

实用化 1730nm 波段掩埋结构半导体激光器的研制

林 涛[†] 郑 凯 王翠鸾 王 俊 王勇刚 仲 莉 冯小明 马晓宇

(中国科学院半导体研究所 光电子器件工程中心, 北京 100083)

摘要:报道了应用于医疗器械的 InP 基 1730nm 波段半导体激光器. 外延片采用低压金属有机物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长, 有源区为 5 个周期的 InGaAs 量子阱层和 InGaAsP 垒层. 器件采用 pnpn 结限制掩埋结构, 有源区脊宽 2 μm 、腔长 300 μm . 室温下腔面镀膜后激光器管芯的阈值电流为 18 $\pm$ 5mA, 8mW 输出功率时的工作电流为 60 $\pm$ 5mA. 采用 TO 封装后, 100mA 工作电流下激光器的输出功率大于 5mW, 输出波长为 1732 $\pm$ 10nm, 高温恒流加速老化筛选实验表明, 器件具有长期工作的可靠性, 满足实用化要求.

关键词:金属有机物化学气相沉积; 半导体激光器; 1730nm 波段; 磷化铟

PACC: 4255P; 8160C

EEACC: 4320J; 2520D

中图分类号: TN248. 4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)08-1467-04

1 引言

InGaAsP 材料常被用来制作用于光纤通信领域的 1.31 μm 和 1.55 μm 半导体激光器. 近年来, 随着 1.6~2.1 μm 波段半导体激光器在遥感测试、污染探测、掺 Ho 固体激光器泵浦源、分子光谱测量、医学及医疗器械方面的广泛应用^[1], InGaAsP 应变量子阱激光器的工作波长也拓宽到这一波长范围.

要实现 1.6~2.1 μm 波段的激光输出, 通常可采用以下几种方案: InP 基大应变 InGaAs(P) 或 InGa(Al)As 量子阱结构半导体激光器^[2,3], GaSb 基铋化物应变量子阱结构半导体激光器^[4] 以及光纤激光器^[5]. 相比后两种方案, 采用 InGaAs(P) 或 InGa(Al)As 结构更容易实现室温、连续可靠的工作, 同时还可以直接采用 1.31 μm 和 1.55 μm 波段的 InGaAsP 激光器的制作工艺, 大大降低了制作难度和成本, 促进了该波段激光器的实用化发展.

自 1992 年加州理工学院首次报道室温脉冲工作的 1.8 μm InP 基半导体激光器以来^[6], 国际上中红外波段半导体激光器的研究工作得到快速发展, 但国内开展此项工作的单位相对较少. 2001 年, 中国科学院上海光机所和上海微系统与信息技术所联合报道了 GSMBE 生长的 InP 基 1.8~2.0 μm 波段 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器, 该类器件可以在 77K 下脉冲激励^[7]. 同年, 他们又报道了室温脉冲工作的 1.84 μm InGaAs/InGaAsP 应变量子阱

激光器^[8]. 2004 年, 中国科学院半导体研究所报道了室温连续工作的 1.78 μm DFB 半导体激光器的实验研究^[9]. 最近, 国外一些公司研制了一种非侵害式的血糖测试仪, 该仪器中采用输出波长为 1732 $\pm$ 10nm 的半导体激光器作为扫描光源. 该应用不仅要求激光器能室温连续工作, 同时还要求激光器输出功率大、波长准确、可靠性高, 目前国内各半导体激光器制造厂家均未推出相关产品. 相比国内此前的研究报道, 本文首次报道了用于医疗器械的室温连续工作的 1730nm 波段掩埋结构半导体激光器. 激光器外延片通过低压 MOCVD 技术多次外延生长而成, 有源区采用部分应变补偿的 InGaAs(P) 量子阱结构. 室温下, 制作的 50 只 TO 封装的半导体激光器其阈值电流约为 18 $\pm$ 5mA, 斜率效率约为 0.08W/A, 100mA 工作电流下输出功率大于 5mW, 光谱半宽小于 6nm, 所有器件均通过了 24h 的老化筛选, 满足应用要求.

2 材料生长及器件制作

实验中采用低压 MOCVD 外延技术进行材料生长, 设备为 Aixtron AIX200 R & D 系统, 生长时的载气为 H₂, 反应室的压力为 2000Pa. 系统采用 IR 灯照射加热方式, 生长温度由置于基座中心的热电偶探测. 外延层生长前, 反应室中通入磷烷 (PH₃) 气体进行保护, 采用 n 型 InP 衬底 (100) 面生长外延层. 生长中的 In 源为三甲基铟 (TMIn), Ga 源为三

[†] 通信作者. Email: lintao@red.semi.ac.cn

甲基镓(TMGa), V族源为 100 %的 PH_3 和 100 %的砷烷(AsH_3), p 型和 n 型掺杂剂分别为二乙基锌(DEZn)和 2 %的硅烷(SiH_4).

图 1 为 1730nm 波段半导体激光器结构示意图. 激光器外延片采用三次外延方法生长, 一次外延是在 InP 衬底上依次生长 0.5 μm 的 n 型 InP 限制层; 90nm 的 InGaAsP($\lambda=1.3\mu\text{m}$) 下波导层; 5 个周期的应变量子阱有源区(其中阱区采用 InGaAs, 垒区采用 InGaAsP); 然后生长 90nm 的 InGaAsP($\lambda=1.3\mu\text{m}$) 上波导层和 200nm 的 p 型 InP 限制层. 一次外延完成后, 对外延片进行双晶 X 射线衍射测试和室温 PL 谱测试. 二次外延前, 首先采用等离子增强化学气相沉积法在外延片上生长 200nm 的 SiO_2 层, 然后利用紫外光刻和湿法腐蚀工艺刻蚀出有源区条形, 并保证有源区条宽约为 2 μm . 二次外延是在有源区两侧依次生长 1 μm 的 p 型 InP 和 1 μm 的 n 型 InP. 最后去掉实验片表面的 SiO_2 层, 以便进行三次外延. 三次外延主要是生长 2 μm 的 p 型 InP 限制层和 200nm 的 p 型 InGaAs 上接触层. 其中 p 型 InP 层不仅用作激光器的上限制层, 同时还可以和二次外延的 InP 层构成 pnpn 结构, 限制有源区的载流子和光子泄漏.

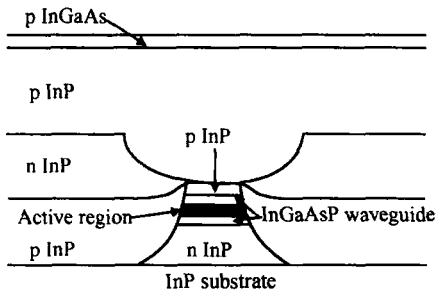


图 1 1730nm 波段半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1730nm waveband laser diode

半导体激光器外延片生长完毕后, 通过磁控溅射方法制作 p 面 TiPtAu 电极; 通过真空蒸发方法制作 n 面 AuGeNi 电极; 最后溅射 n 面厚金层来获得可靠的 n 面引线. 为了保证高的输出功率和长期工作的稳定性, 对腔长 300 μm 的激光器 bar 条端面采用电子回旋共振化学气相沉积技术镀膜, 其中出光面 $\text{AR}=30\%$, 背光面 $\text{HR}=75\%$. 解理成的管芯 p 面朝下烧结在铜热沉上, TO 封装后利用激光器综合测试仪测试其 $L-I-V$ 特性, 利用光栅光谱仪测试其光谱特性.

3 特性测试和分析讨论

合格的外延片是制作高性能激光器的根本保

证. 图 2 为激光器外延片的双晶 X 射线衍射曲线, 由图可以看出各外延层的最大晶格失配为 1361ppm, 外延片的卫星峰很强, 由卫星峰位置计算得到的有源区厚度和设计值基本相同, 双晶 X 射线衍射曲线表明外延片晶格质量很好. 图 3 为激光器外延片的室温 PL 谱曲线, 由于长波长半导体激光器外延片的均匀性要较短波长差, 我们对 50mm 外延片的中心和边沿 5mm 处分别测试了 PL 谱, 中心处的室温 PL 谱为 1.743 μm , 边沿 5mm 处为 1.723 μm , 半高全宽 (FWHM) 均为 81nm, 整个 50mm 外延片上 20nm 的波长漂移说明生长的材料具有比较好的一致性.

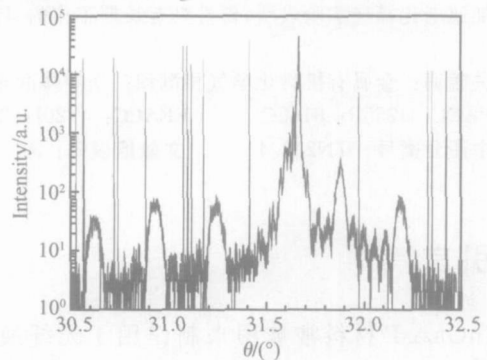


图 2 激光器外延片的双晶 X 射线衍射曲线

Fig. 2 Double crystal X-ray diffraction curve of the LD wafer

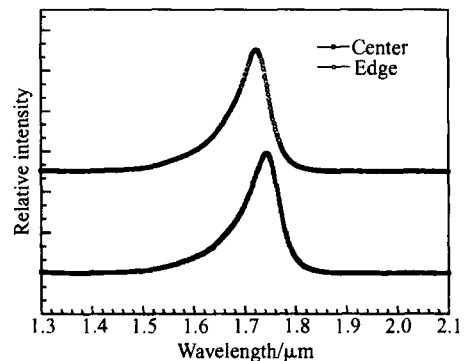


图 3 激光器外延片的室温 PL 谱曲线

Fig. 3 PL spectra of the LD wafer at room temperature

实验中制作了 50 只 1730nm 波段半导体激光器, 图 4 为典型的激光器管芯和 TO 封装后的半导体激光器的 $L-I-V$ 特性曲线. 对于封装前的激光器管芯, 其阈值电流约为 $18 \pm 5\text{mA}$, 8mW 输出功率下的工作电流约为 $60 \pm 5\text{mA}$, 工作电压为 $1.1 \pm 0.1\text{V}$, 其最大输出功率均超过 10mW, 个别管芯的热饱和输出功率可高达 20mW; 对于 TO 封装后的半导体激光器, 由于激光器管帽的光损耗, 其输出功

率和斜率效率降低, 5mW 输出功率时工作电流约为 $80 \pm 10\text{mA}$, 激光器的斜率效率也由封装前的 0.2W/A 下降到 0.08W/A 左右. 经分析可知, 造成封装后斜率效率下降的原因主要有两点: 一是由于目前没有 1730nm 波段激光器 TO 封装管帽, 所以便采用 1550nm 波段激光器管帽来替代, 这样的管帽对 1550nm 光透过率很高, 但对 1730nm 的光就产生部分光吸收, 造成封装后斜率效率下降; 此外为了同该类激光器的应用相兼容, 采用球透镜的激光器管帽, 由于球透镜直径较小 ($\Phi=1.5\text{mm}$), 同样造成了部分光损耗. 下一步准备针对 1730nm 波段应用, 重新设计加工管帽, 来提高 TO 封装器件的效率.

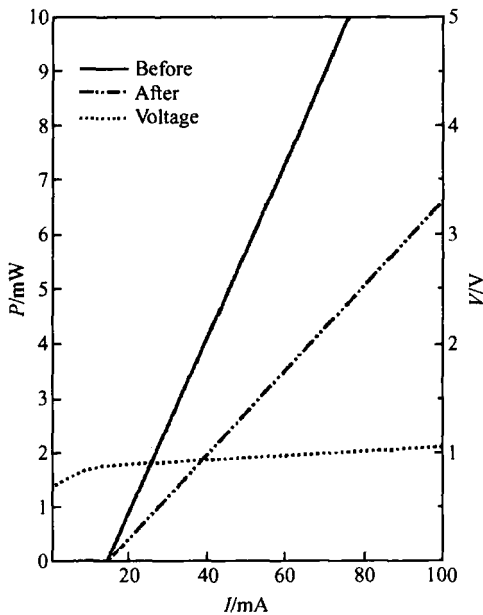


图 4 激光器管芯和 TO 封装后的半导体激光器的 L - I - V 特性曲线

Fig. 4 L - I - V characteristics of the laser diode before and after TO packaging

图 5 为典型的 TO 封装后半半导体激光器的输出光谱曲线. 光谱特性是在 25°C 下, 输出功率 5mW 时测试得到所有 50 只激光器的输出波长均满足 $1732 \pm 10\text{nm}$, 光谱半宽小于 6nm.

最后对 TO 封装后的半导体激光器进行加速老化筛选实验, 参照光通信用 1550nm 激光器的老化筛选条件, 采用相同的老化条件: 环境温度 90°C , 工作电流 100mA, 老化时间 24h. 经过 24h 老化后, 所有激光器的阈值电流以及 5mW 输出功率下的工作电流的变化均不超过 3%, 变化率与我们研发的 1550nm 激光器基本相同. 由此可以推算我们研制的 1730nm 波段激光器与通信用的 1550nm 激光器具有相同的可靠性, 可应用于医疗器械.

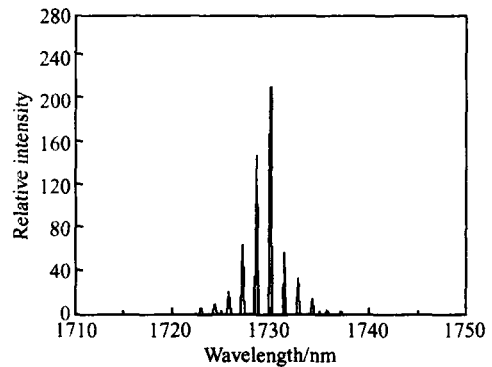


图 5 TO 封装后半半导体激光器的光谱曲线

Fig. 5 Lasing spectrum of the laser diode after TO packaging

4 结论

采用低压 MOCVD 多次外延技术生长了 1730nm 波段半导体激光器外延片. 采用该外延片制作的 TO 封装的半导体激光器其阈值电流约为 $18 \pm 5\text{mA}$, 斜率效率约为 0.08W/A , 100mA 工作电流下输出功率大于 5mW, 输出波长 $1732 \pm 10\text{nm}$, 光谱半宽小于 6nm. 高温恒流加速老化筛选实验表明, 器件具有长期工作的可靠性, 完全满足应用要求.

致谢 感谢李伟、方高瞻、张广泽、刘素平、赵玲娟、潘教青、曹青、叶晓玲等研究员的热情帮助, 感谢王丽明、王鲁峰、吕卉、蓝永生、周秀宁、李秀芳、李跃、张心、张海燕、刘艳、刘丽丽等在特性测试和器件制作方面的帮助.

参考文献

- [1] He X, Xu D, Ovtchinnikov A, et al. High power efficient GaInAsP/InP ($1.9\mu\text{m}$) laser diode arrays. *Electron Lett*, 1999, 35(4): 397
- [2] Forouhar S, Ksendzov A, Larsson A, et al. InGaAs/InGaAsP/InP strained-layer quantum well lasers at $2\mu\text{m}$. *Electron Lett*, 1992, 28(15): 1431
- [3] Kuang G K, Böhm G, Graf N, et al. High-temperature performance of InGaAs-InGaAlAs-InP $1.79\mu\text{m}$ diode lasers grown in solid-source molecular beam epitaxy. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(4): 275
- [4] Choi H K, Turner G W, Connors M K, et al. High-power, high-temperature operation of GaInAsSb-AlGaAsSb ridge-waveguide lasers emitting at $1.9\mu\text{m}$. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 7(3): 281
- [5] Nie Qihua. Fiber laser and amplifier technology. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997 (in Chinese) [聂秋华. 光纤激光器和放大器技术. 北京: 电子工业出版社, 1997]

- [6] Forouhar S, Larsson A, Ksendzov A, et al. Room-temperature operation of MOCVD-grown GaInAs/InP strained-layer multi-quantum well lasers in 1.8 μm range. *Electron Lett*, 1992, 28(10): 945
- [7] Bai Jinsong, Fang Zujie, Zhang Yunmei, et al. GSMBE-grown 1.8 ~ 2.0 μm waveband InGaAs/InGaAsP strained quantum well lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(1): 40 (in Chinese) [柏劲松, 方祖捷, 张云妹, 等. GSMBE 生长 1.8 ~ 2.0 μm 波段 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器. *半导体学报*, 2001, 22(1): 40]
- [8] Bai Jinsong, Fang Zujie, Zhang Yunmei, et al. GSMBE-grown InGaAs/InGaAsP strained quantum well lasers at 1.84 micron wavelength. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(2): 126
- [9] Wang Shurong, Wang Hui, Wang Baojun, et al. 1.78 μm strained InGaAs-InGaAsP-InP distributed feedback quantum well lasers. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, 15(8): 906

Fabrication of Practical 1730nm Waveband Laser Diodes with Buried Heterojunction Structures

Lin Tao[†], Zheng Kai, Wang Cuiluan, Wang Jun, Wang Yonggang, Zhong Li, Feng Xiaoming, and Ma Xiaoyu

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

Abstract: 1730nm wavelength semiconductor laser diodes (LDs) for use in medical appliances are reported. The LD structure is grown by low-pressure MOCVD, and the active region consists of five periods of InGaAs quantum wells and InGaAsP quantum barriers. The LD has a pnpn-confined buried heterojunction structure, whose ridge width and cavity length are 2 μm and 300 μm , respectively. After facet coating, the threshold current of the LDs is about 18 $\pm$ 5 mA at room temperature, and the operating current is about 60 $\pm$ 5 mA at an output power of 8 mW. For the TO-packaged LDs, the output power is over 5 mW under a 100 mA operating current, and the output wavelengths are 1732 $\pm$ 10 nm. The results of high-temperature, constant-current accelerated aging show that the LDs are reliable over long operation periods and could have practical applications.

Key words: MOCVD; semiconductor laser diode; 1730nm waveband; InP

PACC: 4255P; 8160C **EEACC:** 4320J; 2520D

Article ID: 0253-4177(2006)08-1467-04

[†] Corresponding author. Email: lintao@red.semi.ac.cn