

InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱激光器的研制及其特性研究

安海岩 杨树人 李玉东 胡礼中 刘式墉

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子工程系, 长春 130023)

提要 报道了利用 LP-MOVPE 技术生长高质量的 InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱激光器结构材料、激光器制作和结果。宽面激光器实现了室温脉冲受激发射, 激射波长为 $1.49 \mu\text{m}$, 在腔长为 $2000 \mu\text{m}$ 时, 最低阈值电流密度为 0.30 kAcm^{-2} , 最大脉冲光输出峰值功率达 500 mW 以上。同时, 从理论和实验上研究了阈值电流及阈值电流密度随激光器腔长的变化关系, 并与 LP-MOVPE 生长制作的宽面双异质结构激光器进行了比较。

关键词 LP-MOVPE, 分别限制应变量子阱激光器, 阈值电流密度

1 引言

大量的理论和实验均已证明, 与传统的双异质结(DH)结构激光器相比, 应变量子阱结构激光器(SL-MQW-LD)具有更低的阈值电流密度(J_{th}), 较高的光电转换效率和高的光输出功率^[1,2], 另外在阈值电流的温度特性、频率响应、线宽增强因子等方面也有所改进^[3]。但以 InGaAs 为阱材料, InP 为垒材料的应变量子阱激光器, 其阈值电流密度与采用 InGaAsP 为有源层的传统的 DH 激光器相比, 并没有降低多少, 这主要就是因为 InP 作垒材料, 则高折射率 InGaAs 量子阱有源层过薄, 导致激光器的光限制因子减小。另外, 由于以 InP 为垒材料, 势垒过高, 影响了激光器的载流子的注入效率。为此, 采用四元材料 InGaAsP 代替 InP 作垒材料, 以降低势垒高度, 形成适当势垒高度的载流子限制。同时在量子阱有源区的上、下分别生长对称的四元材料无源波导层, 来增大光限制因子, 并通过上下的低折射率的 InP 构成光限制。这种分别限制应变量子阱(SC-SL-MQW-LD)激光器结构, 可以大大地降低其阈值电流密度。本文报道了具有这种结构的压应变 InGaAs/InGaAsP 量子阱激光器的制作和结果, 并与 LP-MOVPE 生长的 InGaAsP/InP DH 结构激光器进行了比较, 研究了两种不同结构激光器阈值电流和阈值电流密度与激光器腔长的对应关系, 并从理论上作了定性解释。

2 器件结构参数及制备

利用 LP-MOVPE 技术生长高质量的 InP, InGaAs/InP, InGaAsP/InP 材料, 特别是高质量的短波长 InGaAsP 材料($1.0 \sim 1.3 \mu\text{m}$)是生长 InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱激光器结

构材料的基础。我们已利用法国 ASM 公司生产的 LP-MOVPE 设备生长出了高质量的 InP, InGaAs/InP 及短波长 InGaAsP/InP 材料,关于生长的详细情况,我们已作过报道^[4,5]。

以此为基础,我们考虑到量子阱界面效应,进一步优化了生长条件,以 TMIIn, TMGa 为 III 族源, AsH₃, PH₃ 为 V 族源, DEZn 为 p 型掺杂剂, H₂S 为 n 型掺杂剂,首先在 InP : S 衬底上生长了 InGaAsP/InP DH 结构激光器,具体过程和结构将另作报道。宽面激光器实现了室温脉冲激射。我们解理了宽 150 μm,腔长为 200~1000 μm 不等的宽接触 InGaAsP/InP DH 激光器管芯,然后进行了特性测试。

在此工作基础上,我们进行了 InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱激光器的研制工作。其结构及参数如图 1 所示。

将所生长的激光器结构外延片减薄至 ~100 μm,然后在 p 面和 n 面上分别蒸镀 AuZn 和 AuGeNi,并在 450 °C 纯 N₂ 气氛中加热合金化 3 min,制成面接触电极。然后解理成 200~2000 μm 不同腔长,宽为 150 μm 的宽接触 InGaAs/InGaAsP 分别限制压应变量子阱激光器,然后测量其特性。另外,我们还利用所生长的激光器结构材料制作了 H⁺ 离子注入条形激光器,并实现了室温连续激射,具体结构将另文报道。

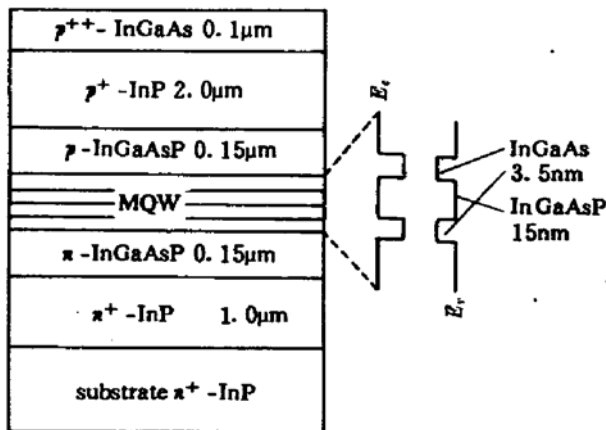


Fig. 1 Schematic diagram of the InGaAs/InGaAsP separated confinement strained MQW laser structure

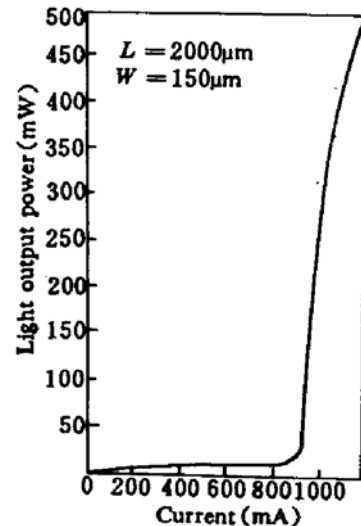


Fig. 2 Light output power versus injection current

3 测试结果与分析

在占空比为千分之一,脉宽为 200 ns 的脉冲注入条件下,分别对不同腔长的 InGaAsP/InP DH 宽面激光器和分别限制 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱宽面激光器的 P-I 特性进行了测试。其中 InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱宽面激光器,在腔长 L 为 2000 μm 时,激射波长为 1.49 μm,最小阈值电流密度为 0.30 kAcm⁻²,最大光输出峰值功率达 500 mW 以上,其 P-I 曲线如图 2 所示。为了对比宽面 DH 激光器与宽面分别限制应变量子阱激光器的阈值电流及电流密度随激光器腔长的变化关系,我们对每一腔长都解理了几个管芯,并对其阈值电流 (I_{th}) 全部进行测量,并计算出其对应的阈值电流密度 (J_{th}),最后求得平均值。实验中发现,对于同一条上解理下的管芯,除边缘处管芯外,阈值电流及阈值电流密度基本上相同,表明激光器结构材料的质量均匀性很高。图 3 为分别限制应变量子阱激光器及 LP-MOVPE 生长的 DH 结构激光器在室温脉冲条件下的阈值电流密度 (J_{th}) 与腔长的倒数 (1/L) 之间的关系曲线。可以看

出,对于 DH 激光器,其阈值电流密度随腔长倒数成线性增长关系,且外推可知无限腔长的阈值电流密度为 0.60 kAcm^{-2} 。而分别限制应变量子阱激光器的阈值电流密度随腔长倒数的变化关系却不同,长腔长激光器的阈值电流密度很低,腔长为 $2000 \mu\text{m}$ 时,阈值电流密度为 0.3 kAcm^{-2} ,外推无限腔长的阈值电流密度为 0.28 kAcm^{-2} 。但在腔长比较短时,从图 3 可以看出,对于分别限制应变量子阱激光器,随着 $1/L$ 增大,阈值电流密度 J_{th} 急剧增大,与 DH 激光器的相比,表现出明显的差别。

此实验现象正与理论上的激光器增益 (g) 与电流密度 (J) 之间的关系一致,可作如下定性解释。对于 InGaAs/InP DH 激光器,其增益与电流密度的关系是线性的

$$g = \beta J \quad (1)$$

由此可得

$$J_{th} = \frac{1}{\beta} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right) \quad (2)$$

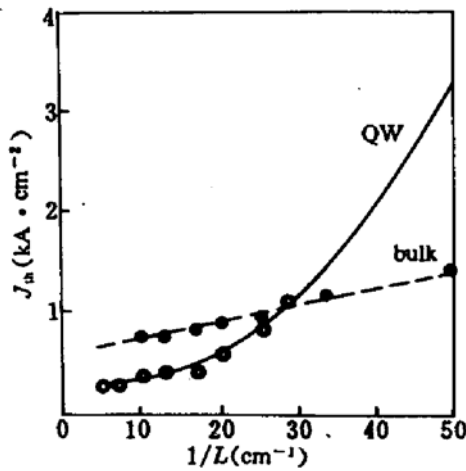


Fig. 3 Threshold current densities of InGaAs/InGaAsP SC-SL-MQW broad area lasers as a function of cavity length

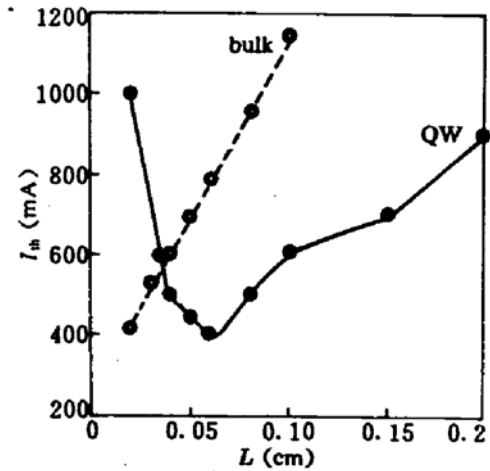


Fig. 4 Dependence of threshold current of InGaAs/InGaAsP SC-SL-MQW broad area lasers on cavity length

其中 β 为增益因子, α 为内损耗系数, L 为激光器腔长, R_1, R_2 为两个端面的反射率。而对于分别限制应变量子阱激光器,其增益与电流密度之间的关系是非线性的^[6]

$$g = j_0 b \ln(J/j_0), \quad g > 0 \quad (3)$$

且由此得

$$J_{th} \approx \frac{N_s j_0}{\eta_i} \exp \left[\frac{1}{b j_0 \Gamma} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (4)$$

其中 j_0 为透明电流密度 (current density at transparency), b 为增益与电流密度关系因子, N_s 为阱数, η_i 为内量子效率, Γ 为光限制因子, 对于不考虑阱间相互作用的情况下, $\Gamma = N_s \Gamma_{sqw}$, 其中 Γ_{sqw} 为单量子阱的光限制因子。从(4)式可以看出,当腔长 L 太短时,光传播过程中端面损耗变大,这就必须通过增大注入电流从而增大光增益来补偿,而对于薄的量子阱有源层,光增益在相对比较低的电流密度下便达到了饱和,同时,由于大的注入电流密度,使 $1.2 \mu\text{m}$ 的光限制层开始受激发光。因此,对于分别限制应变量子阱激光器,当腔长 L 很短时, J_{th} 随着 $1/L$ 增大成指数关系增大。

图 4 为分别限制应变量子阱激光器及 DH 激光器的阈值电流 (I_{th}) 与腔长 (L) 之间的关系曲线。从图中可以看出,传统的 DH 激光器的阈值电流 I_{th} 随 L 的减小而线性地减小;而对于分别限制应变量子阱激光器,在腔长太短时,由于端面损耗变大而成为主要损耗,使阈值电流 I_{th} 急剧增大,而当腔长较长时,内部损耗起主要作用,也使阈值直流 I_{th} 增大。因此,正如图 4 所示,

当量子阱数一定时,分别限制应变量子阱激光器存在一个使阈值电流为最小的腔长,对于我们的实验结果,这一腔长约为 600 μm ,这一研究结果对于研究同时要求大功率,低阈值应变量子阱激光器的结构优化设计是十分重要的。

我们利用 LP-MOVPE 研制出了室温脉冲激射的 InGaAs/InGaAsP 分别限制应变量子阱激光器,并研究了其特性,同时与 LP-MOVPE 生长的室温脉冲激射 DH 结构激光器作了比较。分别限制应变量子阱激光器阈值电流密度 J_{th} 在腔长较长时明显低于 DH 结构激光器的阈值电流密度;但在腔长很短时,其阈值电流密度明显地高于相同腔长的 DH 结构激光器的 J_{th} 。另外,DH 结构激光器的阈值电流 I_{th} 与腔长 L 成线性关系变化,而分别限制应变量子阱激光器却存在一个阈值电流 I_{th} 最小的腔长,这一研究对应变量子阱激光器的结构参数优化设计提供了理论和实验上的依据。

参 考 文 献

- 1 Glew R. W., Garrett B., Green P. D. Very low threshold current density SCH-MQW laser diodes emitting at 1.55 μm . *Electr. Lett.*, 1989, 25: 1103~1104
- 2 Kitamura M., Takno S., Sasaki T. *et al.* High-power operation in InGaAs separate confinement heterostructure quantum well laser diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(1): 1~37
- 3 Yidong Huang, Shigehisa Arai, Kazuhiro Komori. Theoretical linewidth enhancement factor a of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaInAsP}/\text{InP}$ strained-quantum-well structures. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(2): 142~145
- 4 陈佰军,杨树人,刘宝林等. LP-MOCVD 法制备高质量 InP 薄膜. 吉林大学自然科学学报, 1993, (2): 59
- 5 安海岩,杨树人,秦福文等. 短波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 材料的 LP-MOVPE 生长. 吉林大学自然科学学报, 1994, (3): 62~66
- 6 J. Z. Wilcox, G. L. Peterson, S. Qu *et al.* Gain and threshold-current dependence of multiple-quantum-well lasers. *J. Appl. Phys.*, 1988, 64(11): 6564~6567

Fabrication of InGaAs/InGaAsP Separated Confinement Strained-layer Multiple-quantum-well Lasers and the Research of Their Lasing Characteristics

An Haiyan Yang Shuren Li Yudong Hu Lizhong Liu Shiyong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region,

Department of Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130023)

Abstract The successful fabrication of the room temperature broad-area InGaAs/InGaAsP separated confinement strained-layer multiple-quantum-well (MQW) pulsed lasers at 1.49 μm emission wavelength using LP-MOVPE is reported. The lowest threshold current density (J_{th}) at room temperature is 0.3 kAcm^{-2} for the cavity length of 2000 μm . The power saturation doesn't occur yet while the pulsed output power is higher than 500 mW. Furthermore, the threshold current densities of these broad area lasers at varying cavity lengths have been investigated by comparing with those of the room temperature broad-area pulsed DH lasers grown by LP-MOVPE.

Key words LP-MOVPE, separated confinement strained-layer MQW lasers, threshold current density