

大功率 GaInP/AlGaInP 半导体激光器*

徐 云^{1,†} 郭 良^{1,2} 曹 青^{1,2} 宋国峰¹ 甘巧强¹ 杨国华¹ 李玉璋^{1,2} 陈良惠¹

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 惠州市中科光电有限公司, 惠州 516023)

摘要: 制备了大功率实折射率 GaInP/AlGaInP 压应变分别限制量子阱激光器. 所用外延材料在 15° 偏角的 GaAs 衬底上由有机金属气相外延一次外延生长得到. 制备的激光器具有双沟脊波导结构, 条宽和腔长分别为 3 和 900 μm , 前后端面分别蒸镀 5% 的增透膜和 95% 的高反膜. 分析了室温连续激射时激光器的光电输出性能. 阈值电流的典型值为 32mA, 光学灾变阈值为 88mW, 功率为 80mW 时的工作电流为 110mA, 斜率效率为 1W/A, 串联电阻为 3 Ω . 基横模光输出功率可达 60mW, 60mW 时的平行结和垂直结的远场发散角分别为 10° 和 32°, 激射波长为 658.4nm. 器件的内损耗为 4.1 cm^{-1} , 内量子效率达 80%, 透明电流密度为 648A/ cm^2 .

关键词: 半导体激光器; AlGaInP 可见光激光器; 应变量子阱

PACC: 7340L; 4255P; 8160C

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)11-2213-05

1 引言

半导体激光器在光存储、光通信、医疗和国防等方面有广泛的应用和良好的发展前景. 激射波长位于 650nm 的红光 GaInP/AlGaInP 半导体激光器于 1985 年首次实现室温连续激射^[1], 填补了半导体激光器在可见光波段的空白. 因其体积小、重量轻、寿命长、发光效率高、波长短、存储密度高等优点而在很多应用领域替代了传统的 He-Ne 激光器和 GaAs/AlGaAs 半导体激光器, 目前已广泛应用于激光打印机、光盘放送及 DVD (digital video system) 中, 并成为高密度数字影碟工业使用的标准读写光源^[2].

在高密度数字存储的应用中, 通常功率小于 5mW 的 GaInP/AlGaInP 激光器只能用于数据读取, 而光盘写入的功率需要高于 30mW. 目前国际上能提供大功率高性能产品的有 Sanyo, Matusushita, Mitsubishi 等公司, 光输出功率最高的是 Sanyo 公司于 2004 年报道的超过 200mW 脉冲光功率 (脉宽: 100ns; 重复频率: 5MHz)^[3]. 国内, 5mW 的 Al-

GaInP 红光激光器于 1996 年在中国科学院半导体研究所首次研制成功^[4], 2004 年室温连续光输出功率超过 40mW^[5]. 本文在原有工作的基础上, 成功研制出基横模达 60mW 的 AlGaInP 压应变分别限制量子阱激光器, 并对激光器的光输出特性进行了测试和分析.

2 外延生长及器件制备

GaInP/AlGaInP 压应变分别限制量子阱激光器的材料是由 MOCVD 一次外延生长得到的, 有源区采用压应变可以使阈值电流和工作电流降低的同时效率提高^[6]. 由于 GaInP 和 AlGaInP 材料在 MOCVD 外延过程中很容易形成亚稳态的有序结构^[7,8], 在激光器中应尽量避免, 并且无序结构有更窄的增益谱线宽^[9]. 为了避免 GaInP/AlGaInP 材料在 MOCVD 生长中形成有序结构, AlGaInP 量子阱激光器一般采用偏角的 GaAs 衬底^[10]. 偏角衬底还可以提高限制层中 p 型掺杂浓度, 从而增加有源区中电子的有效势垒, 减少载流子的泄漏^[11], 有利于提高器件的高温工作性能. 具体的材料生长过程如

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA313050)

† 通信作者. Email: xuyun@red.semi.ac.cn

2005-04-11 收到, 2005-05-24 定稿

下,在(100)面偏 111 A 方向 15 的 n^+ 衬底上依次生长:掺 Si 的 GaAs 和 GaInP 缓冲层;掺 Si 的 $(Al_{0.9}Ga_{0.1})_{0.5}In_{0.5}P$ 下限制层;不掺杂的 GaInP/AlGaInP 有源区;掺 Zn 的 $(Al_{0.9}Ga_{0.1})_{0.5}In_{0.5}P$ 上限制层,其间在距有源区约 $0.3\mu m$ 处插入一层 GaInP 腐蚀停止层;掺 Zn 的 GaInP 缓冲层;重掺 Zn 的 GaAs 欧姆接触层.

外延材料的质量常用光致发光谱 (photoluminescence) 的相对峰值发光强度和半峰宽 (FWHM) 来检测. 发光强度越强,表明发光效率越高,材料内部的非辐射复合中心越少;半宽越窄表明材料的平整性越好,光学质量高. 外延材料的室温光致发光谱如图 1 所示,峰值波长和半宽度分别为 647.5 和 17.5nm. 外延材料的晶格常数及应变常用双晶 X 射线衍射 (XRD) 来测试, XRD 中最重要的参数是衍射峰的角度位置 2θ 和半宽高 (FWHM), 峰值位置体现了衍射法线方向和晶面间距,当晶面间距 d_{hkl} 和

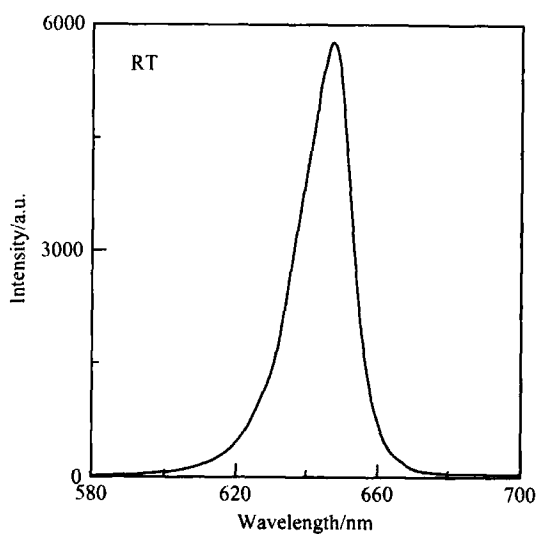


图 1 室温 GaInP/AlGaInP 外延材料的光致发光谱

Fig. 1 RT PL spectrum of GaInP/AlGaInP epilayer

入射角 满足 Bragg 衍射条件 $2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$ 时,将出现该晶面的衍射峰, n 为衍射级数, λ 为入射光波长. 由测试得到的 2θ 角和某一晶格结构的晶面间距公式可求出材料的晶格常数及匹配情况. 图 2 是外延材料的 X 射线双晶衍射摇摆曲线,右边强度最大的一个峰是 GaAs 衬底材料的衍射峰,左边略低的一个峰是 GaInP 外延层的衍射峰,可以看出,两者的半高宽相当接近,表明外延材料晶格十分完整,两者的间距反映了外延层与衬底的失配度,从这个衍射角的变化可以推出失配度约为 0.7%. 电化学测试

($C-V$) p 型掺杂浓度随外延片深度的变化如图 3 所示,其中 p 型 AlGaInP 限制层的掺杂浓度为 $1 \times 10^{18}/cm^{-3}$.

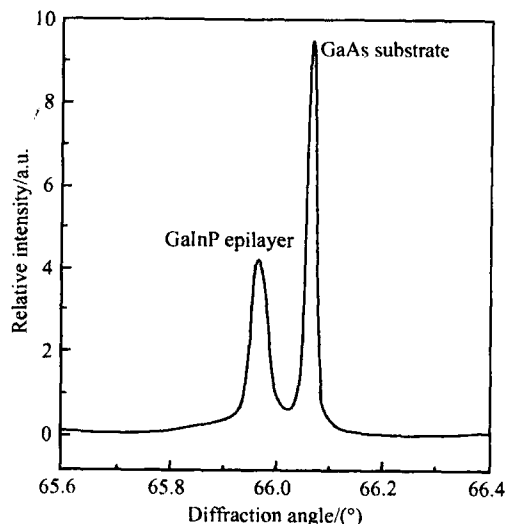


图 2 GaInP/AlGaInP 外延材料的双晶衍射摇摆曲线

Fig. 2 XRD pattern of the GaInP/AlGaInP epilayer grown on GaAs substrate

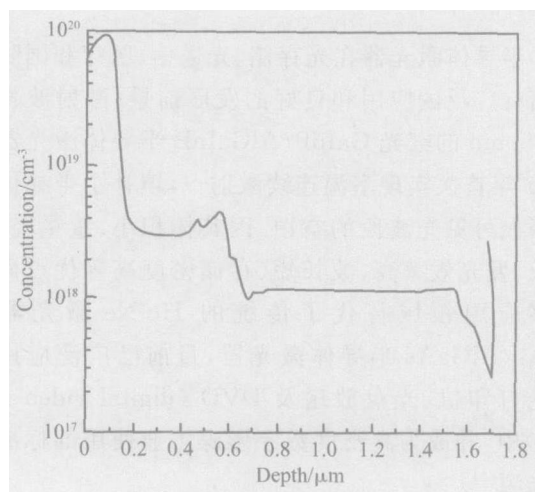


图 3 电化学 $C-V$ 测试结果

Fig. 3 $C-V$ measurement result

外延生长材料,采用传统化学腐蚀方法腐蚀出双沟正台面条形,器件采用双沟脊形波导条形激光器是为了实现大功率基横模工作和降低寄生电容,器件结构图同文献[5]. 脊形台面宽度为 $3\mu m$,脊形台面制备完成后,用 PECVD 的方法在表面淀积一层 SiO_xN_y 做为电隔离绝缘层,在 p 面用磁控溅射的方法蒸发 Ti/Pt/Au,将片子减薄到 $100\mu m$ 左右,抛光后在 n 面蒸发 AuGeNi/Au 后进行合金. 将有电极的

片子解理成 900μm 的长条,前后端面用 ECR 分别蒸镀 5% 的增透膜和 95% 的高反膜,将初测后的管芯 p 面向下用 AuSn 合金烧结在 SiC 热沉上.

3 激光器的特性分析

所有的激光器都是在室温连续条件下测试的. 图 4 给出了激光器的功率电流曲线. 阈值电流为 32mA,最大光输出功率为 88mW,功率为 80mW 时的工作电流为 110mA,斜率效率为 1W/A,串联电阻为 3. 基横模光输出功率可达 60mW,60mW 时的平行结和垂直结的远场发散角分别为 10 和 32°, 激光波长为 658.4nm,如图 4 中的插图所示.

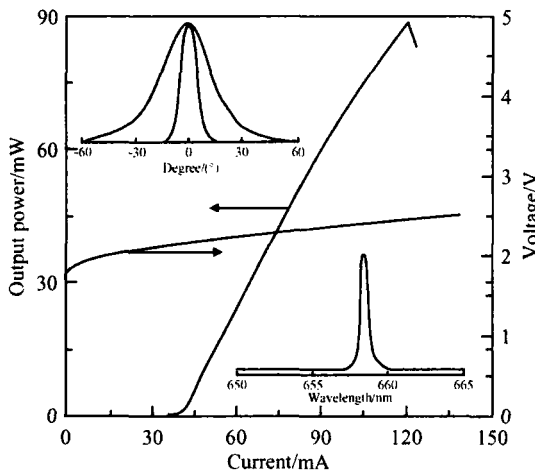


图 4 RT 时激光器的 COD 阈值及 70mW 时的发散角和激光光谱图
Fig. 4 COD threshold, FFP and lasing spectra of the laser at 70mW

透明电流密度 J_0 、内量子效率 η_i 和内损耗 α_i 是评价半导体外延片质量的重要器件参数. 透明电流密度可以通过测量不同腔长 (L) 的阈值电流密度 J_{th} 来求得^[12]. 如图 5 所示,根据测试结果画出 J_{th} - $1/L$ 曲线,并作出数据的直线拟合线,将该直线延长到无限大腔长时对应的交点就是 J_0 , 求出 $J_0 = 648A/cm^2$. 内损耗和内量子效率可以通过测试不同腔长的外微量子效率 η_d 求得. 根据镀膜前 $R_1 = R_2 = R$, R_1, R_2 分别为激光器谐振腔前后两个腔面的功率反射率. η_d 和 L 之间满足: $\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left[1 + \frac{1}{\ln(1/R)} L \right]$ ^[12], 测试不同腔长激光器的外微量子效率得到一组数据,作出 $1/\eta_d$ - L 曲线,如

图 6 所示,并计算出内损耗和内量子效率分别为 $\alpha_i = 4.1cm^{-1}$, $\eta_i = 80\%$.

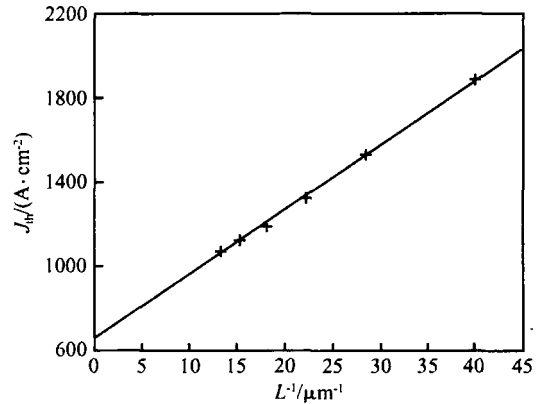


图 5 阈值电流密度 J_{th} 和 $1/L$ 的关系曲线
Fig. 5 Relationship of J_{th} and $1/L$

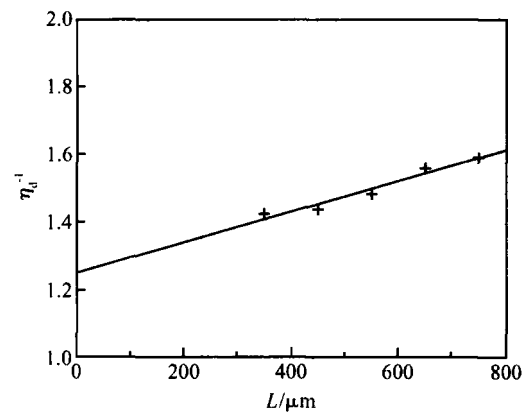


图 6 $1/\eta_d$ 和腔长 L 的关系曲线
Fig. 6 Relationship of $1/\eta_d$ and L

大功率 AlGaInP 激光器在研制过程中遇到的最大的困难之一是激光器的高温性能容易变差,而能在高温环境中工作又是 DVD 用激光器的一个必要条件. 通常用特征温度 T_0 来表示阈值电流对温度的敏感程度, T_0 是衡量半导体激光器特性的重要参数, T_0 越大,表明阈值电流对温度的敏感程度越小,即激光器的热特性越好. 根据阈值电流密度与温度的关系式 $J_{th}(T) = J_{th}(T) \exp\left(\frac{T - T_0}{T_0}\right)$, 测试不同温度时激光器的阈值电流,可在一定温度范围内拟合出器件的特征温度. 图 7 是不同腔长未镀膜时管芯的阈值电流随温度的变化曲线及其拟合的特征温度值. 在这个温度范围内腔长为 300, 450, 600 和 900μm 时的 T_0 分别为 79, 85, 87 和 101 K, 即 T_0 随腔长的增加而增加. 这是因为在 J_{th} 与腔长 L 的关

式 $J_{th} = \frac{J_0}{i} \exp\left[\frac{i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}{g_0 J_0}\right]$ 中, g_0 为微分增益系数; i 为内损耗; 由于 g_0 和 i 随温度的升高而减小, 若 i 保持不变, g_0 的减小会使阈值电流升高; 若 g_0 保持不变, i 的减小会使阈值电流密度减小; 若两者同时发生变化, 当温度升高时, 对于长腔激光器, iL 的减小量会大一些, 总效果使阈值电流密度增加得慢一些, 即长腔激光器的 T_0 要高一些.

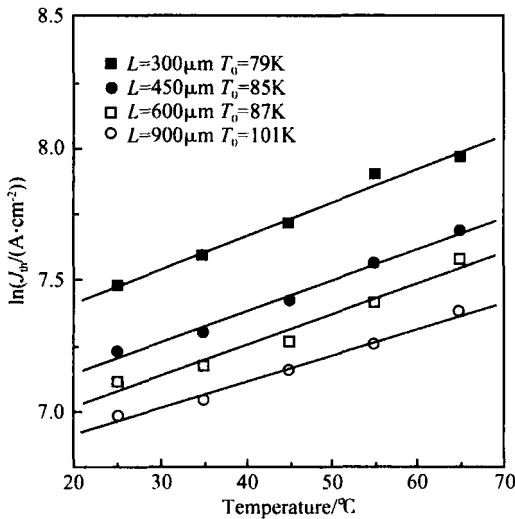


图 7 不同腔长未镀膜管芯阈值电流随温度的变化
Fig. 7 Temperature dependence of the threshold current with different cavity lengths

装管后的激光器在 30mW 时的光输出性能随温度的变化如图 8 所示, 50 20mW 时的恒功率老化结果如图 9 所示, 更长时间的老化实验还在进行中.

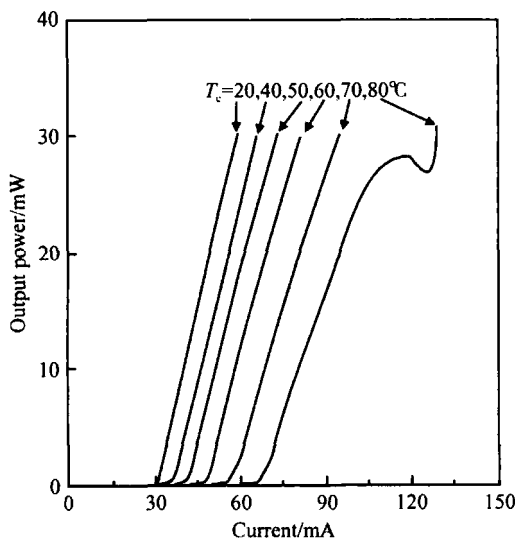


图 8 30mW 时输出光功率随温度的变化
Fig. 8 Temperature dependence of the output power at 30mW

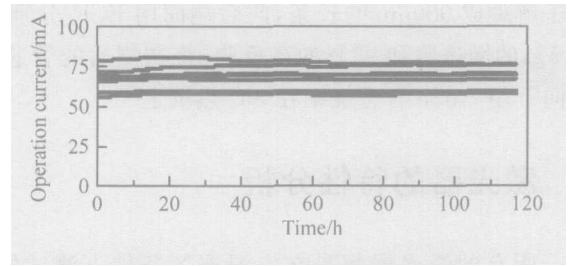


图 9 50 20mW 时的恒功率老化结果
Fig. 9 Aging test result at 50 and 20mW

致谢 作者对海特光电有限公司和惠州市中科光电有限公司的帮助表示衷心的感谢.

参考文献

- [1] Kobayashi K, Kawata S, Gomyo A, et al. Room-temperature CW operation of AlGaInP double-heterostructure visible lasers. Electron Lett, 1985, 21: 931
- [2] Hatakoshi G, Itaya K. InGaAlP visible semiconductor lasers. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, San Jose, CA, USA, 1993, 15 ~ 18: 607
- [3] Hiroyama R, Inoue D, Kameyama S, et al. High-power 200mW 660nm AlGaInP laser diodes with low operating current. Jpn J Appl Phys, 2004, 43(4B): 1951
- [4] Xiong Feike, Guo Liang, Ma Xiaoyu, et al. High performance GaInP-AlGaInP visible semiconductor laser diodes. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(6): 424 (in Chinese) [熊飞克, 郭良, 马晓宇, 等. 高性能实用化 GaInP-AlGaInP 半导体量子阱可见光激光器. 半导体学报, 1997, 18(6): 424]
- [5] Xu Yun, Cao Qing, Chen Lianghui, et al. High power AlGaInP laser diodes with Zinc-diffused window mirror structure. Chinese Optics Letters, 2004, 2: 647
- [6] Eng L E, Chen T R, Sanders S, et al. Submilliampere threshold current pseudomorphic InGaAs/AlGaAs buried heterostructure quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy. Appl Phys Lett, 1989, 55: 1378
- [7] Gomyo A, Suzuki T, Iijima S. Observation of strong ordering in Ga_{1-x}In_xP alloy semiconductors. Phys Rev Lett, 1988, 60: 2645
- [8] Ueno Y. Oscillator strength enhancement for [110]-polarized light in compressively strained GaInP ordered crystals used in AlGaInP lasers. Appl Phys Lett, 1993, 62: 553
- [9] Ohya M, Doi K, Fujii H, et al. Highly reliable operation at 80 for 650nm 5mW AlGaInP LDs. Electron Lett, 1997, 33: 1100
- [10] Hamada H, Shono M, Honda S, et al. AlGaInP visible laser diodes grown on misoriented substrate. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27: 1483
- [11] Bauhuis GJ, Hageman P R, Larsen P K. Heavily doped p-type AlGaInP grown by metalorganic chemical vapor deposition. J

Cryst Growth,1998,191:313

Press,2001:51(in Chinese)[黄章勇.光电子器件和组件.北

[12] Huang Zhangyong. Optoelectronic devices and module. Bei-
jing: Beijing University of Posts and Telecommunications

京:北京邮电大学出版社,2001:51]

Characteristic Analysis on High Power GaInP/ AlGaInP Semiconductor Laser Diodes *

Xu Yun^{1,†}, Guo Liang^{1,2}, Cao Qing^{1,2}, Song Guofeng¹, Gan Qiaoqiang¹,
Yang Guohua¹, Li Yuzhang^{1,2}, and Chen Lianghai¹

(1 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 EO National Co., Ltd, Huizhou 516023, China)

Abstract: High power AlGaInP compressively strained separate confinement heterojunction quantum well laser diodes with real refractive index are successfully fabricated. The epitaxial growth of the laser is carried out by a one-step MOCVD using a 15° misoriented GaAs substrate. The laser diodes have a ridge-waveguide with a 3μm-wide, 900μm-long, and 5%/95% coating. The typical threshold current of these devices is 32mA, the COD threshold is 88mW, and the continuous wave operation current and slope efficiency at 80mW are 110mA and 1W/A, respectively. Stable fundamental-mode operation at 60mW is obtained and the full angles at half-maximum power, perpendicular and parallel to the junction plane, are 32° and 10°, respectively. The lasing wavelength is 658.4nm. The internal loss is 4.1cm⁻¹, the internal quantum efficiency is 80%, and the transparent current density is 648A/cm².

Key words: semiconductor laser diodes; AlGaInP visible lasers; strained quantum well lasers

PACC: 7340L; 4255P; 8160C

Article ID: 0253-4177(2005)11-2213-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program(No. 2002AA313050)

† Corresponding author. Email: xuyun@red.semi.ac.cn

Received 11 April 2005, revised manuscript received 24 May 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics