

# 高功率梯度折射率分别限制异质结构 InGaAs/AlGaAs 应变双量子阱激光器\*

陈国鹰

(河北工业大学电子工程系, 天津 300130)

马祖光 王新桥\*\*

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 采用金属有机化合物气相淀积(MOCVD)方法成功地研制了具有两对梯度折射率(GRIN)异质结结构的 InGaAs/AlGaAs 应变双量子阱激光器。该激光器的波长为 970~982 nm, 室温连续工作阈值电流密度为  $140 \text{ A/cm}^2$ , 工作在 0.9 A 时单面连续输出光功率为 520 mW, 工作在 2.0 A 时, 连续输出光功率为 1.49 W, 最大功率可达 2.4 W。微分量子效率高达 0.83 W/A。  
**关键词** 梯度折射率, 分别限制异质结, 应变层, 双量子阱, 激光器。

## 1 引 言

由于量子阱激光器具有较低的阈值电流<sup>[1]</sup>、较高的输出功率<sup>[2, 3]</sup>、窄的谱线线宽<sup>[4]</sup>、阈值电流对温度的弱依赖性<sup>[5]</sup>、可高速调制以及宽的调制带宽<sup>[6, 7]</sup>等优点, 使得它广泛地应用于光纤通讯、信息处理、激光打印、光传感等领域。高功率 980 nm 量子阱激光器是掺铒光纤放大器和其它晶体激光器的理想泵浦光源。

近年来, 在国内外发展了一种新型的“应变层”超晶格结构<sup>[8]</sup>材料。将应变层引入到量子阱激光器中, 通过降低带间的吸收来增加量子效率, 减少俄歇复合概率以控制无效电流, 对应变层应力、层厚和组分的控制可改善激光器的光电特性, 从而研制出更高性能的量子阱激光器。为了改善量子阱激光器的光模限制因子, 发展了梯度折射率分别限制异质结构(Graded Index Separate Confinement Heterostructure, 缩写为 GRIN-SCH)<sup>[9]</sup>。由于这种结构具有波导效应, 因而增大了限制因子, 提高了光的输出功率。

为了获得较高的光功率输出, 作者成功地研制出了具有两对梯度折射率结构的高功率 InGaAs/AlGaAs 应变双量子阱激光器。该激光器的波长为 970~982 nm, 最高连续输出光功率为 2.4 W。

\* 河北省自然科学基金重点资助项目。

\*\* 通讯地址: The University of New Mexico, Albuquerque NM 87131-6081。

收稿日期: 1998-02-18; 收到修改稿日期: 1998-05-06

## 2 激光器的结构与制备

所设计的具有梯度折射率分别限制异质结构的 InGaAs/AlGaAs 应变双量子阱激光器的结构截面示意图如图 1(a) 所示。

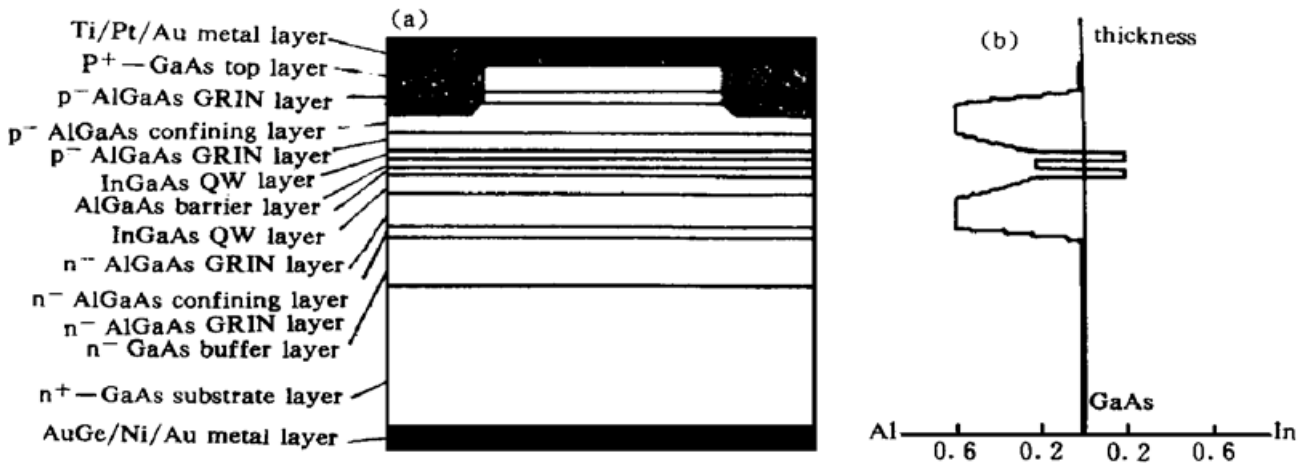


Fig. 1 Schematic structure of GRIN-SCH strained InGaAs/AlGaAs DQW laser

采用金属有机化合物气相淀积生长技术, 首先在  $n^+$ -GaAs 衬底上生长上一层  $2\ \mu\text{m}$  厚的缓冲层。然后依次生长上:  $50\ \text{nm}$  厚的  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  梯度折射率层, 其 Al 的质量分数  $x$  由 0 逐渐增加到 0.6;  $n\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  ( $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ) 限制层, 层厚  $1.5\ \mu\text{m}$ ;  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ) 梯度折射率层 ( $x = 0.6 \sim 0.2$ ), 层厚  $0.36\ \mu\text{m}$ ; 两个不掺杂的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  双量子阱结构, 中间由不掺杂的  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  势垒层隔开, 每一个量子阱的阱宽和势垒层厚均为  $10\ \text{nm}$ ;  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ) 梯度折射率层 ( $x = 0.2 \sim 0.6$ ), 层厚  $0.36\ \mu\text{m}$ ;  $p\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  ( $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ) 限制层, 层厚  $1.5\ \mu\text{m}$ ;  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  梯度折射率层,  $50\ \text{nm}$  厚,  $x$  由 0.6 逐渐减小到 0; 最后生长上  $p^+$ -GaAs ( $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ) 接触层, 层厚  $1.0\ \mu\text{m}$ 。梯度折射率分别限制异质结构应变双量子阱激光器的层厚和材料组分分布如图 1(b) 所示。

从设计的结构可以看到, 为了实现对光子和载流子的紧密限制, 采用了两对梯度折射率异质结结构, 形成纵向的光波导和载流子势垒, 用以提高对光子和载流子的限制能力, 从而达到降低阈值电流密度, 提高输出光功率的目的。

在  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  材料上交替生长上的两个量子阱材料  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , 由于  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  的晶格常数比  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  的大, 带隙比  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  小, 两种材料的晶格常数相差较大, 因而在  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  层中产生应变。只要精确地控制各层厚度和组分, 就能让晶格的弹性形变来抵消薄层间晶格的失配, 在平行方向达到一个统一的平衡晶格常数, 从而减小、甚至消除各层间的失配位错。实验表明, 即使材料的晶格失配度高达 7%, 也能制作出高质量的超晶格。

为了限制电流侧向的扩展, 又能有足够宽的发光区域, 以获得低阈值、高功率的激光器, 在 p 型面两侧采用质子轰击的办法形成两侧高阻的绝缘层, 中间为低阻的  $150\ \mu\text{m}$  宽的条形电极。质子轰击的深度为  $1.5\ \mu\text{m}$ , 轰击区的电阻率大约为  $10^7\ \Omega\text{cm}$ 。采用质子轰击的方法制作电流限制条形, 由于没有介质薄膜夹杂在  $p^+$ -GaAs 层和金属接触层之间, 所以器件具有较好的导热特性和高可靠电极接触特性。

采用电子束蒸发的方法在外延片的 p 型面蒸镀上金属接触层 Ti/Pt/Au, 其厚度分别为  $40/20/400\ \text{nm}$ 。n 型面蒸镀上 AuGe/Ni/Au, 其厚度分别为  $40/40/400\ \text{nm}$ 。完成芯片金属化后, 将外延片解理成腔长为  $1000\ \mu\text{m}$  的条, 在条的两个解理端面分别镀上高反射(HR)和增透(AR)膜。

然后,再解理成条宽为  $300\ \mu\text{m}$  的管芯, p 型面朝下, 钎焊于铜热沉上, 装管测试。

### 3 激光器的特性

采用半导体激光器特性综合测试系统, 在室温  $23^\circ\text{C}$  情况下, 对研制的梯度折射率分别限制异质结构应变 InGaAs/AlGaAs 双量子阱激光器进行了测试\*。

图 2 给出了激光器的输出光功率与注入电流关系 ( $P-I$  特性曲线) 的典型曲线。由图可见, 激光器在室温下能够稳定连续工作, 在很大的输出光功率范围内无扭折现象发生。激光器的阈值电流为  $210\ \text{mA}$ , 工作在  $990\ \text{mA}$  时, 单端连续输出光功率达  $600\ \text{mW}$ ; 工作电流在  $2.01\ \text{A}$  时, 连续输出光功率为  $1.49\ \text{W}$ , 极限功率可达  $2.42\ \text{W}$ 。实验测得激光器的微分量子效率高达  $0.83\ \text{W/A}$ 。

图 3 给出测得的激光器的发射光谱, 其峰值波长为  $977.8\ \text{nm}$ , 光谱线宽度为  $1.3\ \text{nm}$ 。

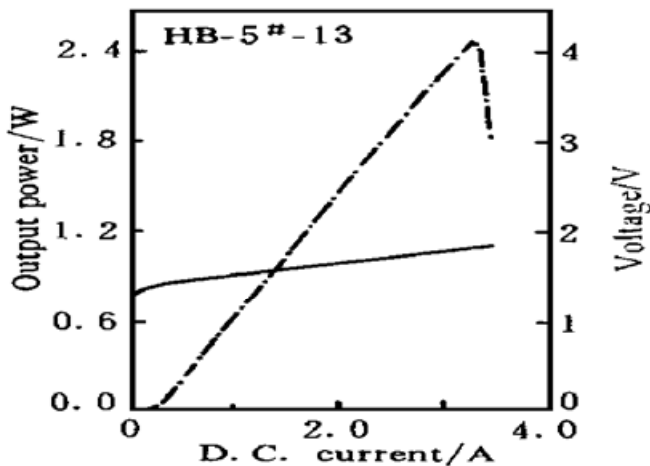


Fig. 2 Optical output power from one facet versus injected current under CW operation.

— Voltage, - · - · - Output power

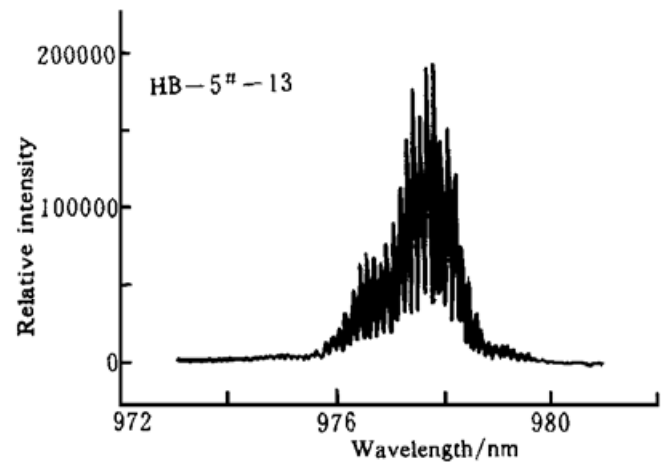


Fig. 3 The longitudinal mode lasing spectrum of the laser

当激光器输出光功率为  $520\ \text{mW}$  时, 激光器的平行于 ( $//$ ) 结平面和垂直于 ( $\perp$ ) 结平面方向的远场光强分布分别如图 4(a) 和 (b) 所示。由图得到, 平行于结平面方向和垂直于结平面方向的光强分布半宽度 (FWHP) 束发散分别为  $3.9^\circ$  和  $37.8^\circ$ 。通过对激光器的近场光斑和远场分布测试表明, 激光器在较高的输出光功率情况下, 仍能工作在基横模状态。

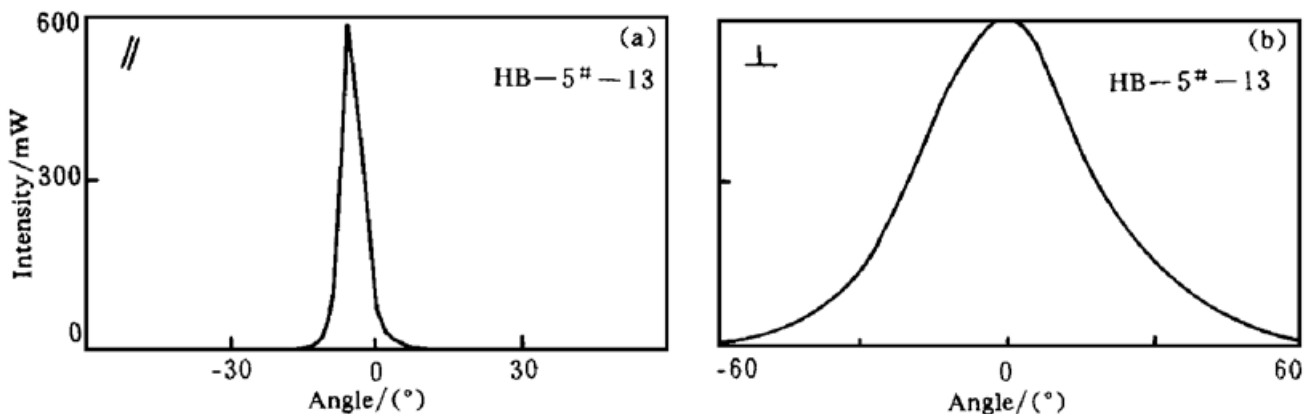


Fig. 4 Far-field pattern of the laser

\* 该测试工作在中科院半导体所进行。

## 4 分析与讨论

1) 由 AlGaAs 材料和 InGaAs 材料系统的晶格失配引起的应变效应主要以两种方式影响 InGaAs 量子阱的能带性质。第一种效应是使导带产生一个向上的移动, 同时使两个价带产生向下的移动, 带隙略有增大; 第二种效应, 也是最重要的效应, 是使价带中的重空穴能级和轻空穴能级分离, 并被推向相反的方向, 简并被消除, 总的禁带宽度减小。同时考虑到这两种应变效应, 在 InGaAs/AlGaAs 应变量子阱  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  层中, 对重空穴(Heavy Hole, 缩写为 HH) 总的禁带能量变化  $E_g$  可以近似地表示为

$$E_g(\text{HH}) = 1.424 - 1.060x + 0.080x^2 \quad (1)$$

式中  $x$  为  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料中 In 的原子组分。轻空穴(Light Hole, 缩写为 LH) 和重空穴之间的禁带宽度差为

$$\Delta E_g = E_g(\text{LH}) - E_g(\text{HH}) = 0.465x - 0.33x^2 \quad (2)$$

由于采用了  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  应变量子阱结构, 使得注入电流密度降低, 从而获得了较高的微分量子效率和光电转换效率。

2) 在对高功率量子阱激光器的设计过程中, 通过对增益饱和效应的计算分析表明, 在具有相同的载流子浓度和量子阱层厚的情况下, 单量子阱(SQW) 比起双量子阱(DQW) 较早地发生增益饱和。此外, 在高功率半导体激光器中, 丝状发光效应主要是由增益和反波导  $\alpha$  因子的耦合作用引起的。 $\alpha$  因子的降低可以抑制在高功率半导体激光器中丝状发光的形成, 从而大大降低平行结方向的远场发散角。在双量子阱中比单量子阱中具有较高的微分增益, 较小的  $\alpha$  值。本工作设计的激光器获得了低至  $3.9^\circ$  的平行结方向的远场发散角。这就是为什么选取双量子阱结构的两个原因。

3) 所采用的两对梯度折射率异质结结构, 具有较好的光学和电学分别限制作用和较高的载流子收集效率, 另外还起到了附加缓冲层的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Tsang W T. Extremely low threshold (AlGa)As modified multiquantum well heterostructure lasers grown by molecular-beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**(7) : 786~ 788
- [2] Kasemset D, Hong C S, Patel N B *et al.*. Graded barrier single quantum well lasers-theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **19**(4) : 1025~ 1030
- [3] Sugimura A. Threshold current for AlGaAs quantum well lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **20**(2) : 336~ 343
- [4] Derry P L, Chen T R, Zhuang Y H *et al.*. Spectral and dynamic characteristics of buried-heterostructure single quantum well (Al, Ga)As lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(4) : 271~ 273
- [5] Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(8) : 939~ 941
- [6] Arakawa Y, Yakir A. Quantum well lasers-gain, spectra, dynamics. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(7) : 1887~ 1899
- [7] Uomi K, Mishima T, Chinone N. Ultrahigh relaxation oscillation frequency (up to 30 GHz) of highly p-doped GaAs/GaAlAs multiple quantum well lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(1) : 78~ 80
- [8] Ishikawa H. Theoretical gain of strained quantum well grown on an InGaAs ternary substrate. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(6) : 712~ 714
- [9] Li Z, Dzurko K M, Delage A, McIister S P. A self-consistent two-dimensional model of quantum-well

semiconductor lasers: optimization of a GRIN-SCH SQW laser structure. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4) : 792~ 803

## Strained InGaAs/AlGaAs Double Quantum Well Laser with GRIN-SCH

Chen Guoying

(*Department of Electronic Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130*)

Ma Zuguang      Wang Xingqiao\*

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

(Received 18 February 1998; revised 6 May 1998)

**Abstract** Strained InGaAs/AlGaAs double quantum well lasers with two pairs of graded index (GRIN) heterostructure have been fabricated by MOCVD method. Its wavelength ranges from 970 to 982 nm, threshold current density is  $140 \text{ A/cm}^2$  at room temperature CW operation. 520 mW/facet and 1.49 W/facet for CW output optical power has been obtained under 0.9 A and 2.0 A operation, respectively. The maximum CW output optical power can come up to 2.4 W/facet.

**Key words** graded index, separate confinement heterostructure (SCH), strained layer, double quantum wells, laser.

---

\* Present address: The University of New Mexico, Albuquerque NM 87131-6081