power fiber-coupled diode lasers with superior brightness, efficiency, and reliability [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650D.  
 [11] Sumitomo H, Kajiyama S, Oguri H, *et al.* Uniform and high-power characteristics of AlGaInP-based laser diodes with 4-inch-wafer process technology [J]. IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1170-1175.  
 [12] Zheng K, Lin T, Jiang L, *et al.* High power red-light GaInP/AlGaInP laser diodes with nonabsorbing windows based on Zn diffusion-induced quantum well intermixing [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(1): 27-29.  
 [13] Xia W, Ma D Y, Wang L, *et al.* High power 650 nm red semiconductor laser with transparent window [J]. Chinese Journal of 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.
- [14] Ma D Y, Li P X, Xia W, *et al.* Mg doped p-cladding AlInP layer with window-structure high power 660 nm (3.7 W) AlGaInP broad area laser diodes[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2009, 38(3): 597-601.  
马德营, 李沛旭, 夏伟, 等. Mg 掺杂 AlInP 限制层窗口结构高功率(3.7 W) 660 nm AlGaInP 宽面半导体激光器[J]. *人工晶体学报*, 2009, 38(3): 597-601.
- [15] Xu Y. Fabrication of 650 nm high-power single-mode AlGaInP semiconductor laser diodes and its reliability analysis[D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2005: 32-40.  
徐云. 650 nm 基横模大功率 AlGaInP 半导体激光器的研制及可靠性分析[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2005: 32-40.
- [16] Liu M H, Cui B F, He X, *et al.* Study of high power semiconductor laser with low threshold current [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0502001.  
刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502001.