

# 低阈值电流密度 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器

徐遵图<sup>1,2</sup> 徐俊英<sup>1</sup> 杨国文<sup>1</sup> 张敬明<sup>1</sup> 陈昌华<sup>1</sup> 何晓曦<sup>1</sup> 陈良惠<sup>1</sup> 沈光地<sup>2</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 国家光电子工程研究中心 北京 100083)

(2 北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室 北京 100022)

**摘要** 利用分子束外延技术,生长了极低阈值电流密度、低内损耗、高量子效率的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。在腔长 900μm 时,80μm 宽接触激光器阈值电流密度是 125A/cm<sup>2</sup>,在腔长为 2000μm 时是 113A/cm<sup>2</sup>,这样低的阈值电流密度是目前国内报道的最低值。激光器的内损耗和内量子效率分别是 2cm<sup>-1</sup> 和 84%。

PACC: 4255P, 4280R, 7360F

## 1 引言

随着分子束外延(MBE)、金属有机化合物气相沉积(MOCVD)、化学束外延(CBE)等超薄层生长技术的发展,使得几十纳米甚至单原子层的超晶格及量子阱材料的实现成为可能,这极大地促进了半导体光电子器件特别是半导体激光器的飞速发展。有源区采用量子阱结构使得半导体激光器的特性,如阈值电流密度、内量子效率、微分量子效率、内损耗等有了很大的改善。激光器的阈值电流密度是其重要参数之一,阈值电流密度的降低使极低阈值电流的激光器得以实现,这在光计算、光互连、光电子集成等领域有重要应用,同时阈值电流密度的降低及微分量子效率的提高也降低了激光器的工作电流,从而降低了激光器的发热,使大功率半导体激光器得到了很大的发展。量子阱半导体激光器和双异质结体材料半导体激光器相比,阈值电流密度降低了三分之一左右。量子阱中应变的引入又使半导体激光器的特性有了进一步的提高,因为 InGaAs 应变层的引入使原来晶格的对称性发生变化,在平行结平面的两个方向的晶格常数比原来的要小,因而受到双轴压应力,在垂直于结平面方向,晶格则得到延伸,该晶格对称性的改变直接导致了能带结构的改变,即轻、重空穴带分开、能带形状也发生变化,这种能带结构的改变正是人们所期望的十分重要的能带工程,它改变了无应变量子阱激光器中小的导带态密度与非常大的价带态密度之间较大的不对称性,从而提高了激光器的性能,如价带态密度的降低使粒子数反转更容易,从而阈值电流密度进一步降低<sup>[1]</sup>;除此之外其优越性还表现在:发射波长的延拓,填补了晶格匹配材料发射波长的盲区(0.9~1.1μm)<sup>[2]</sup>;俄歇复合的减小使工作温度提高, $T_{\text{g}}$  值高<sup>[3]</sup>;高的微分增益使得调制频率

徐遵图 男,1964 年生,助理研究员,博士生,从事分子束外延材料生长,量子阱激光器结构设计,器件制备及分析  
1996 年 5 月 9 日收到初稿,1996 年 7 月 5 日收到修改稿

提高,调制带宽加宽<sup>[2]</sup>等。这些优越的特性使得应变量子阱半导体激光器在最近几年得到了飞速发展。国内已报道 InGaAs/GaAs 应变量子阱激光器的最低阈值电流密度为 145A/cm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>,国际上 MBE 生长同类结构激光器的阈值电流密度已低于 100A/cm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,其中限制层的 Al 组分很高,大于 0.6。本文报道了 MBE 生长 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的最新进展。

## 2 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的结构及材料生长

激光器采用线性缓变折射率分别限制单量子阱结构,这种结构具有如下的特点:(1)具有好的光学和电学分别限制作用,(2)对载流子的收集效率高,(3)单量子阱结构在低的损耗下具有最低的阈值电流密度。外延生长所用衬底为(100)面偏(111)A 方向 4 度的掺硅 GaAs 衬底。外延生长之前,在 580℃下将衬底表面的自身氧化物热分解掉,然后按下列结构进行生长:在 n-GaAs 衬底上生长 0.5μm 的 n-GaAs 缓冲层(掺 Si:3×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>);0.15μm 的 n-Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As(掺 Si:3×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>)组分缓变层,x 值从 0.1 升高到 0.45;1.5μm 的 n-Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As(掺 Si:1×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>)限制层;0.1μm 非掺的线性缓变折射率 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 下波导层,x 值从 0.45 下降到 0.1;10nm 的 GaAs、6nm 的 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 和 10nm 的 GaAs 组成的单量子阱区;0.10μm 的非掺的线性缓变折射率 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 上波导层,Al 组分从 0.1 上升到 0.45,1.5μm 的 Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As 上限制层(掺 Be:5×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>);最后生长 0.2μm 的 p<sup>+</sup>-GaAs(掺 Be:1×10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>)和 20nm 的 p<sup>++</sup>-GaAs(掺 Be:5×10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>)欧姆接触层。在整个生长过程中,衬底不断旋转,且外延生长过程连续进行,没有任何停顿,保证了材料的均匀性和质量。

MBE 外延生长的 AlGaAs 及 InGaAs/GaAs 材料是 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的关键材料,它的优劣直接影响着激光器的特性,如阈值电流密度、内损耗、内量子效率等。我们对生长的 AlGaAs 材料及 InGaAs/GaAs 应变量子阱材料的质量进行了检测。X 射线双晶衍射及光致发光谱用来检测 AlGaAs 的质量,双晶衍射测量结果表明,其衍射峰半高宽很窄,一般小于 20",并且有很多 Pendellosung 条纹出现,说明材料的完整性较好。光致发光测量结果表明,在低激发功率下,没有杂质峰出现,且半峰宽小于 10meV,发光强度也很强,这说明 AlGaAs 材料的质量是很高的。InGaAs/GaAs 应变量子阱是激光器的心脏,

我们用光致发光方法检测了其质量,结果是峰值半宽仅 4meV。高质量的 AlGaAs、InGaAs/GaAs 应变量子阱材料的生长使降低阈值电流密度成为可能,也进一步提高了激光器的性能。

## 3 激光器的制备及特性

我们用 MBE 生长的激光器材料,制备出了 80μm 宽接触激光器,其结构如图 1 所示。具体制备过程如下:光刻制备出 80μm 的双沟宽条,用酸性腐蚀液腐蚀出双沟宽台面,用

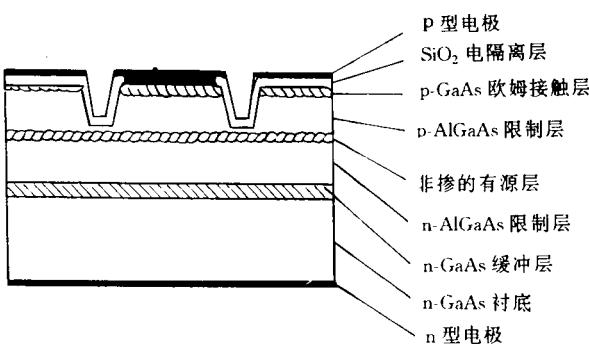


图 1 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱  
激光器结构示意图

PECVD 方法淀积 150nm SiO<sub>2</sub>, 然后套刻电极窗口, 用氢氟酸缓冲腐蚀液腐蚀掉台面上的 SiO<sub>2</sub>, 最后将片子减薄至 100μm, TiPtAu 和 AuGeNi 分别做为 p 型和 n 型的欧姆接触电极。将制备出的片子, 解理成不同腔长的管芯, 再将管芯烧结在镀 In 的铜热沉上。

我们测量了不同腔长 InGaAs/GaAs 应变量子阱激光器的输出光功率与注入电流的关系, 其结果示于表 1, 从表中可以看出, 腔长为 900μm 时阈值电流为 90mA。当腔长增加到 2000μm 时, 阈值电流为 180mA。我们知道半导体激光器的阈值电流密度  $J_{th}$  被表达为下式<sup>[6]</sup>:

$$J_{th} = J_0 + (\alpha_i de) / (g\tau\Gamma) + [(de)/(2g\tau\Gamma)][\ln(R_1 R_2)^{-1}/L] \quad (1)$$

式中  $J_0$  是透明电流密度;  $\alpha_i$  是内损耗;  $g$  是微分增益;  $\tau$  是载流子寿命;  $d$  是有源区厚度;  $e$  为电子的电量;  $\Gamma$  是光限制因子;  $L$  是腔长;  $R_1, R_2$  是腔面反射率。从公式(1)中可以看出, 当腔长增大时,  $(1/L)\ln(R_1 R_2)^{-1}$  项减小, 阈值电流密度将减小。用表 1 的实验数据换算成阈值电流密度, 其结果示于图 2, 从图 2 我们看出当腔长为 900μm 时阈值电流密度为 125A/cm<sup>2</sup>, 当腔长增加到 2000μm 时, 阈值电流密度降为 113A/cm<sup>2</sup>, 这是国内报道半导体量子阱激光器的最好水平, 相当同类结构国际先进水平。

表 1 80μm 宽结触应变量子阱激光器在不同腔长时的阈值电流  $I_{th}$  和微分量子效率  $\eta_d$

腔长/μm	300	500	700	900	1500	2000
$I_{th}/mA$	90	100	80	90	150	180
$\eta_d/\%$	40.6	39.0	37.5	36.0	33.3	31.4

激光器的内损耗和内量子效率也是标志着激光器特性的重要参数, 我们知道激光器的微分量子效率  $\eta_d$  和腔长  $L$  的关系满足下式:

$$\eta_d^{-1} = \eta_i^{-1}[1 + (2\alpha_i L)/\ln(R_1 R_2)^{-1}] \quad (2)$$

式中  $\eta_i$  为内量子效率;  $R_1, R_2$  分别为前后腔面的反射率。我们把不同腔长激光器的微分量子效率的实验值列于表 1 中, 从这些数据我们得到了微分量子效率和腔长的实验关系曲线, 如图 3 所示, 可以看出微分量子效率的倒数  $\eta_d^{-1}$  与腔长  $L$  成线性关系。并且从曲线中我们可以得到激光器的内量子效率  $\eta_i$  和内损耗  $\alpha_i$ , 结果分别为 84% 和 2cm<sup>-1</sup>, 这样低的内损耗说明我们生长的材料及其量子阱界面的平整性是非常好的。InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的发射光谱被示于图 4, 中心发射波长为 950nm。波长偏离 980nm 是由于铟炉温度低造成铟的组分偏低所致。提高铟炉温度, 增加铟的组分可以把波长调整到 980nm。

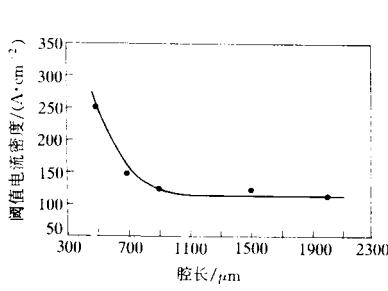


图 2 阈值电流密度和腔长的关系

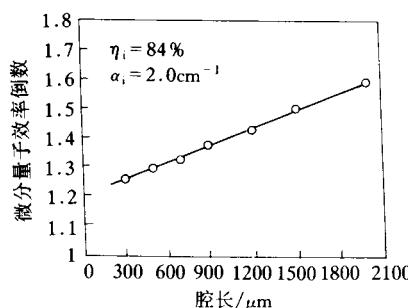


图 3 微分量子效率和腔长的关系

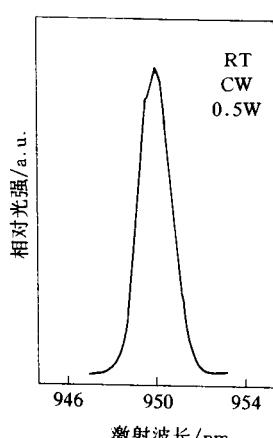


图 4 激光器光谱图

从以上数据可以看出,我们利用 MBE 生长技术,生长了低阈值电流密度的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,其最低阈值电流密度为  $113\text{A}/\text{cm}^2$ . 这样低的阈值电流密度归功于下列因素:(1) 优化的线性缓变折射率分别限制单量子阱结构设计,(2) 有源区应变量子阱的应用,(3) 高质量 GaAs、AlGaAs 和高质量应变量子阱 InGaAs/GaAs 材料,(4) InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的低内损耗.

#### 4 结论

利用分子束外延的方法,通过对器件结构参数的优化,以及对生长条件的优化,研制出了极低阈值电流密度,低内损耗,高量子效率的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,在腔长  $2000\mu\text{m}$  时其  $80\mu\text{m}$  宽接触激光器阈值电流密度是  $113\text{A}/\text{cm}^2$ , 内损耗值为  $2\text{cm}^{-1}$ , 内量子效率是 84%.

#### 参 考 文 献

- [1] H. K. Choi and C. A. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 321.
- [2] D. J. Arent, K. Denefle, C. Van Hoof *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**: 1739.
- [3] J. P. Van der Ziel and N. Chand, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**: 1437.
- [4] Yang Guowen, Xu Junying, Xiao Jianwei and Xu Zuntu, *半导体学报*, 1994, **15**: 565.
- [5] Naresh Chend, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 755.
- [6] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Academic Press, New York, 1978, Part A:56.

### Low Threshold Current Density InGaAs/GaAs/AlGaAs Strained Quantum Well Lasers

Xu Zuntu<sup>1,2</sup>, Xu Junying<sup>1</sup>, Yang Guowen<sup>1</sup>, Zhang Jingming<sup>1</sup>, Chen Changhua<sup>1</sup>, He Xiaoxi<sup>1</sup>, Chen Lianghui<sup>1</sup> and Shen Guangdi<sup>2</sup>

(1 *Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences and National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Beijing 100083*)

(2 *Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing 100022*)

Received 9 May 1996, revised manuscript received 5 July 1996

**Abstract** Using molecular beam epitaxy we have fabricated low threshold current density InGaAs/GaAs/AlGaAs quantum well lasers. For  $80\mu\text{m}$  broad-area, uncoat Fabry-Perot lasers with cavity length of  $900\mu\text{m}$  and  $2000\mu\text{m}$ , the threshold current density are  $125\text{A}/\text{cm}^2$  and  $113\text{A}/\text{cm}^2$ , respectively. This is the lowest value up to now in all of reports in China. Total internal loss and internal quantum efficiency are  $2\text{cm}^{-1}$  and 84%, respectively.

**PACC:** 4255P, 4280R, 7360F