

大功率 640 nm 红光半导体激光器的设计及制备

朱振^{1**}, 肖成峰¹, 夏伟^{1,2*}, 张新¹, 苏建¹, 李沛旭¹, 徐现刚^{1,3}

¹山东华光光电子股份有限公司, 山东 济南 250100;

²济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250100;

³山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 设计并制备了一款短波长红光 640 nm 的大功率半导体激光器。利用金属有机化学气相沉积技术生长了 AlGaInP 材料的激光器外延层, 其中, 限制层使用低折射率的 AlInP 材料, 有源区使用张应变的 GaInP/AlGaInP 量子阱。外延层有源区的光致发光谱出现两个分裂的发光峰, 位于 627 nm 及 616 nm 处, 分别对应于电子到轻空穴及重空穴的跃迁。对芯片窗口区域进行选择性的 Zn 扩散, 量子阱原子发生混杂, 波长蓝移了 43 nm。不带非吸收窗口的器件在 1.9 A 发生腔面灾变性光学损伤(COD), 功率为 1.4 W。而带窗口结构的器件没有产生 COD, 功率输出受限于热饱和, 最大功率为 2.3 W。室温连续电流测试, 1 A 下波长为 639 nm, 1.5 A 下波长为 640 nm。器件水平发散角为 6°, 垂直发散角为 41°。

关键词 激光器; 二极管激光器; 640 nm; 窗口结构; 热饱和; 张应变

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081403

Design and Fabrication of High Power 640 nm Red Laser Diodes

Zhu Zhen^{1**}, Xiao Chengfeng¹, Xia Wei^{1,2*}, Zhang Xin¹, Su Jian¹, Li Peixu¹, Xu Xiangang^{1,3}

¹Shandong Huaguang Optoelectronics Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;

²School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250100, China;

³State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract A short wavelength red light 640 nm high power laser diode has been designed and fabricated. AlGaInP epitaxial layers of the laser diodes are grown by metal organic chemical vapor deposition. The cladding layers are AlInP with low refractive index. The active layer is tensile strained GaInP/AlGaInP quantum well. The photoluminescence spectrum of the active layer shows two splitting peaks locate at 627 nm and 616 nm, which correspond to the transitions from electrons to light holes and heavy holes, respectively. Zn atoms are selectively diffused into the window region, leading to the mixing of the quantum well. The wavelength is blue-shifted by 43 nm. The catastrophic optical damage (COD) occurs for the laser diode without window structure at 1.9 A, corresponding to the power of 1.4 W. The device with window structure has no COD phenomenon. The output power is limited by the thermal rollover with the maximum of 2.3 W. At room temperature, the wavelength of the laser diode is 639 nm at 1 A while 640 nm at 1.5 A. The horizontal divergence angle of the device is 6° and the vertical divergence angle is 41°.

Key words lasers; laser diodes; 640 nm; window structure; thermal rollover; tensile strain

OCIS codes 140.2020; 140.5960; 140.7300

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, 因此被广泛应用于激光存储、激光

显示、光动力理疗^[1]等方面。其中波长大于 650 nm 的红光激光器研究比较成熟。21 世纪初期, 由于光存储应用的发展, 日本多家电子公司致力于大功率基横模红光半导体激光器的研究。比如, 日本住友

收稿日期: 2018-02-18; 修回日期: 2018-02-28; 录用日期: 2018-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0404901, 2016YFB0401802)

* E-mail: sps_xiaw@ujn.edu.cn; ** E-mail: zhuzhen2003@163.com

公司早在 2007 年就实现了稳定性及均匀性良好的 10.16 cm(即 4 in)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^[2]。在多模大功率 650 nm 红光半导体激光器方面,德国 FBH 研究所做了一系列研究,他们使用 P 型 AlGaAs 限制层及高导热的金刚石热沉,实现了单管功率大于 1 W 及巴条功率为 10 W 以上的连续输出^[3-4]。

近年来,红光激光器的光存储市场已经被存储量更大的蓝光光盘及便携的闪存技术所替代,而在以激光电视及激光微投影为代表的激光显示方面的应用却方兴未艾。在红光波段,人眼的视觉灵敏度随着波长的降低而增大,比如人眼在 640 nm 的敏感系数是 660 nm 的 3 倍^[5]。要获得更好的视觉体验,必须缩短激光光源的波长。但是对于目前大多使用的 AlGaInP 体系的红光半导体激光器,波长越短,有源区材料的带隙越高,载流子更容易从有源区中溢出入限制层,从而降低了器件的功率转换效率,并且温度特性也会变差。因此做折中处理,一般选取波长约 640 nm 的大功率半导体激光器作为激光显示的光源^[6]。大功率 640 nm 半导体激光器由于制作难度大,仅有日本和德国做过相关研究及报道。其中,三菱公司利用多个隔离的脊条结构克服了 AlGaInP 激光器因热阻大而形成的多光丝现象。他们制作的三发光区 638 nm 半导体激光器在 3.5 W 的功率下,可连续工作超过 2000 h^[7]。

在激光显示方面,国内学者偏向于研究后端的光学系统设计,而对于激光显示光源的大功率 640 nm 半导体激光器的研究和制作,还处于空白^[8-10]。随着激光显示的深入发展,国家已经把 640 nm 红光半导体激光器的相关研究列入 2016、2017 及 2018 年的国家重点研发计划的重点专项。实现激光显示用的大功率红光激光器国产化势在必行。

本文设计及生长了 GaInP/AlGaInP 张应变量子阱,实现了室温下波长约 640 nm 的激光发射。通过优化外延层的组分及厚度,降低了器件的热阻,减弱了宽条形 AlGaInP 激光器在大功率输出下的热透镜及成丝现象。利用选择性扩 Zn 技术制作了非吸收窗口,器件的最大输出功率达到了 2.3 W。

2 器件设计及制备

大功率 640 nm 红光半导体激光器的外延层是在偏向<111>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

长而成的。其外延结构依次为 900 nm 厚的 Si 掺杂 Al_{0.5}In_{0.5}P 限制层,200 nm 厚的 (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 波导层,12 nm 厚的张应变 Ga_{0.6}In_{0.4}P 单量子阱,100 nm 厚的 (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 波导层,900 nm 厚的 Mg 掺杂 Al_{0.5}In_{0.5}P 限制层,50 nm 厚的 Mg 掺杂 Ga_{0.5}In_{0.5}P 带隙过渡层及 200 nm 厚的 Zn 掺杂 GaAs 欧姆接触层。

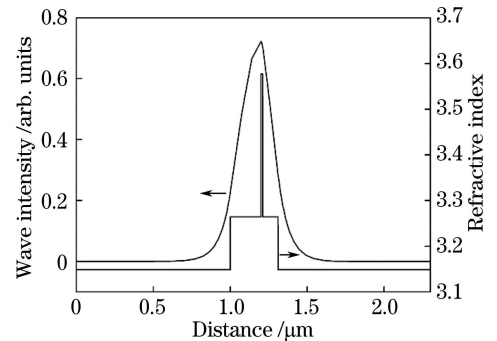


图 1 红光半导体激光器的折射率及光场分布示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the refractive index and optical profile for the red laser diode

相比于 AlGaAs 材料,AlGaInP 四元材料的热导率及电导率都要低^[11],因此 AlGaAs 体系的大功率波长约 900 nm 半导体激光器中常用的宽波导结构并不适用于 640 nm 红光半导体激光器。本研究使用非对称厚度的波导层,且 P 侧较薄。波导厚度非对称可以使光场偏向外延层 N 侧,降低空穴对光的吸收^[12],而 P 侧波导较薄,器件 P 面朝下封装可以降低器件的热阻^[13]。限制层使用低折射率的 Al_{0.5}In_{0.5}P 材料,能有效地将光限制在波导层中,因此可以将限制层的厚度缩减至 1 μm 以内,进一步降低器件的热阻。此结构激光器有源区附近的光场分布如图 1 所示,可以看到光场大部分被局限于波导层中,而且明显偏向 N 区。多量子阱结构可以提高红光半导体激光器的特征温度,但是对于宽条形大功率激光器,其阈值电流会增大很多,降低了激光器的功率转换效率,所以本研究使用张应变的 Ga_{0.6}In_{0.4}P 单阱结构。图 2 是外延片的光致发光(PL)谱,插图是计算模拟的量子阱价带图。量子阱由于存在张应变,价带能级发生了分裂,其中轻空穴(lh)带位于重空穴(hh)带的上方。这与 PL 谱中出现的两个位于 627 nm 及 616 nm 的发光峰是对应的,它们分别是电子与轻空穴(e-lh1)、电子与重空穴(e-hh1)的复合发光。两个发光峰的能级差为 0.035 eV,与插图中计算得到的 lh1 与 hh1 的能级差 0.033 eV 是非常接近的,说明本研究的生长技术

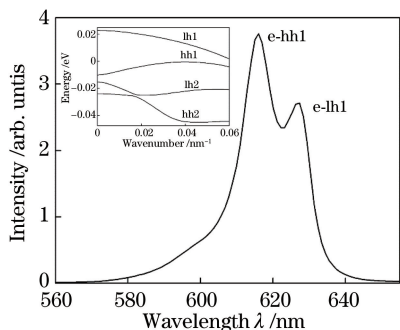


图2 激光器外延片的光致发光谱,
插图为模拟的量子阱带带图

Fig. 2 PL spectrum of the laser diode wafer with simulated valence band diagram of the quantum well in the inset

对材料组分及厚度的控制是非常准确的。

外延片生长完成后,以 ZnO 为扩散源,通过热扩散的方式将 Zn 原子选择性地扩散至有源层。Zn 杂质会诱导量子阱附近的 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^[14]。图3给出了外延片进行 Zn 扩散后的 PL 谱和量子阱混杂前后的能带示意图,图中 E_c 为导带底, E_v 为价带顶。扩 Zn 后, PL 谱中只在 584 nm 处出现一个发光峰,说明量子阱原子发生混杂后,应力得到了释放,价带能级不再分裂。发光峰蓝移量为 43 nm,对应带隙增加约 0.146 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,抑制光学灾变损伤(COD)的产生。

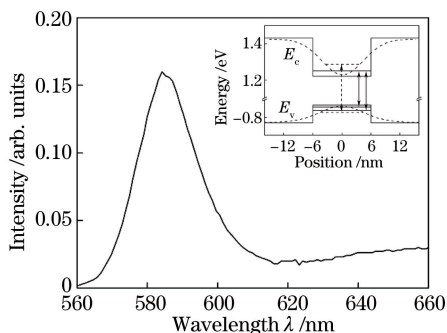


图3 激光器外延片扩 Zn 后的光致发光谱,
插图为量子阱混杂前后的能带示意图

Fig. 3 PL spectrum of the laser diode wafer after Zn diffusion with energy band diagram of the quantum wells before and after intermixing in the inset

使用干法刻蚀工艺形成 100 μm 的宽条,并在宽条两侧覆盖 SiO_2 绝缘膜,形成电流注入区,同时对侧向光场形成弱折射率导引的限制^[15]。P 面金属电极 为 Ti/Pt/Au, N 面金属电极 为 Ge/Ni/Au。解理成 1500 μm 长的巴条,然后在前后腔面分别蒸镀透射率

为 10% 的增透膜及反射率为 95% 的高反膜。解理成管芯, P 面朝下烧结于 AlN 陶瓷热沉上。

3 实验结果及分析

制作的大功率 640 nm 半导体激光器的功率曲线如图 4 所示。功率测试使用积分球系统,环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。带窗口和不带窗口结构的激光器的阈值电流都为 0.45 A,对应的阈值电流密度为 0.3 kA/cm^2 。测试电流在 1.5 A 以下时,两种激光器的功率曲线(实线)几乎重合,说明窗口区扩 Zn 后并未影响激光器的静态电学及光学性能。测试电流继续加大时,对于未使用非吸收窗口结构的激光器,测试功率达到 1.4 W 时发生了 COD 现象。而使用非吸收窗口的器件在 4 A 的电流下仍然没有发生 COD 现象。受限于热饱和,带非吸收窗口的器件的最大输出功率为 2.3 W,器件的最大功率转换效率为 35% (虚线)。具有相同有源区面积的 660 nm 激光器的热饱和功率及最大功率转换效率要高于 640 nm 激光器^[16-17]。这是由于波长缩短后,量子阱带隙增加,加剧了有源区电子泄露进入限制层^[18]。

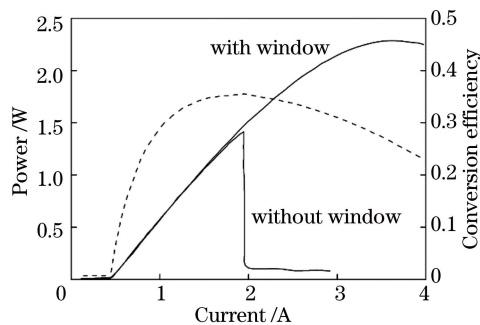


图4 大功率 640 nm 半导体激光器的
功率(实线)及转换效率(虚线)曲线

Fig. 4 Power (solid line) and conversion efficiency (dashed line) curves of the high power 640 nm laser diodes

图 5 是大功率 640 nm 半导体激光器在 1.5 A

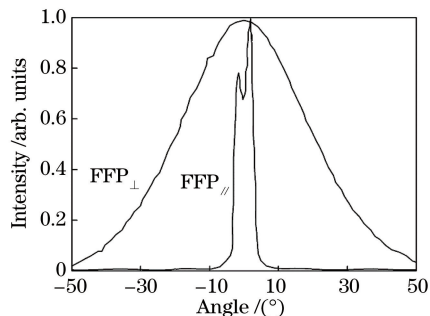


图5 大功率 640 nm 半导体激光器的远场分布
Fig. 5 Far-field patterns (FFPs) of the high power 640 nm laser diode

电流下的远场分布图。在垂直方向上,光束强度呈类高斯分布。由于限制层 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 对光的限制作用强,器件光束的垂直发散角达到 41° 。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° 。

大功率 640 nm 半导体激光器在 1 A 及 1.5 A 电流下的激光光谱如图 6 所示。测试时环境温度约 25°C 。1 A 电流下的功率约为 0.5 W,峰值波长为 639 nm。1.5 A 电流下的功率约为 1.1 W,峰值波长为 640 nm。光谱的半峰全宽约为 1.5 nm。

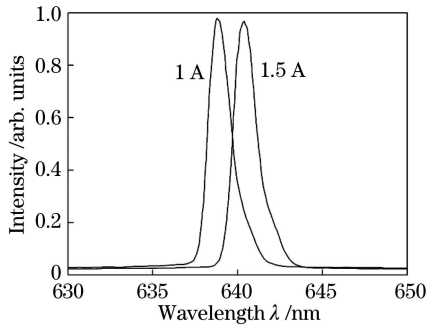


图 6 大功率 640 nm 半导体激光器的激光光谱图

Fig. 6 Lasing spectrum of the high power 640 nm laser diode

4 结 论

设计并制备了 AlGaInP 材料的半导体激光器,实现了室温下的 640 nm 的大功率激光发射。限制层使用低折射率材料,波导层使用非对称厚度,降低了激光器的热阻。利用选择性扩 Zn 技术使窗口区的量子阱发生混杂,形成非吸收窗口,克服了大功率 640 nm 激光器的腔面 COD 问题,最大输出功率达到 2.3 W。对 640 nm 激光器进行可靠性实验及提高工作寿命是本课题组下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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 in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1170-1175.
- [3] Sumpf B, Fricke J, Ressel P, *et al.* 20000 h reliable operation of 100 μm stripe width 650 nm broad area

lasers at more than 1.1 W output power [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2011, 26 (10): 105011.

- [4] 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]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6133: 61330D.
- [5] Shimada N, Yukawa M, Shibata K, *et al.* 640-nm laser diode for small laser display [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7198: 719806.
- [6] Imanishi D. High-temperature operation of 640 nm wavelength high-power laser diode arrays [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(3): 032702.
- [7] Kuramoto K, Nishida T, Abe S, *et al.* High power operation of AlGaInP red laser diode for display applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9348: 93480H.
- [8] Zhao Z T, Zhang H, Zou Y G, *et al.* Design and research of side lighted fiber of laser backlight source in liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0301004.
赵致童, 张贺, 邹永刚, 等. 液晶显示器激光背光光源侧体发光光纤的设计与研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0301004.
- [9] Xu M F, Ding J W, Hu P, *et al.* Affects of multi-apertures mask on formation of statistically independent speckle image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101005.
徐美芳, 丁俊文, 胡鹏, 等. 多孔掩模对统计独立散斑图像形成的影响分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (1): 0101005.
- [10] Qian L Y, Zhu X B, Chen J, *et al.* Speckle suppression in laser projection optical path [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(5): 62-66.
钱立勇, 朱向冰, 陈瑾, 等. 激光投影光路中的散斑抑制研究 [J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(5): 62-66.
- [11] Peters M, Rossin V, Acklin B. High efficiency, high reliability laser diodes at JDS Uniphase [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5711: 142-151.
- [12] Crump P, Erbert G, Wenzel H, *et al.* Efficient high-power laser diodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19 (4): 1501211.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Kong Z Z, Cui B F, Huang X Z, *et al.* Study on performance improvement of high power semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071403.
孔真真, 崔碧峰, 黄欣竹, 等. 大功率半导体激光器性能改善的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071403.
- [16] Zhu Z, Zhang X, Xiao C F, *et al.* Fabrication of highly reliable watt-level 660 nm laser diodes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0501002.
朱振, 张新, 肖成峰, 等. 高可靠性瓦级 660 nm 半导体激光器研制 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0501002.
- [17] 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 in Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1188-1193.
- [18] Li H, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Thermal analysis of AlGaInP-based LED microarray [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0123001.
李贺, 梁静秋, 梁中翥, 等. AlGaInP 材料 LED 微阵列热学特性分析 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0123001.