

InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的激光单模特性研究

汤瑜^{1,2}, 曹春芳¹, 赵旭熠¹, 杨锦³, 李金友³, 龚谦^{1*,2}, 王海龙^{3**}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³曲阜师范大学物理工程学院, 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 报道了 InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的激光光谱研究,并在法布里-珀罗(FP)腔激光器中发现了单模工作特性,且该单模工作特性可以在较大的工作电流范围内(36~68 mA)存在,在一定的电流(14 mA)范围内保持单模可调谐。在 20 °C,当器件注入电流为 62 mA 时,激光器单模工作情况下的最大边模抑制比(SMSR)为 29.8 dB,在其他电流条件下该器件的边模抑制比也都大于 20 dB。激光器在单模工作时,器件最大输出功率(单面)达到 12.5 mW。对于具有相同结构和材料的 FP 腔激光器来说,在不同条宽或腔长的器件中都观察到上述单模工作特性。这一特性在一些单频激光的应用系统中具有较大的应用价值。

关键词 激光器;量子阱激光器;法布里-珀罗腔;InGaAs/GaAs/InGaP;单模;边模抑制比

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131402

Laser Single-Mode Characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP Quantum Well Lasers

Tang Yu^{1,2}, Cao Chunfang¹, Zhao Xuyi¹, Yang jin³, Li jinyou³,
Gong Qian^{1*,2}, Wang Hailong^{3**}

¹State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, School of Physics and Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract In this study, we investigate the laser spectra of the InGaAs/GaAs/InGaP quantum well lasers. Single-mode operation characteristics can be observed in the Fabry-Perot (FP) cavity laser, which exist in a large operating current range (36-68 mA). Mode-hop free wavelength tuning can be observed at a current of 14 mA. The maximum side-mode suppression ratio (SMSR) under single-mode operation of the laser is 29.8 dB at 20 °C with an injection current of 62 mA, while SMSR values are generally greater than 20 dB under other injection currents. Furthermore, the maximum output power (single side) of the laser under single-mode operation reaches 12.5 mW. Accordingly, the aforementioned single-mode operation characteristics can be observed for the FP cavity lasers fabricated with similar structures and materials in devices exhibiting different strip widths and cavity lengths. This unique feature results in considerable application potential in applications requiring a single-frequency laser source.

Key words lasers; quantum well lasers; Fabry-Perot cavity; InGaAs/GaAs/InGaP; single-mode; side-mode suppression ratio

OCIS codes 140.3570; 300.6470

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-01-20; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61674096)

* E-mail: qgong@mail.sim.ac.cn; ** E-mail: phyhlwang71@126.com

1 引言

新一代的光纤通信,尤其是海底光纤通信系统对半导体量子阱激光器的可靠性和稳定性提出了更高的要求。传统 $0.98\ \mu\text{m}$ 激光器依赖于 GaAs/AlGaAs 材料体系,量子阱采用 InGaAs 材料,该激光器材料体系中含有高 Al 组分的 AlGaAs 层,因此需要较高的生长温度,而且器件腔面在大气中极易被氧化,给器件材料生长和工艺制作过程带来了一定的困难。为适应新的发展需要,自 1990 年以来,关于无铝激光器的研究不曾间断^[1-5]。InGaP 由于和 GaAs 材料晶格匹配,与 AlGaAs 相比不仅具有较低的表面氧化速率,而且 InGaP 中 In 原子的体积较大,可以很好地牵制位错的移动,有效地阻止暗点和暗线缺陷的密度,能够帮助提高材料的生长质量。常见的激光器的结构通常有三种,分别为法布里-珀罗(FP)型、分布反馈(DFB)型和垂直腔面发射(VCSEL)型,由于 FP 腔激光器通常为多纵模工作,因此选用后两种结构制作可单模工作的激光器^[6-8]。之前采用 AlGaAs 作为波导层的 FP 腔量子阱激光器展现出典型的多纵模特性,而采用 InGaP 体系的 FP 腔激光器则在一定电流范围内表现出单模稳定工作的特性,在较大的工作电流范围内表现出单模工作特性。此类结构中出现单模工作特性的现象在国际上未见报道,出现双模峰的情况也只有少数文章报道^[9-11]。本文系统地研究了 GaAs/InGaP 体系中 InGaAs 量子阱激光器在一定电流范围内的工作模式特性。实验表明,高强度的单模峰可在室温($20\ ^\circ\text{C}$)下稳定工作,并可在跨度为 14 mA 的电流范围内实现无跳模调谐,当电流强度较大时,激光器出现跳模现象,激光器工作模式跳跃到邻近的 FP 腔模。实验结果显示,上述单模工作特性在微米制备的不同腔长($0.3\sim 2.5\ \text{mm}$)和脊条宽度($3\sim 12\ \mu\text{m}$)的脊形激光器中都可以观察到。

2 材料生长和器件制备

InGaAs/GaAs/InGaP 体系的量子阱结构采用气态源分子束外延设备在 N+ GaAs(100)衬底上外延生长。首先,选用 GaAs(100)衬底,并在高温条件下经过脱氧处理;随后降低衬底温度,生长一层 500 nm 厚的 GaAs n 型缓冲层;然后再生长两层 500 nm 厚的掺 Si 的 InGaP 层,掺杂浓度(粒子数浓度)分别为 $1.5\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $1.0\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,作为下包覆层;再对称地生长 3 个原子层的 GaAs 上下

盖层,用来限制 In 原子的扩散;接下来再对称地生长 160 nm 厚的 GaAs 作为上下势垒层,两个势垒层之间生长 8 nm 厚的 InGaAs 量子阱层作为有源区;然后再生长上包覆层,由两层 500 nm 厚掺 Be 的 InGaP 构成,掺杂浓度分别为 $0.5\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $1.0\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$;最后生长一层 100 nm 厚高掺 Si 的 GaAs 接触层,掺杂浓度为 $3.0\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,用来做欧姆接触。

采用半导体工艺技术制作上下电极结构的窄脊条端面发光的 FP 腔激光器结构。通过手工解理制作成两端解理面,两端解理面之间的波导层为激光器的谐振腔,用于产生增益出光。通过金属蒸镀的方式制作成上下电极结构。测试用的激光器的脊条宽度为 $4\ \mu\text{m}$,腔长为 1.0 mm,激光器为双面出光,未进行镀膜处理。芯片使用铜材料焊接在铜块上,测试过程中采用温控电流源进行温度控制和电流注入,激光器的激射光谱采用带有 InSb 探测器的 Nicolet 860 FTIR 傅里叶红外光谱仪进行收集,输出功率使用带有 InGaAs 探测器的光功率计测得。单模工作下边模抑制比(SMSR)采用型号为 AQ6317Cd 的光栅光谱仪测量所得,以上所有测试均在 $20\ ^\circ\text{C}$ 下连续波工作模式下进行。

3 结果与讨论

在连续波模式下,温度设为 $20\ ^\circ\text{C}$,选取腔长 $L=1.0\ \text{mm}$ 、脊条宽度 $W=4\ \mu\text{m}$ 的激光器来研究其工作特性。首先测量了该器件在 20 mA 下的电荧光光谱,如图 1 所示。由图 1 可以看出,该激光器的发光光谱波长范围超过 30 nm,波长在 $0.99\sim 1.02\ \mu\text{m}$ 的范围内,中心波长为 $1.005\ \mu\text{m}$ 。

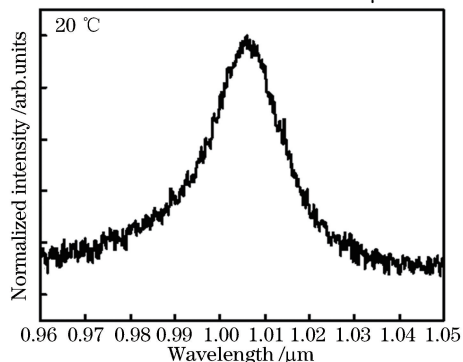


图 1 在连续波模式下,温度为 $20\ ^\circ\text{C}$,注入电流为 20 mA 时,激光器的电荧光光谱

Fig. 1 Electrofluorescence emission spectrum of laser at $20\ ^\circ\text{C}$ in continuous wave mode with 20 mA injection current

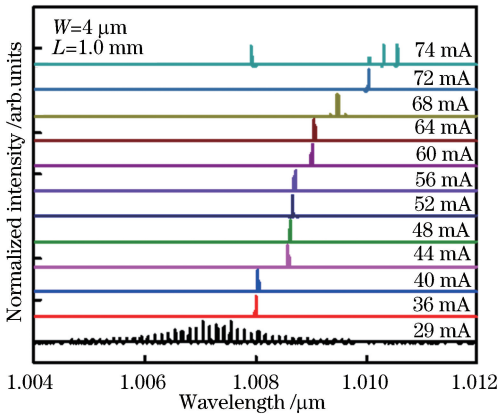


图 2 在连续波模式下,温度为 20 °C 时,不同注入电流下激光器的激光光谱

Fig. 2 Lasing spectrum of laser at 20 °C in continuous wave mode with different injection currents

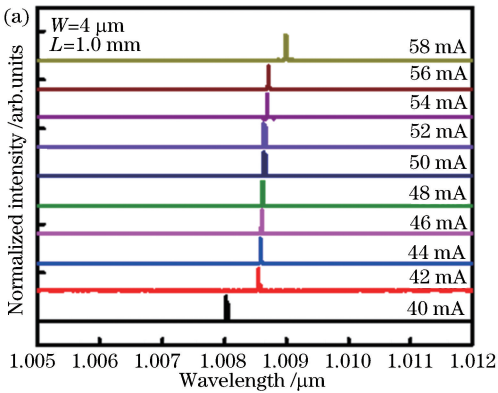
该器件在不同注入电流下的激光光谱如图 2 所示,器件阈值电流为 29 mA,对应的阈值电流密度为 725 A/cm²,其中心波长位于 1.007 μm 处,刚激光时为典型的多纵模激光,此时可以读出该器件的纵模间距约为 0.125 nm。而对于 FP 腔激光器的纵模来说,测量的激光器光谱中两个纵模的间距 Δλ 的值满足如下公式,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_g L}, \quad (1)$$

$$n_g = n_{\text{eff}}^0 - \lambda \frac{dn_{\text{eff}}^0}{d\lambda}, \quad (2)$$

式中:λ 为激光器的波长;n_g 为激光器的群折射率;n_{eff}⁰ 为激光器的有效折射率;L 为激光器的腔长。

通过理论计算可得群折射率 n_g 约为 4,对应的纵模间距 Δλ 约为 0.125 nm,与实验所测得的光谱数据相吻合。在注入电流增加到 36 mA 时激光器就表现出典型的单模峰特性,输出激光的主要能量



集中在单一纵模上。

当激光器进入单模工作区后,在较大的注入电流范围内器件保持单模工作特性。图 3 给出了该激光器单模峰波长随电流的变化关系图,由图 3 可得两个较大的单模峰稳定保持区,在这两个区域内,其单模峰保持稳定不跳模,且维持较高的边模抑制比,工作波长稳定地随注入电流的变化而调谐。接下来主要研究其稳态 1 区的单模保持特性以及模式跳变规律。

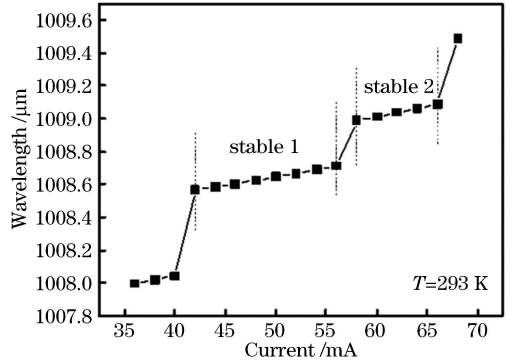


图 3 单模峰波长随注入电流的变化关系

Fig. 3 Wavelength of single-mode peak as a function of injection current

由图 4 (a)可以观察到连续电流调谐下激光器输出激光光谱图的变化关系。由图可知在 42~56 mA 的电流范围内,该器件保持稳定单模工作而不发生跳模,且光谱强度随电流增大逐渐增大,波长随电流增大的红移速度为 0.0105 nm/mA。在 40~42 mA 电流范围内,其单模特性不稳定,连续跳过两个邻近的 FP 腔模,且在 42 mA 的电流下,FTIR 光谱仪显示光谱强度信号有抖动,说明该状态下激光器输出能量在两个模式之间分配不稳定,模式竞争激励,处于跳模发生的临界状态。为分析该器件

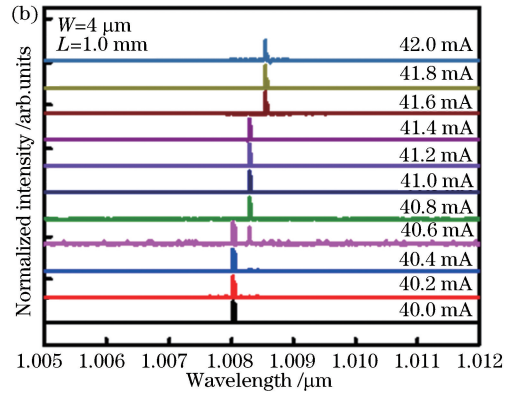


图 4 在连续波模式下,温度为 20 °C 时,不同注入电流下该量子阱激光器的激光光谱图。(a) 40~58 mA;(b) 40~42 mA

Fig. 4 Lasing spectra of quantum well laser with different injection currents under continuous wave mode at 20 °C. (a) 40-58 mA; (b) 40-42 mA

的模式跳动具体过程,测量 40~42 mA 的电流范围内的光谱特性。

图 4(b)给出了 40~42 mA 的范围内器件的模式跳变关系图,注入电流变化间隔为 0.2 mA。由图 4 可知,在 40.6 mA 时,该器件保持两个模式并存的特性,说明此时在激光器内部有机会存在两个纵模,二者存在激励竞争,而且很快就有一个模式胜出,器件在 40.8~41.4 mA 的范围内保持单模稳定,之后在 41.4~41.6 mA 处再次发生跳模,此次跳模没有观察到双模并存的现象,而是直接跳到邻近的 FP 腔模式。以上所有的跳变现象均是波长发生红移。

测试器件输出功率,在室温连续波模式下,温度为 20 °C 时,该器件的输出光功率与电流($I-P$)曲线如图 5 所示。由 $I-P$ 曲线可知在 70 mA 以下拟合可以得出该器件输出功率斜效率为 0.321 W/A,该器件的单模输出功率在 70 mA 时达到了 12.5 mW。插图注入电流为 62 mA 时测得的边模抑制比的光谱图,该器件可测得的最大边模抑制比为 29.8 dB,其他电流情况下单模工作时边模抑制比都大于 20 dB。

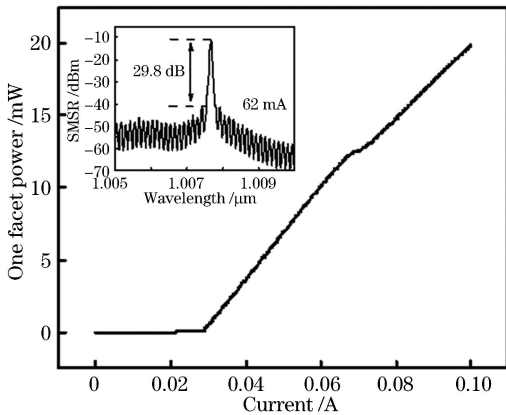


图 5 在连续波模式下,温度为 20 °C 时,输出功率与注入电流的关系图。插图注入电流为 62 mA 时的边模抑制比和波长的关系图

Fig. 5 Output power as a function of injection current of quantum well laser under continuous wave mode at 20 °C. Inset shows SMSR as function of wavelength with 62 mA injection current

为研究上述激光器单模特性的普遍性,制备了不同腔长和脊条宽度的激光器,其测试结果都验证了文中描述的单模工作特性。不同器件之间单模工作的电流范围略有区别,模式跳变对应的电流略有不同,但基本特征是一致的。因此可认为 InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的单模工作特性具有一定的普遍性,很可能和该材料体系的内秉特性有关。

简贵胄^[12]在 GaSb 基量子阱激光器中发现,当注入电流在略大于阈值电流时激光器表现为单模工作,但电流稍微增加之后就很快进入多纵模工作模式,其单模工作的稳定性远低于本文报道的 InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器。因此,器件单模工作的物理机制还有待进一步的研究。

4 结 论

主要对 InGaAs/GaAs/InGaP 材料体系的量子阱激光器的单模工作特性进行了研究。实验结果表明,在上述由气态源 MBE 生长的量子阱激光器中存在普遍的单模工作现象,单模峰的最大边模抑制比可达 29.8 dB,且这一现象的存在与激光器脊条宽度、激光器腔长没有直接关系。这一现象只在 InGaAs/GaAs/InGaP 材料体系(无铝)的激光器结构中发现,相反,在同类的含 AlGaAs 包覆层的激光器结构中还没有出现过该单模峰现象。测试的激光器可在一定的电流范围内保持稳定单模不跳模,器件处于电流调谐状态,但是超出一定的电流范围便会发生跳模现象。随着注入电流的增大,激光器的波长向长波长方向移动。该类结构的激光器在某些单频激光的应用系统中将具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Ijichi T, Ohkubo M, Matsumoto N, *et al.* High power CW operation of aluminium-free InGaAs/GaAs/InGaP strained layer single quantum well ridge waveguide lasers [C] // 12th IEEE International Conference on Semiconductor Laser, September 9-14, 1990, Davos, Switzerland. New York: IEEE, 1990: 44-45.
- [2] Hiramoto K, Sagawa M, Tsuji S, *et al.* High power and stable single-longitudinal-mode operation of 0.98 μm InGaAs/GaAs/InGaAsP/InGaP strained quantum well distributed feedback lasers [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 2-7, 1993, Baltimore, Maryland United States. Washington, D. C.: OSA, 1993: CThE4.
- [3] Mawst L J, Yang H, Nesnidal M, *et al.* High-power, single-mode, Al-free InGaAs(P)/InGaP/GaAs distributed feedback diode lasers[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 195: 609-616.
- [4] Haglund E, Gustavsson J S, Sorin W V, *et al.* GaAs high-contrast gratings with InGaP sacrificial layer for multi-wavelength VCSEL arrays[C] // 2016 International Semiconductor Laser Conference,

- September 12-15, 2016, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2016: 16520479.
- [5] Jeco B M Y, Sogabe T, Ogura A, *et al.* Laser beam induced current (LBIC) mapping of InGaP/GaAs/Ge triple junction solar cells with luminescence coupling[C]// 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 5-10, 2016, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2016: 1229-1234.
- [6] Li X, Wang J, Yang N, *et al.* Optical characteristics of second-order distributed feedback terahertz quantum cascade laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0414002.
李鑫, 王健, 杨宁, 等. 二阶分布反馈太赫兹量子级联激光器的光学特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0414002.
- [7] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, *et al.* Structural optimization and fabrication of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0301005.
冯源, 郝永芹, 王宪涛, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器结构优化与制备[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0301005.
- [8] Chen S L, Zhang X, Jiang J, *et al.* VCSEL side-pumped all solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1001001.
陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL 侧面抽运的全固态激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1001001.
- [9] Dikareva N V, Zvonkov B N, Vikhrova O V, *et al.* Dual-frequency GaAs/InGaP laser diode with a GaAsSb quantum well[J]. *Semiconductors*, 2017, 51(10): 1360-1363.
- [10] Aleshkin V Y, Zvonkov B N, Nekorkin S M, *et al.* The mode competition, instability, and second harmonic generation in dual-frequency InGaAs/GaAs/InGaP lasers [J]. *Semiconductors*, 2005, 39(1): 156-159.
- [11] Biryukov A A, Nekorkin S M, Zvonkov B N, *et al.* Experimental study of nonlinear mode mixing in dual-wavelength semiconductor lasers[J]. *Laser Physics*, 2007, 17(5): 684-687.
- [12] Jian G Z. Research on process and characterization technology of GaInAsSb/AlGaAsSb semiconductor laser device [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2000: 60-64.
简贵胄. GaInAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器器件工艺及表征技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2000: 60-64.