

文章编号 1004-924X(2013)03-0590-08

852 nm 半导体激光器量子阱设计与外延生长

徐华伟^{1,2}, 宁永强^{1*}, 曾玉刚¹, 张 星¹, 秦 莉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:设计并外延生长了具有高温稳定性 InAlGaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,用于解决 852 nm 半导体激光器在高温环境下工作时的波长漂移问题。基于理论模型,计算并模拟对比了 InAlGaAs, InGaAsP, InGaAs 和 GaAs 量子阱的增益及其增益峰值波长随温度的漂移,结果显示,采用 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱可以使器件同时具有较高的增益峰值和良好的波长温漂稳定性。使用金属有机化合物气相淀积(MOCVD)外延生长了 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区,通过反射各向异性谱(RAS)在线监测和 PL 谱研究了 InAlGaAs/AlGaAs 界面的外延质量,实验证明了通过降低生长温度和在 InAlGaAs/AlGaAs 界面处使用中断时间,可以有效抑制 In 析出,从而获得 InAlGaAs/AlGaAs 陡峭界面。最后,采用优化后的外延生长条件,研制出了 InAlGaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。实验测试结果显示,其光谱半高宽为 1.1 nm,斜率效率为 0.64 W/A,激射波长随温度漂移为 0.256 nm/K。理论计算结果与实验测试结果相吻合,证明器件性能满足在高温环境下工作的要求。

关键词:半导体激光器;应变量子阱;外延生长;波长漂移;反射各向异性谱

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0590

Design and epitaxial growth of quantum-well for 852 nm laser diode

XU Hua-wei^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, ZENG Yu-gang¹, ZHANG Xing¹, QIN Li¹

(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn*

Abstract: An InAlGaAs/AlGaAs strained quantum-well laser with high temperature stability was designed and grown to overcome the emission wavelength shift occurred in high temperature for a 852 nm laser diode. Based on a comprehensive model, the gains and wavelengths versus the operation temperatures of InAlGaAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs quantum-wells were calculated and compared. The results indicate that $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ quantum-well is the most appropriate candidate for the quantum well of the 852 nm laser diode with the higher gain and better temperature stability simultaneously. Then, Metal-organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD) was used to grow compressive-strained $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ active region and Reflectance Anisotropy Spectroscopy (RAS) and Photoluminescence Measurements (PL) were applied to the evaluation of crystalline quality for InAlGaAs/AlGaAs interfaces. It is proved that the indium segregation effect can be effectively

收稿日期:2012-11-17;修订日期:2012-12-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11074247, No. 61106047, No. 61176045, No. 61106068, No. 51172225, No. 61006054); 国家自然科学基金重点项目(No. 90923037)

suppressed by lowering the growth temperature and using the interruption time between InAlGaAs quantum-well and AlGaAs barriers, and an abrupt interface and good crystalline quality for InAlGaAs/AlGaAs quantum-well can be obtained. Finally, an InAlGaAs/AlGaAs strained quantum-well laser was grown with optimized growth conditions. Experimental results indicate that the laser has a Full Width Half Maximum (FWHM) of 1.1 nm, the slope efficiency of 64 W/A and the wavelength shift with temperature of 0.256 nm/K. The theoretical calculation results are in good agreement with experimental results, which verifies that the laser meets the work requirements at a high temperature.

Key words: semiconductor laser; strain quantum-well; epitaxial growth; wavelength shift; Reflectance Anisotropy Spectroscopy(RAS)

1 引言

半导体激光器具有体积小、重量轻、功率高、转化效率高、可靠性高等优点,广泛应用于光纤通信、工业材料处理、激光医疗、国防建设等领域^[1-3]。激光波长为 852 nm 的半导体激光器可以用于铯(Cs)原子钟,该原子钟是目前准确度最高,稳定性最好的原子钟之一。

作为 Cs 原子钟的核心部件,852 nm 半导体激光器需要在高温环境下稳定工作,因此要具有良好的温度稳定性,且其波长温漂越小越好。由于有源区材料的禁带宽度、外延层材料的折射率等都会随温度发生变化,因此激光波长也会随之发生变化。其中,量子阱的禁带宽度随温度发生的变化是最主要的影响因素,所以研究激光器设计中量子阱材料的选择非常重要。目前,852 nm 半导体激光器的量子阱材料主要有 AlGaAs, InGaAs, InGaAsP 等。法国的 Alcatel Thales III-V 实验室采用 InGaAsP 量子阱,斜率效率达到 0.9 W/A,波长随温度漂移为 0.26 nm/°C,功率为 280 mW^[4];俄罗斯 Ioffe 物理实验室采用 GaAs 作量子阱,功率达到 270 mW^[5];德国的 Ferdinand Braun 研究所采用脊形波导结构,量子阱采用 InGaAsP 材料,斜率效率达到 1 W/A,波长随温度漂移为 0.25 nm/°C,功率为 250 mW^[6]。量子阱决定了半导体激光器的最终性能,因此精确控制及在线监测量子阱的外延生长非常重要。反射各向异性谱(Reflectance Anisotropy Spectroscopy, RAS)已经被证明是在线监测并研究外延层组份控制和多量子阱应变影响的有力工具^[7-8]。

用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器的报道很多,但是关于如何选择和设计量子阱材料

来提高 852 nm 激光器温度稳定性的报道却很少,目前还没有关于使用原位监测的方法研究 InAlGaAs 量子阱中 In 析出现象的报道。本文通过理论计算和 PICS3D 软件模拟对比了不同量子阱材料材料增益、波长随温度的漂移以及波长随量子阱厚度的变化量,证明了采用 In_{0.15}Al_{0.11}Ga_{0.74}As 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱可以使器件同时具有较高的增益峰值和良好的波长温漂稳定性。通过 RAS 在线监测研究了生长温度和中断时间对 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱外延质量的影响。最后,使用金属有机化合物气相沉积(Metal Organic Compound Chemical Vapor Deposition, MOCVD)技术外延生长了 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光器,并测量了该激光器的性能。理论计算和实验测试的结果相吻合,证明该器件能够满足高温环境下的工作要求。

2 理论分析

2.1 应变量子阱激光波长计算

本文对比设计的 852 nm 激光器量子阱分别采用无应变的 GaAs 和应变 In_{1-x-y}Al_yGa_xAs, In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}, In_xGa_{1-x}As 作为量子阱材料,势垒均采用外延层厚度为 10 nm 的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 材料。量子阱结构中,方形势阱中子能级可以用克龙尼克-潘纳模型来估算^[9],能级分布可以由以下公式得到:

$$\cos(k(L_w + L_b)) = \cos(k_b L_b) \cos(k_w L_w) - \frac{k_w^2 + k_b^2}{2k_w k_b} \sin(k_b L_b) \sin(k_w L_w). \quad (1)$$

式中: L_w 和 L_b 分别为势阱宽度和势垒宽度, k_b 和 k_w 分别为:

$$k_b = i \sqrt{2m_b(V - E_i)} / \hbar, \quad (2)$$

$$k_w = \sqrt{2m_w E_i} / \hbar. \quad (3)$$

式中: m_w 和 m_b 分别为势阱和势垒的有效质量, V 为导带或者价带的电势, E_i 为量子化子能级, \hbar 为约化普朗克常数。

半导体量子阱激光器的激光波长主要是由导带电子第一子能级到价带空穴第一子能级的跃迁决定, 这一跃迁的光子能量可以表示为:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = E_{c-hh} + E_{cl} + E_{hh1}. \quad (4)$$

式中: E_{cl} 和 E_{hh1} 分别为导带电子的第一子能级和价带重空穴的第一子能级, 可以通过公式(1)计算得到; 相关的参数和量子阱的压应变带隙 E_{c-hh} 可以通过文献[10]得到。

2.2 材料增益计算

量子阱的增益谱可以依据跃迁矩阵元计算能带间的跃迁得到, 增益谱的计算公式为:

$$g(E) = \frac{e^2 \pi \hbar}{\epsilon_0 m_0^2 n_w c E} \cdot$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho_c(E_c) \rho_v(E_v) M_{ij}^2 (f_c + f_v - 1) \cdot dE. \quad (5)$$

在 $k_{//}$ 方向对量子阱进行积分, 并且利用跃迁选择定则将上式化简为:

$$g(E) = \frac{e^2 \pi \hbar}{\epsilon_0 m_0^2 n_w c E} M_{av}^2 \left(\frac{n_c n_v}{n_c + n_v} \right) (1 - f_c - f_v), \quad (6)$$

式中:

$$M_{av}^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{m_0}{m_e} - 1 \right) \frac{E_g + \Delta}{E_g + \frac{2}{3} \Delta} m_0 E_g, \quad (7)$$

ϵ_0 为真空介电常数, c 为真空中光速, m_0 为电子静止质量, Δ 为自旋轨道分裂能级, n_w 是量子阱材料的折射率, f_c 和 f_v 分别为电子和空穴的准费米能级^[11]。

3 实验结果与讨论

3.1 852 nm 半导体激光器量子阱结构设计

由于用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器的工作温度为 360 K, 因此本文的量子阱材料的性能对比在此温度下进行。通过公式(4)计算了不同量子阱材料所对应的量子阱厚度(见表 1), 采用材料增益计算公式, 通过理论计算和 PICS3D 软件模拟了不同量子阱材料的增益谱(见图 1)。图 1 中显示, 载流子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 温度为 360 K 时, 有源区材料 $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.15}$

$\text{Ga}_{0.74} \text{As}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$, $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.11} \text{Ga}_{0.74} \text{As}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$, $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.12} \text{Ga}_{0.73} \text{As}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$, $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$, $\text{In}_{0.15} \text{Ga}_{0.85} \text{As}_{0.88} \text{P}_{0.12}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$ 和 $\text{In}_{0.06} \text{Ga}_{0.94} \text{As}/\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As}$ 的增益谱的峰值波长都在 852 nm 左右(彩图见期刊电子版)。从图中可以发现, 压应变量子阱 $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.10} \text{Ga}_{0.75} \text{As}$ 的增益峰值最高, 无应变的 GaAs 的增益峰值最低。量子阱材料的增益峰值越大, 器件越容易实现高功率输出。

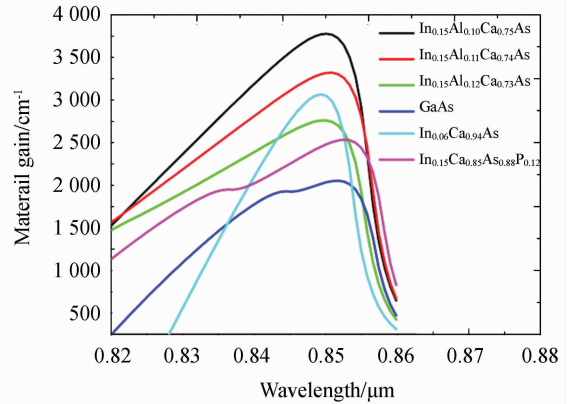


图 1 6 个不同量子阱在温度 360 K 下的增益
Fig. 1 Material gains of six quantum-wells at temperature 360 K

图 2 显示不同量子阱材料增益峰值波长随温度的变化(彩图见期刊电子版), 增益峰值波长随温度的升高有明显的红移现象, $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.10} \text{Ga}_{0.75} \text{As}$, $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.11} \text{Ga}_{0.74} \text{As}$, $\text{In}_{0.15} \text{Al}_{0.12} \text{Ga}_{0.73} \text{As}$, GaAs , $\text{In}_{0.06} \text{Ga}_{0.94} \text{As}$ 和 $\text{In}_{0.15} \text{Ga}_{0.85} \text{As}_{0.88} \text{P}_{0.12}$ 的

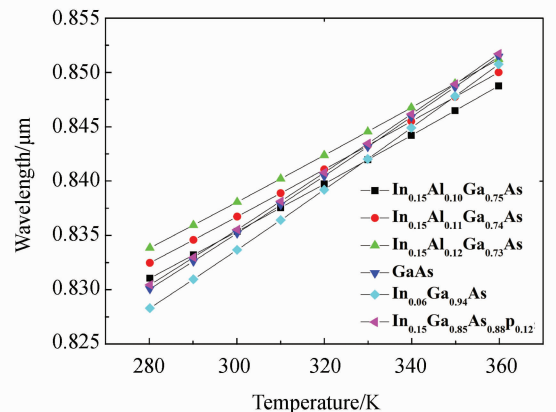


图 2 不同量子阱增益峰值波长随温度的变化
Fig. 2 Peak wavelengths versus operation temperatures for different quantum-wells

波长随温度的漂移值分别为 0.224, 0.222, 0.22, 0.271, 0.285 和 0.269。图 2 显示, $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$ 整体波长随温度的变化最小, 这是由于压应变量子阱 $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$ 材料的能带带阶更大, 对量子阱内载流子的限制更好^[10]。不同组分的 $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$ 的波长漂移值相差不大, $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ 波长随温度的漂移值最大。

表 1 不同量子阱材料的对比

Tab. 1 Comparison among different quantum-wells

| Material | Thickness /nm | $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ | $\frac{\Delta\lambda}{\Delta d}$ | Peak gain /cm ⁻¹ |
|---|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | | /nm · K ⁻¹ | | |
| GaAs | 8 | 0.271 | 4.88 | 2 070 |
| $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ | 4 | 0.285 | 7.34 | 3 094 |
| $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}_{0.88}\text{P}_{0.12}$ | 9 | 0.269 | 4.13 | 3 556 |
| $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ | 6.2 | 0.224 | 7.15 | 3 814 |
| $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ | 8 | 0.222 | 4.71 | 3 351 |
| $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ | 9.3 | 0.22 | 2.45 | 2 785 |

在设计时还需要考虑到量子阱厚度的影响, 受材料外延生长和晶格常数限制, 量子阱厚度不能太薄; 但量子阱厚度如果太厚, 量子效应会减弱, 态密度增加, 不利于低阈值工作。除了要考虑量子阱厚度因素之外, 设计时还需要考虑量子阱厚度的 MOCVD 外延生长精度控制。通过应变

量子阱波长理论计算, 可以得到激光器发射波长随量子阱厚度的改变量 $\Delta\lambda/\Delta d$ (见表 1)。由表 1 可知, $\Delta\lambda/\Delta d$ 值越小, 对外延生长精度的要求越低, 外延生长越容易达到设计要求。

表 1 列出了本文计算得到的不同量子阱材料所对应的量子阱厚度、增益峰值波长随温度的漂移值、增益峰值波长随量子阱厚度的改变量和温度 360 K 时的增益峰值。由表可知, 增益峰值波长随温度漂移值越小对应的温度稳定性越好; 增益峰值越大, 越容易实现器件的高功率输出; 对于量子阱的厚度, 太大和太小都不适合。增益峰值波长随量子阱厚度的改变量越小, 对外延生长控制精度的要求越低, 越容易达到设计要求。综合以上考虑, 最终选择 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱材料。

3.2 半导体激光器外延生长

本文选择 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 作为 852 nm 半导体激光器的量子阱材料。外延生长 InAlGaAs 时, InAlGaAs 材料中含有 In, TmIn 的扩散系数小于 TMGa, 在低压下热解效率低, 要获得高质量的 InAlGaAs 需要较高的 V/Ⅲ 和选择合适的生长温度, 因此要对 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区的外延生长进行了精确控制和在线监测。为了得到良好的外延质量, 本文研究了生长温度和中断时间对 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区的影响。

表 2 样品 A 和样品 B 的器件结构和外延生长条件

Tab. 2 Structures and growth conditions of sample A and sample B

| Layer | Sample A | | Sample B | |
|--------------|---|----------------|---|----------------|
| | Materials | Temperature/°C | Materials | Temperature/°C |
| Waveguide | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.55$ to 0.3) | 710 | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.55$ to 0.3) | 710 |
| | | | Interruption time 3 min | 710—650 |
| Barrier | $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ | 710 | $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ | 650 |
| | | | Interruption time 10 s | 650 |
| Quantum-well | $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ | 710 | $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ | 650 |
| | | | Interruption time 10 s | 650 |
| Barrier | $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ | 710 | $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ | 650 |
| | | | Interruption time 5 min | 650—710 |
| Waveguide | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.3$ to 0.55) | 710 | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.3$ to 0.55) | 710 |

在实验中设计了两个样品, 这两个样品具有相同的结构, 但所用的外延生长条件不同, 如表 2 所示。

样品结构是: 有源区包括 8 nm 厚的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 单量子阱层和 10 nm 厚的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层, 有

源区夹在 150 nm 厚、渐变组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导层中。外延生长有源区 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的 V/III 为 200, 其它外延层的 V/III 为 80。外延生长样品 A 时, 整个外延生长过程采用的生长温度为 710 °C, 没有使用中断时间。外延生长样品 B 时, $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区使用的生长温度为 650 °C, 其它外延层使用的生长温度为 710 °C。在外延生长样品 B 的过程中, 降温过程(从 710 °C 降到 650 °C)的中断时间为 3 min; 升温过程(从 650 °C 降到 710 °C)的中断时间为 5 min; 在 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层和 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层之间的中断时间为 10 s。

在试验中使用原位监测设备在线监测了样品 A 和样品 B 的外延生长过程, 为了能够有效地监测到外延层表面细微的变化, 探测光的能量为 3.8 eV^[12]。图 3 为不同外延生长条件下样品 A 和样品 B 随时间变化的 RAS。外延生长和 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层所用的时间分别为 75 s 和 97 s, 这样可以保证有足够的时间来监测 RAS 的细微变化(彩图见期刊电子版)。

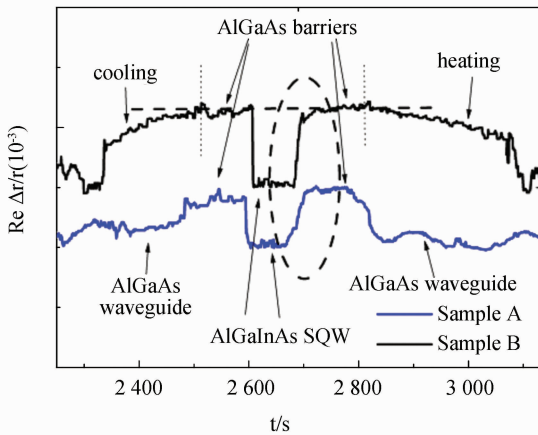


图 3 不同外延生长温度和中断时间的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区生长过程的 RAS 谱

Fig. 3 RAS of $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ active region with different growth temperatures and interrupt time during growth process

从图 3 中可以观察到, $\text{Al}_{0.11}\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层以及样品 B 的降温过程和升温过程。降温过程和升温过程的时间分别为 3 min 和 5 min, 温度变化都是渐变的, B 的降温过程和升温过程的 RAS 值也是渐变的, 因此通过 RAS 可以很好地在线监测出外延生长温度的变

化。样品 A 在生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层之后外延生长 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层, 样品 B 在 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层与 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层之间中断了 10 s, 故两个样品的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层与 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层界面的 RAS 值是垂直下降的, 这表明 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 界面外延质量很好, 由此说明采用变温生长和中断时间对 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 界面的外延质量基本没有影响。

在生长 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱外延层之后, 样品 A 直接外延生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层, 而样品 B 在中断了 10 s 后才开始外延生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层, 这使样品 B 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的 RAS 值几乎是垂直上升的(图 3 中椭圆虚线所示), 而样品 A 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的 RAS 值变化是渐变的。由此可以推断出, 样品 A 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面是渐变的, 样品 B 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面是突变的, 从而说明变温生长和中断时间对 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的外延质量产生了较大的影响。 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处的这种渐变是由于 In 析出导致的, 在 710 °C 高温外延生长条件下, In 很容易从 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层中析出并扩散进入到 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层中, 这样导致 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面出现了 In 组分逐渐降低的渐变层, 因此出现了样品 A 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处 RAS 值的渐变。样品 B 采用 650 °C 低温外延生长, 低温生长可以有效抑制 In 析出, 同时在 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处采用 10 s 的中断时间, 即使有少量 In 析出也不会扩散进入 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层, 因此样品 B 的 RAS 出现了垂直的界面。样品 B 中, $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 应变单量子阱两侧的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层的 RAS 值整体一致(水平虚线), 这表明生长的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层前后质量一致, 没有出现由应变导致的缺陷。

图 4 为样品 A 和样品 B 的在 20 °C 时的光致发光光谱(PL)。从图中可以观察到, 样品 A 和样品 B 的峰值波长分别位于 826 nm 和 832 nm。样品 B 的峰值波长与理论计算结果一致, 这说明样品 B 的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱层的 Al 组分和 In 组分的值和厚度与本文设计的一致。而样品 A

的峰值波长向短波方向漂移,这说明样品 A 的 In 组分比值比理论设计值小,这是由于 In 析出导致 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱的 In 组分变小。从图 4 中还可以观察到,样品 A 的半高宽是 24.5 nm,大于样品 B 的半高宽 17.2 nm,这是由于样品 A 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的渐变引起的。由于样品 A 中 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱界面为渐变,导致量子阱的 PL 峰值强度的绝对值较低,使得外延片最外层 GaAs 的 PL 峰值显现出来(如图 860 nm 处的峰值)。

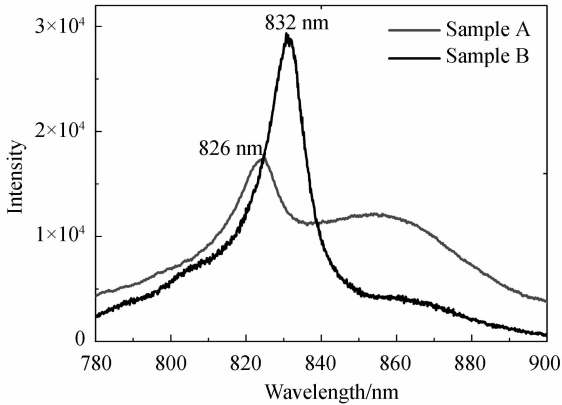


图 4 温度为 20 °C 时 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区的 PL 谱
Fig. 4 PL spectra of $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ active region at temperature 20 °C

3.3 半导体激光器测试结果

采用理论设计的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱材料和优化后的外延生长条件,研制出了 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱半导体激光器,并对其性能进行了测试。

图 5 为室温 25 °C 时,腔长为 1 mm,条宽为 100 μm 的 $P-I$ 和 $V-I$ 曲线。在脉冲宽度为 50 μs ,重复频率为 100 Hz 的准连续工作状态下,阈值电流为 50 mA,斜率效率是 0.64 W/A,电光转换效率为 31.6%;外加电流为 500 mA 时,输出功率为 290 mW。图 6 为温度为 30 °C,连续电流为 300 mA 时的激光光谱图,从图中可以看出,激光器的中心波长位于 834.4 nm,光谱半高宽为 1.1 nm。

图 7 为激光波长随温度的实验结果和理论设计结果的对比图,激光波长随温度升高向长波方向漂移并呈线性变化。测试结果显示,激光波长随温度的漂移值为 0.256 nm/K,其结果与理论设计的

数值基本吻合,由此可知理论设计对实验起到了很好的指导作用。

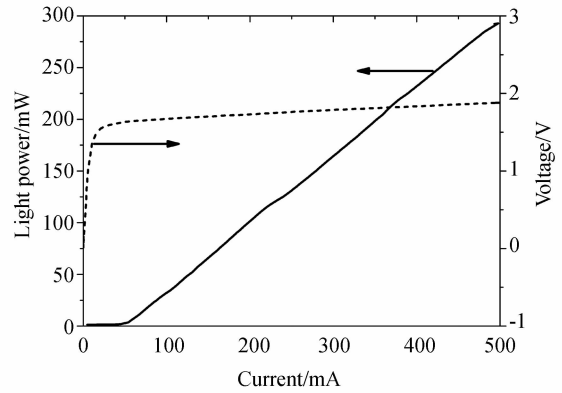


图 5 $P-I$ 和 $V-I$ 特性曲线的实验结果

Fig. 5 Experimental results of $P-I$ and $V-I$ output characteristics

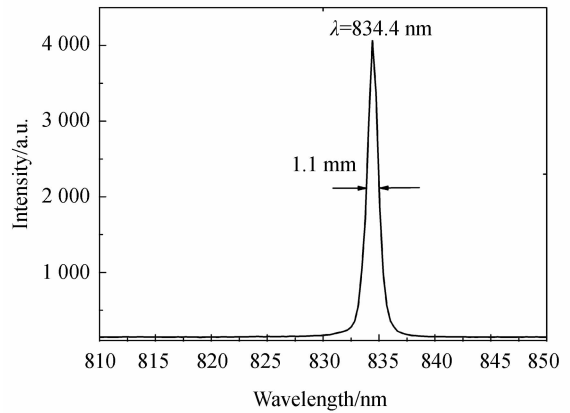


图 6 连续电流为 300 mA 时的激光器光谱图

Fig. 6 Spectrum of laser operating at continuous wave of 300 mA

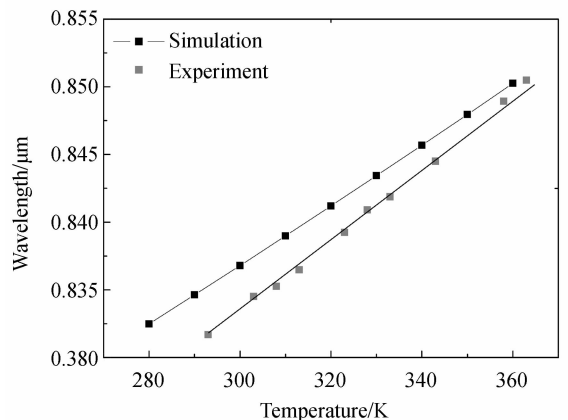


图 7 波长随温度($\lambda-T$)变化的实验和模拟结果

Fig. 7 Experimental and simulation results of $\lambda-T$ output characteristics

4 结 论

本文通过理论计算和 PICS3D 软件模拟,对比了 GaAs, $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$, $\text{Al}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}_{0.88}\text{P}_{0.12}$ 量子阱的增益峰值、增益峰值波长随温度的漂移以及波长随量子阱厚度的变化量,确定了增益峰值大于 $3\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 波长温漂小于 $0.26\ \text{nm/K}$ 的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 作为 $852\ \text{nm}$ 半导体激光器的有源区。通过 RAS 在线监测并研究了生长温度和中断时间对 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区的影响。监测发现,外延生长温度为 $710\ ^\circ\text{C}$ 时, $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}$

$\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面有 In 析出;将外延生长温度从 $710\ ^\circ\text{C}$ 降低到 $650\ ^\circ\text{C}$,并在 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处采用 $10\ \text{s}$ 的中断时间, $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处 In 析出现象明显改善。通过 PL 谱测试,进一步证明了低温生长和中断时间可以抑制 In 析出以及 RAS 在线监测的有效性。采用理论设计的 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱材料和优化后的外延生长条件,研制出了 $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 量子阱半导体激光器。实验测试结果显示,该激光器的光谱半宽为 $1.1\ \text{nm}$,斜率效率为 $0.64\ \text{W/A}$,激射波长随温度的漂移值为 $0.256\ \text{nm/K}$ 。理论计算与实验测试的结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 史晶晶, 秦莉, 宁永强, 等. $850\ \text{nm}$ 垂直腔面发射激光阵列[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 17-23. SHI J J, QIN L, NING Y Q, *et al.*. $850\ \text{nm}$ vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 17-23. (in Chinese)
- [2] 张星, 宁永强, 曾玉刚, 等. $980\ \text{nm}$ 高功率垂直腔面发射激光阵列的单元结构优[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2014-2021. ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. Optimization of element structure in $980\ \text{nm}$ high-power vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2014-2021. (in Chinese)
- [3] 史晶晶, 秦莉, 刘迪, 等. 大功率垂直腔面发射激光阵列的串接结构[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2309-2313. SHI J J, QIN L, LIU D, *et al.*. High-power vertical cavity surface emitting laser array in series structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2309-2313. (in Chinese)
- [4] VINCENT L, FRANCOIS J V, SHAIENDRA B, *et al.*. High power Al free active region ($\lambda = 852\ \text{nm}$) DFB laser diodes for atomic clocks and interferometry applications [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, California*, 2006: 398-405.
- [5] KARACHINSKY L Y, NOVIKOV I I, SHERNY-AKOV Y M, *et al.*. High power GaAs/AlGaAs lasers ($\lambda \sim 850\ \text{nm}$) with ultranarrow vertical beam divergence [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(23): 23114-1-23114-3.
- [6] KLEHR A, WENZEL H, BROX O, *et al.*. High power DFB lasers for D1 and D2 caesium absorption spectroscopy and atomic clocks [C]. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers VIII*, San Jose, 2008: 69091E-1-69091E-10.
- [7] ZORN M, ZETTLER J T, KNALLER A, *et al.*. In situ determination and control of AlGaInP composition during MOVPE growth [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 287(2): 637-641.
- [8] BUGGE F, ZORN M, ZEIMER V, *et al.*. MOVPE growth of InGaAs/GaAsP-MQWs for high power laser diodes studied by reflectance anisotropy spectroscopy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(4): 1065-1069.
- [9] 晏长岭, 秦莉, 宁永强, 等. GaInAs/GaAs 应变量子阱能带结构的计算[J]. 激光杂志, 2004, 25(5): 29-31. YAN CH L, QIN L, NING Y Q, *et al.*. Calculation of energy band structure of GaInAs/GaAs quantum well [J]. *Laser Journal*, 2004, 25(5): 29-31. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, NING Y, ZHANG L, *et al.*. Design and comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12569-12581.
- [11] 徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. $852\ \text{nm}$ 半导体激光器 InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs 和 GaAs 量子阱的温度稳定性[J]. 发光学报, 2012, 33(6): 640-646.

XU H W, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. Temperature Stability of InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs Quantum-wells for 852nm Laser Diode [J]. *Chin. J. Lumin*, 2012, 33(6): 640-646. (in Chinese)

[12] 徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 反射各向异性谱在线监测 852 nm 半导体激光器 AlGaInAs/AlGaAs

量子阱的 MOCVD 外延生长研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502010-1-0502010-6.

XU H W, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. MOCVD growth of AlGaInAs/AlGaAs QW for 852 nm laser diodes studied by reflectance anisotropy spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0502010-1-0502010-6. (in Chinese)

作者简介:



徐华伟(1982—),男,吉林白山人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,主要从事半导体激光器结构设计 with 外延生长方面的研究。E-mail: xuhwciomp@163.com



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,硕士生导师,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及其应用方面的研究。E-mail: qinlicomp@yahoo.com.cn



曾玉刚(1978—),男,四川泸州人,副研究员,硕士生导师,2008年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事 III-V 族材料 MOCVD 生长和半导体光电子器件方面的研究。E-mail: zyg-ang98@gmail.com



宁永强(1965—),男,吉林图们人,研究员,博士生导师,1999年于中科院长春物理所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



张星(1983—),男,吉林辉南人,博士,助理研究员,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

导师简介:

(版权所有 未经许可 不得转载)