

1.3 μm 低阈值 InGaAsP/InP 应变补偿 MQW 激光器的 LP-MOCVD 生长

陈 博 王 圩 汪孝杰 张静媛 周 帆 马朝华

(中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心 北京 100083)

提要 报道了用低压金属有机物化学气相淀积(LP-MOCVD)方法外延生长 InGaAsP/InP 应变补偿多量子阱结构。用此材料制备的掩埋异质结(BH)条形结构多量子阱激光器具有极低阈值电流 4 ~ 6 mA。20~ 40°C 时特征温度 T_0 高达 67 K, 室温下外量子效率为 0.3 mW/mA。

关键词 应变补偿, InGaAsP, 激光器, LP-MOCVD

1 引 言

近年来, 宽温度范围无制冷的低阈值 1.3 μm 和 1.55 μm 大功率半导体激光器在局域子网互联和光纤通信系统中越来越受到人们的青睐。

许多理论分析和实验分别验证了采用压应变量子阱结构可以降低激光器的阈值电流密度、改善线宽、提高调制频率和特征温度 T_0 等特性^[1~4]。这是由于双轴压应变可以剪裁半导体的能带结构, 压应变将会引起半导体价带顶的轻、重空穴带退简并。重空穴带上升, 轻空穴带下降, 有效地抑制了 Auger 复合和价带间吸收, 可以改善器件的温度特性, 提高特征温度 T_0 , 同时降低了价带顶的重空穴平面有效质量和态密度, 因此可以使激光器更容易得到载流子的粒子数反转, 实现低阈值的室温连续工作。

对 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 材料, 应变量为 $\pm 1\sim 2\%$ 时, 可有效地改善激光器的阈值、特征温度、量子效率等特性^[4]。失配度为 $\pm 1.5\%$ 时, 压、张应变层的临界厚度分别小于 30 nm, 15 nm。采用通常的外延方法生长多量子阱时, 阱数将受限制, 而在有源区中交替生长压、张应变补偿量子阱, 其平均应变变量就会显著下降, 几乎不受临界厚度的影响。我们采用压、张应变交替的阱、垒应变补偿有源区, 有效地降低了有源区材料的平均应变变量, 同时量子阱的阱宽、阱数将不受应变变量的限制。可以有效地增加有源区的微分增益, 降低阈值, 提高饱和功率, 改善器件的温度特性。

2 材料生长和器件制作

2.1 结构片材料生长

采用 LP-MOCVD 生长技术, 在 AIXTRON/200 型 MOCVD 设备上进行材料生长。此系

统反应室压力和 Vent-run manifold(旁路-主流汇流器)的压力由节流阀控制在 20 mbar。Vent-run 汇流器的无死区设计和所有气路内和反应室高速线性连续气体可保证气相组份在几十分之一秒内迅速切换,这对于生长陡峭的异质结界面尤为重要。石墨舟内嵌有 5.08 cm 直径的、可旋转的石墨转托,这可以保证大面积生长均匀性。石墨舟基座是由嵌在弧形反射镜的碘钨灯加热,5.08 cm 晶片生长温度为 655℃。有机源为三甲基铟(TMIn)和三甲基镓(TMGa),=族源为 100% 磷烷(PH₃)和砷烷(AsH₃),每个有机源都有两路入室气路,如此设计

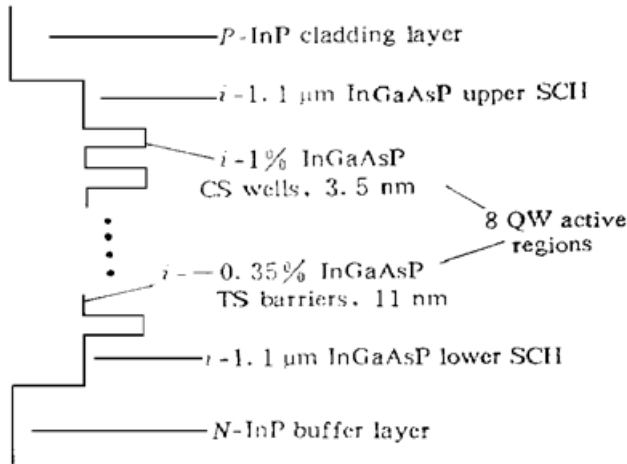


图 1 应变多量子阱有源区能带结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the strained-MQW energy band structure

可以避免单路生长多量子阱结构遇到的气流不稳定情况。*p*型和*n*型掺杂剂分别为二乙基锌(DEZn)和2%的硅烷(SiH₄),载气为经过钯管纯化过的-110℃露点的高纯氢气。

器件采用如图 1 所示的渐变折射率分别限制异质结(GRIN-SCH MQW)应变多量子阱结构。在 5.08 cm 掺 S 的(100)晶向 *n*-InP 衬底上依次生长 *N*-InP 缓冲层(掺 Si, $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、不掺杂的下波导层、不掺杂的应变 8 量子阱 InGaAsP/InGaAsP 有源区、不掺杂的上波导层。上、下波导层均为与 InP 匹配的四元 In-GaAsP 层($\lambda_{PL} = 1.1 \mu\text{m}$),8 量子阱有源区的 InGaAsP 阱区压应变量为 1%,阱宽为 3.5 nm;

垒层是应变量为-0.35%的张应变 InGaAsP, $\lambda_{PL} = 1.09 \mu\text{m}$,垒宽为 11 nm。

2.2 BH 器件制备

我们采用了无 SiO₂ 掩膜的条型掩埋(BH)工艺,大大简化了器件制作的工艺流程,解决了脊形波导器件遇到的 SiO₂ 掩膜而电接触不好的问题,提高了成品率。工艺流程如下:(a) 生长如图 1 所示的包括 InP 缓冲层、分别限制的应变补偿 MQW 有源区和 20 nm 厚的 InP 保护盖层的一次外延片;(b) 光刻、湿法腐蚀成 2 μm 的直条台面;(c) 二次外延生长 *P*-InP 和 *N*-InP,光刻 *N*-InP 开窗口,再三次外延生长 *P*-InP 和 *P*⁺-InGaAs 接触层;(d) *P* 面蒸 Au/Zn/Au, *N* 面减薄后蒸 Au/Ge/Ni,合金;(e) 解理、中测后,选择性能好的管芯烧结、压焊、测试。

3 测试及分析

3.1 材料测试

为了确定 GRIN-SCH 8QW 结构的材料特性,测试了其室温光致发光(PL)谱和 X 射线双晶衍射摇摆曲线,如图 2 所示。

在图 2(a) 中样品的激发光源为 Spectrum Physics 氩离子激光器(波长为 5145 nm),用 InGaAs 探测器来探测发光强度,样品的激发功率为 100 mW。由图可知,样品的峰值波长为 1.317 μm,半高宽值(FWHM)为 30 MeV,这一结果可与目前国际报道的单一应变量子阱组成的有源区的 PL 谱(23 MeV)相比拟。

应变层材料的应变变量是用日本理学(Rigaku) SLX-1AL 型 X 射线超晶格测定装置。取 CuKα1 辐射,射线波长 $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$,单色器第一晶体为 Ge(004) 非对称衍射, $\beta = 0.08$,其

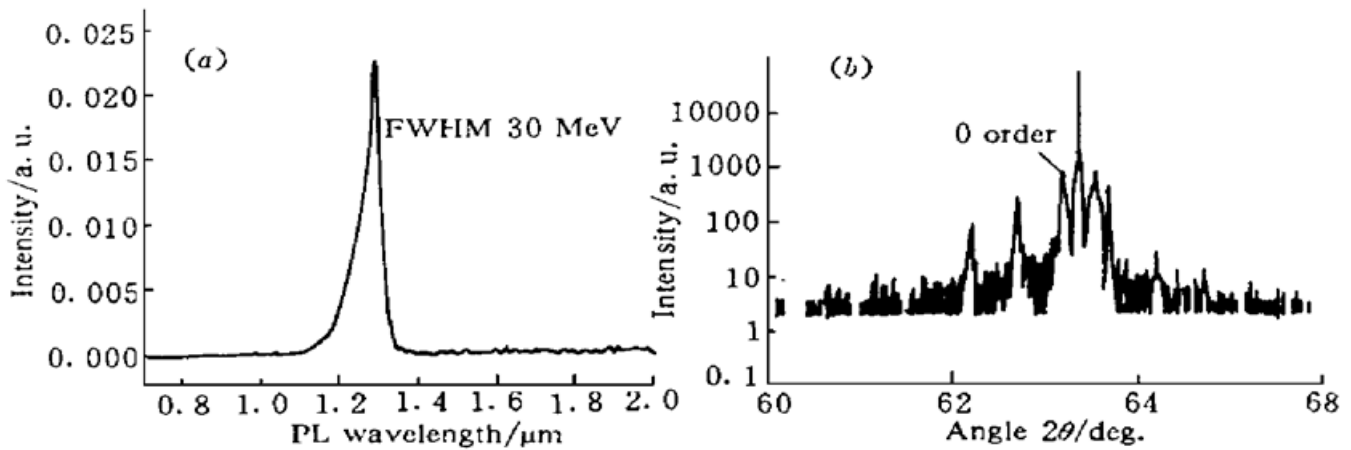


图 2 (a) 8QW 应变补偿的分别限制结构的室温光致发光谱; (b) X 射线双晶衍射曲线

Fig. 2 (a) The RT PL and (b) rocking curve of X-ray double-crystal diffraction of strained-compensated SCH-8QW

X 射线双晶衍射摇摆曲线本征半宽度(FWHM) = 2.3"。入射狭缝宽度为 0.1 mm, 出射狭缝宽度为 0.5 mm。取(004) 衍射。图 2 (b) 为该结构的 X 射线双晶衍射摇摆曲线, 从图中可以看到 ± 4 级以上卫星峰和清晰的峰峰之间的 Pendellosung 衍射条纹, 说明此结构界面陡峭, 而每层有良好的晶格完整性和均匀性, 适合器件制作。从图 2 可看出代表有源区平均应变的 0 级卫星峰在衬底 InP 峰左侧十分接近的地方, 从图中计算可知平均应变量为 0.08%。是个很小的压应变。此应变补偿结构使有源区厚度摆脱单一应变下临界厚度的苛刻限制, 可适当增加有源区的阱数, 提高微分增益, 改善器件的阈值、温度、线性度、输出功率等特性。

3.2 器件测试

将上述结构的 BH 条形激光器芯片解理成腔长为 300 μm 的器件进行测试, 开启电压为 1 V, 反向电压为 10 V, 正向微分串联电阻约为 5 Ω 。用日本安立公司的光谱分析仪测试了其室温下的激射谱, 如图 3 所示, 25 $^{\circ}\text{C}$ 下激射波长为 1.307 μm 。阈值电流低至 4~6 mA, 而目前国际报道的低阈值应变 MQW 激光器也只是在 10 mA 左右^[5,6]。未镀膜单端面斜率效率已达 0.3 mW/mA, 单面线性输出功率高达 30 mW 以上。不同温度下的功率-电流曲线如图 4 所示。温

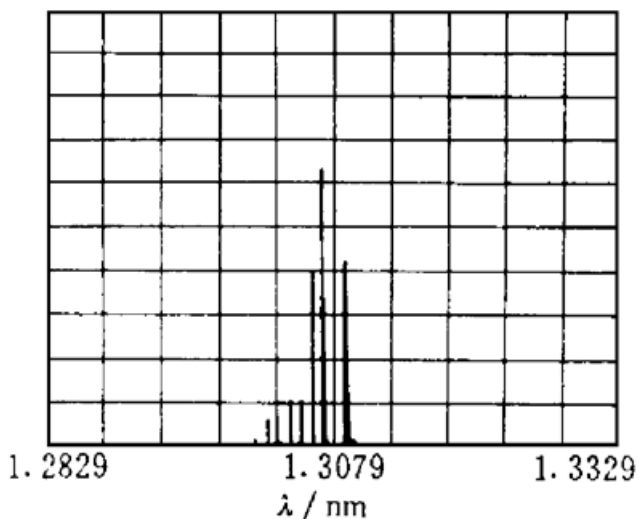


图 3 室温下的激射谱

Fig. 3 The lasing spectrum in the RT

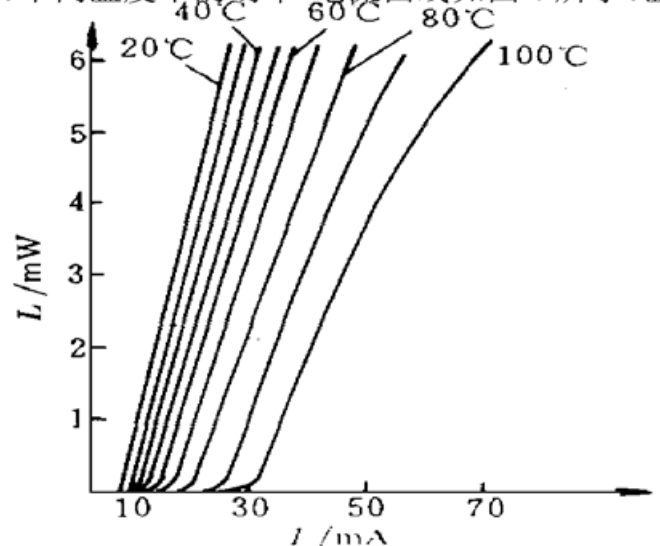


图 4 不同温度下的功率-电流曲线

Fig. 4 The $L-I$ curve at different temperatures

度变化从 20°C 到 100°C (每 10°C 测试一条曲线), 由此可计算出器件在 20~ 40°C 时的特征温度 T_0 为 67 K, 这已与理论计算值相接近^[4]。40~ 100°C 时的 T_0 降为 45 K, 这可能与分别限制层 (SCH) 较少有关, 但 100°C 时, 器件的线性度仍较好, 阈值电流为 30 mA。这表明器件可适用于无制冷光源器件的要求。

4 结 论

用 LP-MOCVD 方法生长了一种 1.3 μm InGaAsP/InP 阱垒压张应变补偿的多量子阱结构材料, 有效地降低了有源区的平均应变量。由其制备的 2 μm 条宽的 BH 结构激光器室温连续工作, 300 μm 腔长时实现了极低阈值电流 (4~ 6 mA) 室温 CW 工作, 高斜率效率 (0.3 mW/mA), 20~ 40°C 时的 T_0 高达 67 K, 可无制冷工作于 100°C 下。

致谢 感谢朱洪亮、张子莹、刘国利在材料生长方面给予的大力帮助, 感谢王玉田在 X 射线双晶衍射测试方面提供的帮助, 感谢孙明方工程师、雷红兵博士在 PL 谱测量, 边静和白云霞在器件解理、烧结、中测等方面给予的极大帮助。

参 考 文 献

- 1 A. R. Adams. Band-structure engineering for low threshold high-efficiency semiconductor lasers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(5): 249~ 250
- 2 E. Yablonoitch, E. O. Kane. Reduction of the lasing threshold current density by lowering the valence band effective mass. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(5): 504~ 506
- 3 T. Kamijoh, H. Horikawa, Y. Matsui *et al.*. Improved operation characteristics of long-wavelength lasers using strained MQW active layers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(2): 524~ 532
- 4 P. J. A. Thijs, T. van Dongen, L. F. Tiemeijer *et al.*. High-performance $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP-InP strained-layer quantum well lasers. *J. Lightwave Technology*, 1994, **12**(1): 28~ 37
- 5 H. Watanabe, T. Aoyagi, A. Takemoto *et al.*. 1.3 μm strained MQW-DFB lasers with extremely low intermodulation distortion for high-speed analog transmission. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(6): 1015~ 1023
- 6 H. Lu, C. Blaauw, T. Makino *et al.*. Single-mode operation over a wide temperature range in 1.3 μm InGaAsP/InP Distributed Feedback lasers. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14**(5): 851~ 859

Low Threshold 1.3 μm InGaAsP/InP Strained Compensated Multi-quantum Well Lasers Grown by LP-MOCVD

Chen Bo Wang Wei Wang Xiaojie Zhang Jingyuan Zhou Fan Ma Chaozhua

(National Research Center for Optoelectronics Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract A 1.3 μm InGaAsP/InP strained compensated multi-quantum wells structure grown by low pressure metalorganic chemical vapor deposition (LP-MOCVD) was proposed. The threshold currents of buried heterostructure (BH) MQW lasers with this strained layers structure were 4~ 6 mA mostly. The characteristic temperatures up to 67K were observed for the devices under a temperature between 20~ 40°C, the single facet slope efficiency is 0.3 mW/mA at room temperature.

Key words strained compensated, InGaAsP, laser, LP-MOCVD