材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024030401

大功率半导体激光器端面特性改善的研究

闫博昭，崔碧峰*，陈　芬，陈中标，郑翔瑞，杨春鹏，王　晴，高欣雨

（北京工业大学 信息学部 光电子技术教育部重点实验室，北京 100124）

摘　要： 针对大电流下前腔面不稳定导致出现灾变性光学损伤(COMD)的问题，提出一种双区电极的半导体激光器，并对该结构激光器的COMD阈值、峰值功率、阈值电流、光谱稳定性及翘曲效应进行研究。在相同工艺条件下测试了单一电极结构和双区电极结构半导体激光器的COMD阈值、峰值功率、阈值电流、波长红移速度等参数。结果表明：在同等工艺条件下，主增益区阈值电流为80 mA，阈值电流降低20%，在窗口区15 mA电流的驱动下，双区电极的半导体激光器对比单电极半导体激光器COMD阈值能够提高13%、峰值功率能够提高12%，同时减少了波长红移并改善了翘曲效应。

关键词： 红光半导体激光器；大功率；腔面灾变性光学损伤；双区电极

中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0624－05

Study on the Improvement of Facet Characteristics of High-Power Semiconductor Lasers

YAN Bozhao, CUI Bifeng, CHEN Fen, CHEN Zhongbiao,
ZHENG Xiangrui, YANG Chunpeng, WANG Qing, GAO Xinyu

(Key Lab. of Opto-Electronics Technol. of The Ministry of Education, Faculty of Information Technol., Beijing University of Technol., Beijing 100124, CHN)

Abstract: To address the instability of the front cavity surface under high current, which can lead to catastrophic optical mirror damage (COMD), a semiconductor laser with a dual-zone electrode structure was proposed. This study investigated the COMD threshold, peak power, threshold current, spectral stability, and kink effect of this laser structure. Under the same process conditions, the COMD threshold, peak power, threshold current, and wavelength redshift rate of semiconductor lasers with a single-electrode structure and dual-zone electrode structure were tested. The results showed that, under the same process conditions, with a threshold current of 80 mA in the main gain region, the threshold current of the laser with the dual-zone electrode structure was reduced by 20%. When driven by a 15 mA current in the window region, compared to the single-electrode semiconductor laser, the semiconductor laser with the dual-zone electrodes could increase the COMD threshold by 13%, increase the peak power by 12%, and decrease the wavelength redshift while improving the kink effect.

Key words: red semiconductor lasers; high power; atastrophic optical damage; dual-zone electrodes

收稿日期：2024－03－04.

基金项目：国家自然科学基金项目(60908012,61575008,61775007)；北京市自然科学基金项目(4172011).

* **通信作者：**崔碧峰

0 引言

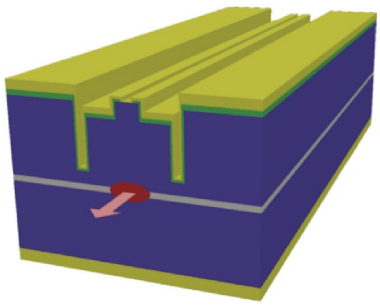
大功率半导体激光器具有质量小、体积小、易集成、效能高等优点，广泛应用于激光通信、材料加工、激光医疗、光刻等领域。作为激光显示所用的红光半导体激光器，其输出功率大、能量转换效率高、响应速度快，但对于大功率红光半导体激光器而言，所面对的技术难点是大电流下所引起的灾变性光学损伤(COMD)。

当前，减少红光半导体激光器 COMD 的方法有在应变量子阱激光器端面处引入张应变量子阱结构、量子阱混杂形成非吸收窗口结构、大光腔结构等。2018 年，朱振等[1]设计并制备生长了 GaInP/AlGaInP 张应变量子阱，实现了室温下波长约 640 nm 的激光发射，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。2022 年，He 等[2]提出了 $Si\text{-}Si_3N_4$ 复合介质层诱导的 680 nm AlGaInP/GaInP 半导体激光器量子阱混合结构，该结构保证了外延片表面良好的晶格质量，在 600 ℃的较低退火温度和 10 min 的退火时间下实现了非吸收窗口区 54.8 nm 的蓝移，为提高 680 nm 波段半导体激光器 COD 阈值提供了有效方案。2022 年，Avrutin 等[3]提出了一种使用大光学腔非对称波导和靠近 p 包层的有源层的红光发射半导体激光器设计，设计出在 620～660 nm 波段使得注入效率最高的波导层厚度。相较于上述通过改变窗口区材料特性的方法，本文提出了一种基于改变注入电流密度来降低窗口吸收的策略，设计并制备了基于 AlGaInP/GaInP 有源波导区 650 nm 半导体激光器，通过 P 面电极分区，降低腔面处的注入电流密度，从而减小腔面处由于腔面吸收引发的半导体材料的带隙变窄效应[4]，进而降低腔面处的光吸收，提高器件 COMD 阈值及峰值功率，降低器件阈值电流和由于热累计引起的波长红移[5]速度，同时改善了翘曲(kink)效应。

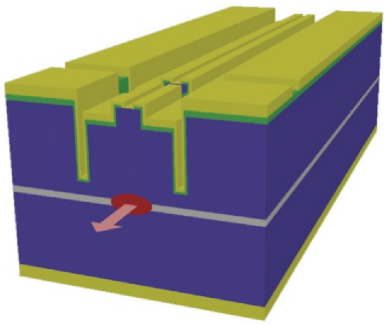
1 器件设计与制备

激光器在被施加较大电流[6]下，会导致腔面附近半导体材料带隙收缩，使得光子吸收系数增大，端面处的非平衡载流子浓度升高，腔面的温度升高。当其温度升高至激光器材料熔点时，器件发生 COMD。即使器件未直接发生 COMD，当腔面热累计[7-10](温度 T 在 120～160 ℃范围内)到一定程度时会引起热逃逸，导致局部热熔融进而形成大量缺陷，加速器件老化。故将 P 面电极双区使窗口腔面处电流注入减少，可有效改善带隙收缩的现象，提高器件的 COMD 阈值和腔面稳定性。

本实验的 650 nm 半导体激光器外延层是在偏向〈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。设计对比实验的 P 面单电极和 P 面双区电极红光半导体激光器的关键结构均由四个部分组成，即：隔离沟槽、脊形台面、电极窗口、解理线。其制备的激光器结构如图 1 所示，该激光器为双沟槽结构，利用干湿工艺结合制备沟槽和脊型台，其沟槽宽度为 10 μm，脊波导结构为 20 μm。在脊形台宽 20 μm 的基础上，预先采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)制备一层绝缘薄膜来实现电隔离，然后在此基础上套刻制备 15 μm 宽的电注入窗口[11]，限定电流注入面积以进一步在侧向阻挡电流注入到无源区，沟槽与脊形台的间距设计为 30 μm。对于红光激光器，光子密度大，周期过大会影响其散热能力，所以确定器件条宽为 20 μm，周期为 440 μm，腔长为 600 μm；其中双区电极结构，主增益区长度为 475 μm，窗口区长度为 100 μm。



(a) P 面单电极结构



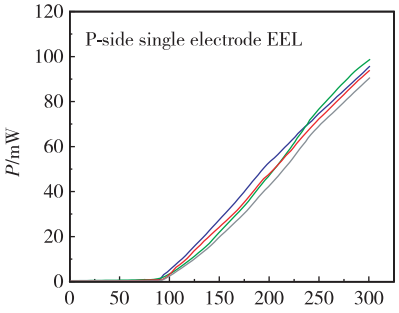
(b) P 面双区电极结构

图 1 红光半导体激光器结构示意图

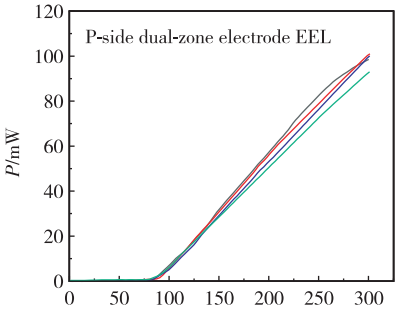
2 实验结果与分析

首先考虑双区电极结构改善能力，故设定窗口

区电流为 0 mA，分别在室温、300 mA 连续工作电流（双区电极在主增益区施加）条件下测试。制成的脊形台深为 500 nm 的 650 nm 波段半导体激光器 *P-I* 测试结果，如图 2 所示。P 面单电极的器件测试结果如图 2(a)所示，器件的阈值电流在 87～97 mA、输出光功率在 86～100 mW、斜率效率在 0.45～0.46 mW/mA 范围内，阈值电流密度约在 944～1 050 A/cm^2 范围内。在窗口区电流为零的情况下，P 面双区电极器件测试结果如图 2(b)所示，器件的阈值电流低至 80 mA、输出光功率可达 100 mW、斜率效率可达 0.44 mW/mA、阈值电流密度低至 890 A/cm^2。实验证明了由于窗口区的存在，减少了带隙收缩，光吸收相对减小，抑制了非辐射性电子-空穴对复合，从而降低腔面处产生的热量，同时也将使内损耗降低。另一方面，窗口区的小电流会减少有源层中暗线[12]（熔化再结晶区域由于快速冷却而存在的点缺陷）的存在，增加了器件的可靠性。



(a) P 面单电极器件



(b) P 面双区电极器件

图 2　500 nm 台深器件的 *P-I* 特性曲线测试结果

为了验证理论计算的合理性，在不同窗口区电流条件下对 P 面双区电极器件进行了详细测试。在窗口区分别施加了 0，15，30 和 45 mA 的电流进行测量，测试结果如图 3 所示。

通过对窗口区在不同电流下的参数进行比较分析：当窗口区电流为 0 mA 时，没有产生增益，器件克服内部损耗所需的光增益全部由主增益区提供，此时器件对应最大的阈值电流。随着窗口区电流增大，产生的增益逐渐增加，器件克服内部损耗所需的光增益由两部分共同提供，且该窗口是一种低损耗波导结构，因此器件的阈值逐渐减小。当窗口区注入的电流密度达到透明电流密度[13]时，即介质中的光子产生（通过受激发射）和损失（通过吸收和散射）达到平衡状态，器件达到最优水平。实验结果表明，当窗口区电流为 15 mA 时，器件的抗 COMD 性能最佳，峰值功率也最高。当窗口区电流继续增大，导致该区域的热积累变多，进而导致带隙变窄，加剧光子吸收，功率和 COMD 阈值都将下降。最终确定 P 面双区电极器件的窗口区理想施加电流应为 15 mA。在此基础上，对两种结构的器件分别进行了 COMD 测试。

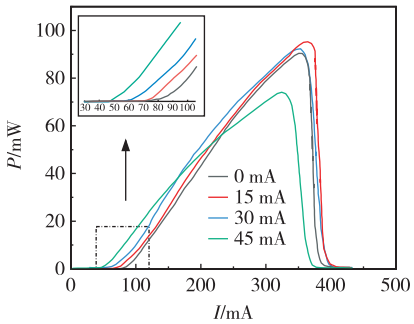


图 3　不同电流条件下，P 面双区电极器件的 *P-I* 特性测试结果

从图 4 对比 P 面双区电极器件与 P 面单电极器件的 *P-I* 曲线可以看出，双区电极器件的阈值电流低至 70 mA，峰值功率达到 121 mW，电流达到 385 mA 时发生 COMD 损毁。而单电极器件的阈值电流在 90～100 mA，峰值功率在 103～107 mW，电流在 340～345 mA 时发生 COMD 损毁。由于对窗口区进行小电流单独控制，规避了该区域大电流下载流子堆积引起的热损耗，从而形成低损耗波导结构，实现了对器件整体阈值电流的调控，相比单电极器件，阈值电流有 20%的降低。由于窗口区所加电流较小，减小了腔面处半导体材料带隙变窄现象，对激光区所发出的激光恰好形成“透明”不吸收，即减弱了对光子的吸收。因此对于 P 面双区电极而言，其窗口区腔面的热积累较小，发生 COMD 的电流阈值更高，有约 13%的提升，且峰值功率也更高，有 12%的提升。

为反映激光器输出光的波长组成，实验测试了两种结构器件的光谱。在室温、不同电流条件下测

试了两种器件的光谱如图 5 所示。

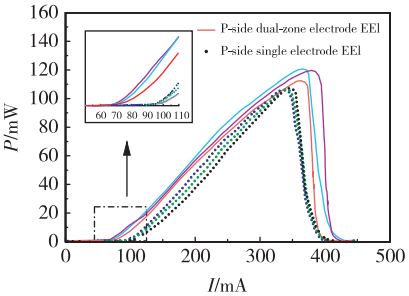
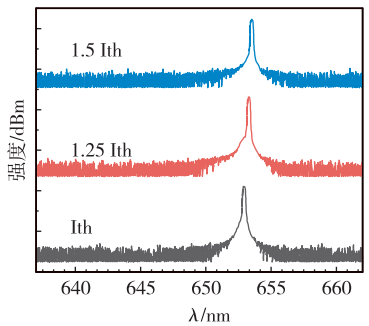
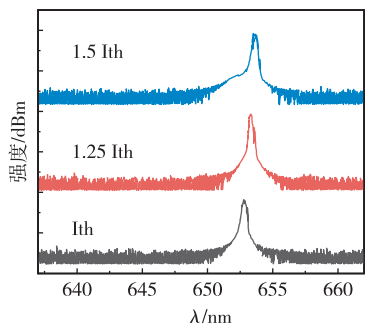


图 4 两种器件的 P-I 特性对比曲线



(a) P 面双区电极器件

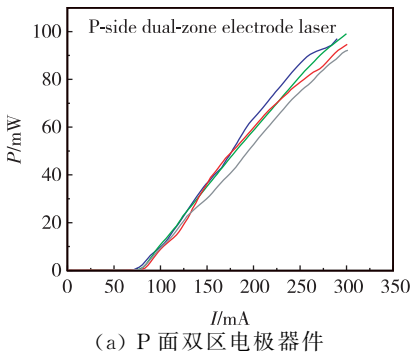


(b) P 面单电极器件

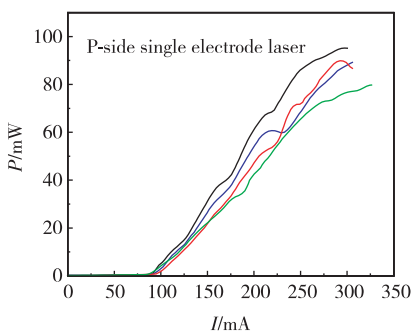
图 5 不同电流条件下半导体激光器光谱测试结果

计算得到 P 面双区电极器件波长的红移速度为 0.117 nm/10 mA，P 面单电极器件波长的红移速度为 0.122 nm/10 mA。P 面窗口区的引入，减缓了腔面处的光子吸收与热积累，进而改善了器件内部的热分布，激射波长红移速度相对较慢。

在实际测试时，发现 P 面双区电极结构对 kink 效应有所改善，这是因为窗口区的小电流注入，降低载流子浓度，有效地降低了折射率变化，减小了深台面对模式分布的影响。同时也对电流进行了限制，规避了高注入电流下部分载流子溢出有源区外，导致效率降低。因为台面越深，其 kink 效应[14-15]会更明显，所以本实验制备了更深台面(800 nm)的激光器，进行 P-I 测试来验证 P 面双区电极对 kink 的改善程度，结果如图 6 所示。实验表明：P 面单电极存在明显的扭折，即激光器存在 kink 现象，这说明了器件内部热效应明显，模式不稳定。而 P 面双区电极对 kink 有所改善，说明调整电流注入的分布，可以局部改变激光器的增益和折射率分布，进而控制侧向模式。



(a) P 面双区电极器件



(b) P 面单电极器件

图 6 800 nm 台深器件的 P-I 特性曲线

3 结论

本文设计并制备了一种大功率 650 nm 半导体激光器，该激光器采用 P 端电极双区的结构。在未镀膜情况下，该结构提高了器件 COMD，降低了器件阈值和波长红移速度，在 15 mA 窗口区电流的驱动下，测试结果表明双区电极的半导体激光器对比单电极半导体激光器能够提高 COMD 阈值约 13%、峰值功率 12%，降低阈值电流 20%，利用窗口区的小电流注入，改善了 kink 现象，激光器具备更稳定的导引机制，这说明设计的新结构是合理的。

参考文献：

[1] 朱 振，肖成峰，夏 伟，等. 大功率 640 nm 红光半导体激光器的设计及制备[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(8)：344-348.
Zhu Zhen，Xiao Chengfeng，Xia Wei，et al. Design and fabrication of high power 640 nm red laser diodes[J]. Laser and Optoelectronics Progress，2018，55(8)：344-348.

[2] He T，Liu S，Li W，et al. Research on quantum well intermixing of 680 nm AlGaInP/GaInP semiconductor lasers induced by composited Si-Si_3N_4 dielectric layer [J]. J.

Semicond.，2022，43(8)：082301.

[3] Avrutin E A，Ryvkin B S. Semiconductor laser design with an asymmetric large optical cavity waveguide and a bulk active layer near p-cladding for efficient high-power red light emission [J]. Semicond. Sci. Technol.，2022，37(12)：125002.

[4] Tomm J W，Hempel M，Krakowski M，et al. Mechanisms and kinetics of the catastrophic optical damage (COD) of high power semiconductor lasers[C]// Photonics Society Summer Topical Meeting Series，2012：51-52.

[5] Naito H，Nagakura T，Torii K，et al. Long-term reliability of 915 nm broad-area laser diodes under 20 W CW operation[J]. IEEE Photonics Technol. Lett.，2015，27(15)：1-1.

[6] 宋　悦，宁永强，秦　莉，等. 大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述[J]. 半导体光电，2020，41(5)：618-626.

Song Yue，Ning Yongqiang，Qin Li，et al. Review on the methods of preventing catastrophic optical mirror damage in high-power diode lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(5)：618-626.

[7] Tomm J W，Ziegler M，Hempel M，et al. Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage (COD) in GaAs-based diode lasers[J]. Laser Photonics Rev.，2011，5(3)：422-441.

[8] Kressel H，Mierop H. Catastrophic degradation in GaAs injection lasers[J]. J. Appl. Phys.，1967，38(13)：5419-5421.

[9] Eliseev P G. Degradation of injection lasers[J]. J. Lumin.，1973，7：338-356.

[10] Henry C H，Petroff P M，Logan R A，et al. Catastrophic damage of $Al_xGa_{1-x}As$ double-heterostructure laser material [J]. J. Appl. Phys.，1979，50(5)：3721-3732.

[11] 罗　丹，徐　晨，郭伟玲，等. LD 条宽对激射波长影响的研究[J]. 光电子·激光，2007，18(9)：1033-1035.

Luo Dan，Xu Chen，Guo Weiling，et al. Effect of LD strip widthes on the lasing wavelengthes[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2007，18(9)：1033-1035.

[12] Henry C H，Petroff P M，Logan R A，et al. Catastrophic damage of $Al_xGa_{1-x}As$ double heterostructure laser material [J]. J. Appl. Phys.，1979，50(5)：3721-3732.

[13] Yamamura S，Hanamaki Y，Kawasaki K，et al. A very low failure rate of COD free high power 0.98 μm laser diode with the window structure[C]// Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition，2000：162-164.

[14] 邹德恕，廉　鹏，徐　晨，等. 量子阱半导体激光器 *P-I* 特性曲线扭折的研究[J]. 光电子·激光，2002，13(6)：547-549.

Zou Deshu，Lian Peng，Xu Chen，et al. Study on kinks in *P-I* characteristic curves of semiconductor quantum-well stripe geometry lasers[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2002，13(6)：547-549.

[15] 王立军，宁永强. 高功率半导体激光器[M]. 北京：国防工业出版社，2016.

Wang Lijun，Ning Yongqiang. High Power Semiconductor Lazor[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2016.

作者简介：

闫博昭(2000—)，男，吉林省人，硕士研究生，主要从事大功率半导体激光器的研究；

崔碧峰(1972—)，女，博士，副教授，主要研究方向为大功率边发射半导体激光器及其阵列设计与制备。