

极低内部光学损耗 975 nm 半导体激光器

曼玉选^{1,3}, 仲莉^{1*}, 马晓宇^{1,2}, 刘素平¹

¹中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

³中国科学院大学电子电器与通信工程学院, 北京 100049

摘要 通过对波导结构和 P 包层的掺杂分布进行优化, 减少了光场与 P 包层掺杂区的交叠, 从而减小了半导体激光器的内部光学损耗。同时使用宽带隙 GaAsP 作为势垒层可以减少有源区载流子泄露, 实现了内部光学损耗为 0.259 cm^{-1} 。所制备的 975nm 波长、100 μm 条宽、4 mm 腔长单管器件, 在室温下器件的连续输出光功率达到 21 W。当输出功率为 20 W 时, 功率转换效率仍大于 50%。

关键词 激光器; 内损耗; 高功率; 非对称; 掺杂

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1914001

975 nm Semiconductor Lasers with Ultra-Low Internal Optical Loss

Man Yuxuan^{1,3}, Zhong Li^{1*}, Ma Xiaoyu^{1,2}, Liu Suping¹

¹National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By optimizing the doping distribution of the waveguide structure and the P-cladding layer, the overlap between the optical field and the P-cladding layer doped area is reduced, thereby reducing the internal optical loss of the semiconductor laser. At the same time, the use of wide band gap GaAsP as the barrier layer reduces the carrier leakage in the active region and achieves an internal optical loss of 0.259 cm^{-1} . The prepared single emitter device with a wavelength of 975 nm, a stripe width of 100 μm and a cavity length of 4 mm has a continuous-wave output optical power of 21 W at room temperature. When the output power is 20 W, the power conversion efficiency is still greater than 50%.

Key words lasers; internal loss; high power; asymmetric; doping

OCIS codes 140.2020; 140.3070; 140.3290; 140.3295

1 引 言

9 \times 9 nm 波段的半导体激光器在医疗、信息、材料加工和处理等领域有着广泛的应用^[1-3]。输出功率是衡量单管器件性能优劣的指标之一。较高的输出功率意味着激光器系统材料处理能力的提升和投入成本的下降^[4]。提高单管器件的输出功率是相关研究人员一直追求的目标之一。腔内损耗是制约半导体激光器连续工作时输出高功率的重要因素。为了降低器件的串联电阻, 通常对 P 型包层进行重掺杂, 然而重掺杂区的自由载流子与光子的相互作用

引起光吸收损耗, 这部分的光吸收损耗占腔内总损耗的一半以上^[5]。因此减小腔内损耗对器件输出功率的提升大有裨益。

为了获得较小的腔内损耗和稳定的高功率输出, 优化器件波导结构和掺杂分布是设计的主要方向。2009 年, 德国 FBH 研究所的 Crump 等^[6]通过优化波导结构的 Al 组分制作了 980 nm 单管器件, 器件的内部损耗约为 1 cm^{-1} , 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 测试条件下无损坏连续输出功率达到 20 W。2015 年, 日本 Optoenergy 公司通过优化有源区在波导层中的位置制作出 915 nm 单管, 室温下的最大输出功率为

收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-06-11

* E-mail: zhongli@semi.ac.cn

24 W^[7]。2013年,北京工业大学的李建军等^[8]通过优化波导层厚度制作出 980 nm 单管,器件的内部损耗为 1.45 cm⁻¹,在室温、脉冲工作条件下的最大输出功率为 23.6 W。2018年,深圳清华大学研究院的仇伯仓等^[9]对外延结构进行了优化制作的 915 nm 单管器件,室温下的连续最大输出功率达 18.1 W。2019年,中国工程物理研究院应用电子学研究所的 Zhou 等^[10]通过调整有源区位置制作出 976 nm 单管,器件的内部损耗为 0.27 cm⁻¹,室温下的最大连续输出功率仅为 10 W。

本文从分析限制半导体激光器输出功率的因素出发,通过优化波导结构和 P 型包层中的掺杂分布,结合优异的外延生长工艺技术和完备的芯片制备工艺,制作出中心波长为 975 nm 的 InGaAs/GaAsP 双量子阱半导体激光器,其条宽为 100 μm,腔长为 4 mm。实现了极低内损耗 0.259 cm⁻¹、最大连续输出功率 21 W 的半导体激光器单管。

2 基本原理

当工作电流大于阈值电流时,半导体激光器的输出功率可以表示为^[11]

$$P = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}), \quad (1)$$

式中: η_d 为外微分量子效率; h 为普朗克常数; ν 为光子频率; I 为工作电流; I_{th} 为阈值电流; η_i 为内量子效率; α_i 为内部损耗; α_m 为腔面损耗。由(1)式可以看出,降低器件的内部损耗和提高内量子效率可以有效提高器件的输出功率。半导体激光器中由散射和载流子吸收造成的内部损耗可以表示为^[12]

$$\alpha_i = \sum \Gamma_{layer} (\sigma_n n_{layer} + \sigma_p p_{layer}), \quad (2)$$

式中: Γ_{layer} 为波导某层中的光学限制因子; σ_n 和 σ_p 为电子和空穴的散射截面; n_{layer} 和 p_{layer} 为该层中的电子和空穴浓度。由(2)式可以看出,激光腔内损耗依赖于模式的限制因子和该层中的载流子浓度,所以减小损耗需要将限制因子和载流子浓度设定在较低水平。掺杂浓度对内损耗影响显著,因为空穴对光子的吸收系数远大于电子对光子的吸收系数,由 P 型掺杂区引起的内部损耗高于 N 型掺杂区引起的损耗。另外,大电流工作下有源区中数量可观的载流子发生泄露,会对有源区中的辐射复合效率产生不利影响,而且泄露出去的载流子与光子发生相互作用,增加了额外的光学损耗^[4]。

首先,通过调整有源区在波导层中的位置以及包层中的 Al 组分,在非对称波导结构中增加 P 型波导层和 P 型包层的折射率差值,减小光场与 P 型掺杂区的交叠,使得光场更多地进入 N 型非掺杂区。所设计的 InGaAs/GaAsP 双量子阱波导结构采用大光腔结构,其波导宽度为 1.6 μm。大光腔结构能够实现腔面处较小的光功率密度,提高腔面灾变性光学损伤阈值^[13]。P 型包层折射率与波导层折射率的差值是 N 型包层折射率与波导层折射率差值的 4.77 倍,减少了光场在 P 型包层的分布。如图 1 所示,图中实线 1 是 P 型包层与 N 型包层折射率不相同时的折射率和光场分布,划线 2 是 P 型包层与 N 型包层折射率相同时的折射率和光场分布。P 型包层的光限制因子由 6.01% 降至 1.14%,通过调节 Al 组分含量降低 P 型包层的折射率,可以显著减少光场与 P 型包层的交叠,减小光子吸收损耗。

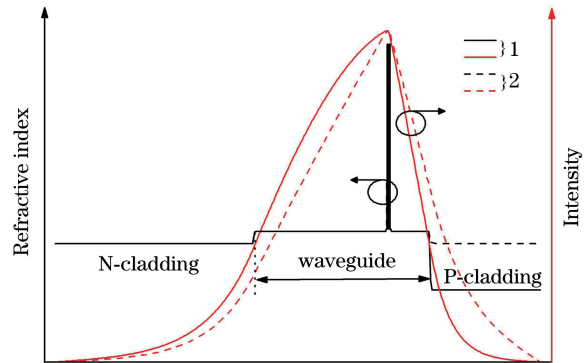


图 1 非对称大光腔结构的折射率和光场分布
Fig. 1 Refractive index and light field distribution of asymmetric large optical cavity

其次,在权衡器件串联电阻和内损耗的基础上优化掺杂水平。采用波导层不掺杂、包层梯度掺杂的设计,避免部分泄露光子与重掺杂区的相互作用,减小内部光学损耗。外延结构中各层的掺杂浓度如表 1 所示。在包层中靠近有源区一侧的掺杂浓度小于 10¹⁸ cm⁻³,进入包层中的光场和轻度掺杂区发生交叠。P 包层剩余厚度的掺杂浓度高达 10¹⁹ cm⁻³,提高掺杂浓度是减小器件串联电阻最有效的方法,在远离有源区的区域重度掺杂既可以减小器件的串联电阻,也避免了因光场与重掺杂区的相互交叠导致的光吸收损耗。图 2 是计算的 P 包层分别使用恒定掺杂(掺杂浓度为 1×10¹⁸ cm⁻³)和梯度掺杂时的空穴浓度。使用梯度掺杂使 P 包层中的空穴浓度保持在较低水平,能够有效减小发生在包层中的自由载流子损耗。

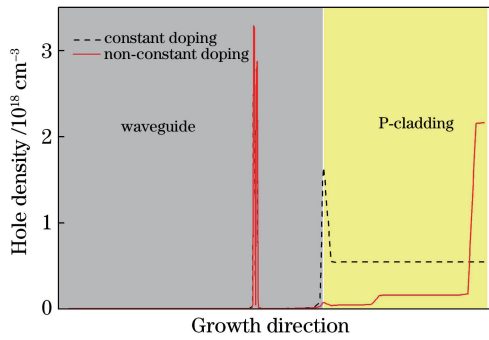


图 2 计算的非对称大光腔结构中的空穴浓度
Fig. 2 Calculated hole density in asymmetric large optical cavity

表 1 外延结构中各层的掺杂浓度

Table 1 Doping concentration of each layer in epitaxial structure

Layer type	Doping / (10 ¹⁸ cm ⁻³)
Contact	C: 100
	C: 10
P-cladding	C: 0.2
	C: 0.05
Waveguide	Undoped
Quantum well	Undoped
Waveguide	Si: 0.01
	Si: 0.07
N-cladding	Si: 0.2
	Si: 0.5
Buffer	1
Substrate	2

最后,优化势垒高度,提高对载流子的限制,减小因载流子泄露带来的不利影响。图 3 是有源区中势垒层分别使用 GaAs 和 GaAsP 材料时的能带结构示意图。GaAs 材料的禁带宽度为 1.424 eV,使用的 GaAsP 材料的禁带宽度为 1.739 eV。有源区使用 GaAsP 材料作为势垒层,宽带隙的 GaAsP 层

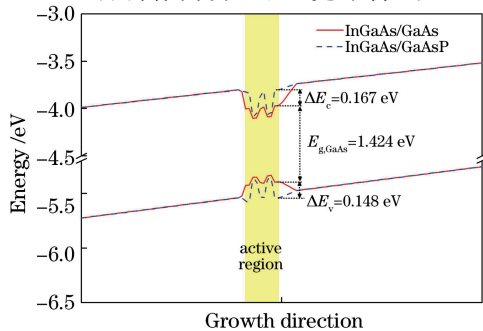


图 3 热平衡状态下的能带结构示意图
Fig. 3 Schematic of energy band structure in thermal equilibrium

具有较高的势垒高度,有源区中载流子越过势垒需要更高的能量,因此能够有效抑制有源区中的载流子泄露,减小因载流子泄露造成的光学损耗。

3 器件制备

使用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术进行 InGaAs/GaAsP 芯片的垂直结构生长。外延结束后,进行普通光刻和湿法腐蚀形成宽度为 100 μm 的台面,再使用等离子增强型化学气相沉积(PECVD)生长 150 nm 厚的 SiO₂ 绝缘介质膜并通过光刻和刻蚀形成 96 μm 的电流注入窗口,接着进行热蒸发 Ti/Pt/Au 作为 P 面电极金属层,然后衬底减薄至 120 μm 后溅射 AuGeNi/Au 形成 N 面电极金属层,合金退火后完成圆片的制备。将圆片预解理成矩形,然后将矩形晶片在高真空中解理成 bar 条并做腔面钝化,钝化材料为 ZnSe^[14]。然后在前腔面蒸镀 Al₂O₃ 形成增透膜(反射率为 2.5%),后腔面蒸镀 6 对 TiO₂/SiO₂ 形成高反膜(反射率为 98%),接着将 bar 条解理成单管芯片。使用 AuSn 焊料将芯片 P 面向下烧结在 AlN 过渡热沉上,形成 COS(Chip-on-Submount)结构,然后在 N 面引线键合金丝,之后对该器件的相关光电特性进行测试和评估。

4 分析与讨论

在室温脉冲条件下(50 μs, 100 Hz)下,测量了不同腔长未镀膜器件的斜率效率 E_s。根据测量数据,使用下式拟合出内量子效率和内损耗。

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left[1 + \frac{\alpha_i}{\ln(1/R)} L \right], \quad (3)$$

式中: $\eta_d = \frac{E_s}{1.24/\lambda}$; L 为器件的腔长; R 为腔面反射率(取值为 0.32)。

如图 4 所示,拟合得到器件的内量子效率为 90.97%,内损耗仅为 0.259 cm⁻¹。结果表明,使用宽带隙 GaAsP 作为有源区势垒有效地抑制了自由载流子的泄露,而且非对称大光腔结构结合包层梯度掺杂极大地减小了包层中的自由载流子吸收损耗。同时,高质量的材料外延生长技术确保了结构设计思想的实现。

图 5 是不同腔长器件的阈值电流和阈值电流密度的关系曲线。随着器件腔长的增加,阈值电流逐渐增加,阈值电流密度逐渐下降。在本文制作的器件中,腔长为 4500 μm 的器件的阈值电流密度最小,其值为 220 A/cm²。

图 6 是在室温、连续波驱动条件下测量 100 μm

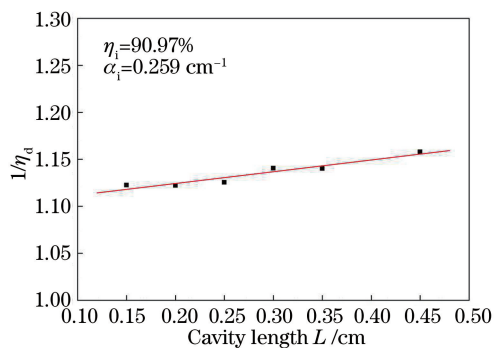


图 4 外微分量子效率倒数与腔长的关系图

Fig. 4 Relationship between inverse external differential quantum efficiency and cavity length

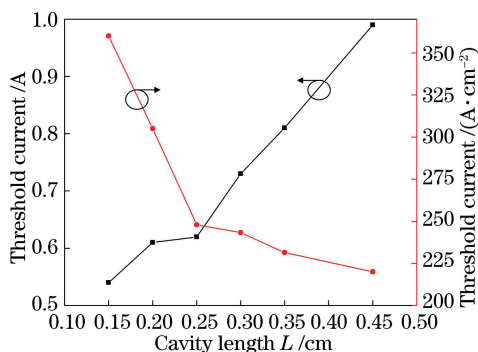


图 5 阈值电流和阈值电流密度与腔长的关系曲线

Fig. 5 Curves of threshold current and threshold current density with cavity length

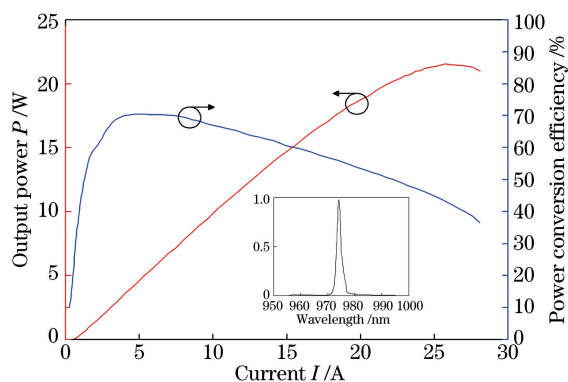


图 6 腔长为 4 mm、条宽为 100 μm 的宽条激光器的光电特性(插图为输出功率 21 W 时的光谱)

Fig. 6 Optical and electrical characteristics for 4 mm broad area lasers with 100 μm stripe width (insert is the spectrum at output power of 21 W)

条宽、4 mm 腔长的激光器光电特性曲线。受限于热饱和,当注入电流为 26 A 时,获得器件的最大输出功率为 21 W。当输出功率为 5.1 W 时,最大电光转换效率为 70%,器件输出功率为 20 W 时的功率转换效率仍大于 50%。插图为输出功率为 21 W 时器件的光谱特性,峰值波长为 975 nm,光谱的半

峰全宽(FWHM)为 2.7 nm。

5 结 论

本文通过增加 P 型波导层和 P 型包层折射率差值,减少光场与 P 包层的交叠,同时包层采取梯度掺杂,包层中的空穴浓度保持在较低水平,减小了载流子的光吸收损耗。并且使用宽带隙材料 GaAsP 作为势垒层,有效抑制了有源区载流子的泄露。结合优异的 MOCVD 外延生长技术和完备的器件制备工艺,制作出中心波长为 975 nm 的半导体激光器单管器件,内部光学损耗为 0.259 cm⁻¹。在室温下条宽为 100 μm、腔长为 4 mm 的单管器件的连续输出功率达到 21 W(受限于热饱和),当输出功率为 5.1 W 时,最大电光转换效率为 70%。通过优化芯片的散热条件和封装方式,器件的性能有望得到进一步提升。

参 考 文 献

- [1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, et al. Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [2] Ma X Y, Wang J, Liu S P. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 189-194.
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-194.
- [3] 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.
- [4] Crump P, Wenzel H, Erbert G, et al. Progress in increasing the maximum achievable output power of broad area diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 82410U.
- [5] Wang Z F, Yang G W, Wu J Y, et al. High-power, high-efficiency 808 nm laser diode array [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(16): 164203.
王贞福, 杨国文, 吴建耀, 等. 高功率、高效率 808 nm 半导体激光器阵列 [J]. 物理学报, 2016, 65(16): 164203.
- [6] Crump P, Blume G, Paschke K, et al. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of

- 96 μm [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7198: 719814.
- [7] Yamagata Y, Yamada Y, Muto M, et al. 915 nm high-power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480F.
- [8] Li J J, Cui B F, Deng J, et al. 980 nm high power semiconductor laser with asymmetric super large optical cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102011.
李建军, 崔碧峰, 邓军, 等. 非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102011.
- [9] Qiu B C, Hu H, Wang W M, et al. Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers [J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 590-603.
仇伯仓, 胡海, 汪卫敏, 等. 12 W 高功率高可靠性 915 nm 半导体激光器设计与制作 [J]. 中国光学, 2018, 11(4): 590-603.
- [10] Zhou K, Du W C, Li Y, et al. Suppression of higher-order modes in a large-optical-cavity waveguide structure for high-power high-efficiency 976 nm diode lasers[J]. Superlattices and Microstructures, 2019, 129: 40-46.
- [11] Coldren L A, Corzine S W, Mašanović M L. Diode lasers and photonic integrated circuits [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [12] Slipchenko S O, Vinokurov D A, Pikhtin N A, et al. Ultralow internal optical loss in separate-confinement quantum-well laser heterostructures[J]. Semiconductors, 2004, 38(12): 1430-1439.
- [13] Erbert G, Bärwolff A, Sebastian J, et al. High-power broad-area diode lasers and laser bars [M] // Topics in Applied Physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 173-223.
- [14] Wang X, Zhu L N, Zhao Y H, et al. 915 nm semiconductor laser new type facet passivation technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0105002.
王鑫, 朱凌妮, 赵懿昊, 等. 915 nm 半导体激光器新型腔面钝化工艺 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0105002.