

# 室温连续激射 $1.59\mu\text{m}$ GaInNAsSb 量子阱激光器\*

赵欢<sup>†</sup> 杜云 倪海桥 张石勇 韩勤 徐应强 牛智川 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 研究了原位和非原位退火对分子束外延生长的 GaInNAsSb/GaNAs/GaAs 量子阱激光器的作用. 通过快速热退火量子阱质量得到很大提高, 这一方法还很少被应用于激光器的制作, 特别是波长在  $1.55\mu\text{m}$  波段的激光器. 生长量子阱时采用的生长速率、Sb 诱导等, 将量子阱激光器发光波长拓展到  $1.59\mu\text{m}$ , 并制作了脊型波导 FP 腔 GaInNAsSb 单阱激光器, 成功实现了室温连续激射, 激射波长达到  $1.59\mu\text{m}$ , 阈值电流为  $2.6\text{kA}/\text{cm}^2$ .

**关键词:** 分子束外延; 快速热退火; 量子阱

**PACC:** 8115G; 8140G; 7855E

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0486-03

## 1 引言

$1.3\sim 1.55\mu\text{m}$  近红外波段对应着石英光纤的低色散、低损耗窗口, 这一波段的激光器和探测器是光纤通信系统最核心的光电子器件. 目前在光纤通信中使用的 InP 基材料体系发展比较成熟, 但是在拓展集成化和功能化方面仍有如下不足: 与以 Si 基和 GaAs 基为主的高度发展的微电子器件进行单片集成的兼容性差; 由于 InGaAsP/InP 的导带带阶较小使得 InGaAsP 器件的温度特性较差; 由于能和 InP 基匹配的材料折射率差别较小, 在研制垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 共振腔接收器阵列及功能单片集成等方面存在很大困难; 在 InP 衬底上生长材料的成本较高, 技术也比较复杂. 而新型 GaAs 材料晶格常数能与 Si 衬底匹配, 还可利用 GaAs/AlAs 的 Bragg 反射器结构制备垂直运作器件<sup>[1]</sup>. 目前, 高性能的  $1.3\mu\text{m}$  GaInNAs 量子阱宽接触激光器阈值电流低达  $210\sim 300\text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[2,3]</sup>.  $1.5\mu\text{m}$  附近波长的 GaInNAs 器件也制作成功, 但器件性能还需提高<sup>[4,5]</sup>. Sb 在 GaInNAs 生长过程中起表面活性剂的作用, 可有效提高材料质量和器件性能<sup>[6-8]</sup>. 最近,  $1.498\mu\text{m}$  室温连续激射和  $1.53\mu\text{m}$  脉冲激射的激光器也已试制成功<sup>[7,9]</sup>.

在本文中, 我们通过不断优化生长及退火条件, 成功制作了  $1.59\mu\text{m}$  脊型波导 FP 腔 GaInNAsSb 单阱激光器. 激射波长首次超过  $1.55\mu\text{m}$ . 脊宽  $20\mu\text{m}$ , 腔长  $1000\mu\text{m}$ , 阈值电流密度为  $2.6\text{kA}/\text{cm}^2$ .

## 2 实验

本文中有关样品及器件结构都是在 Veeco 公司生产的 Mod-GEN II 固源 MBE 系统中生长完成的.

样品 S1 的结构为  $400\text{nm}$  的 GaAs 缓冲层,  $7\text{nm}$   $\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.38}\text{N}_{0.03}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.03}/20\text{nm}$   $\text{GaN}_{0.036}\text{As}_{0.964}$  单量子阱层, 以及  $50\text{nm}$  GaAs 盖层. 阱层和垒层的生长温度均为  $380^\circ\text{C}$ . 生长速率为  $0.5\mu\text{m}/\text{h}$ . 生长完盖层后, 在  $\text{As}_2$  保护下将温度升至  $580^\circ\text{C}$  并保温  $30\text{min}$ . 这一温度对应于生长激光器过程中上 p-AlGaAs 覆盖层的温度. Q1, Q2, Q3, Q4 结构和 S1 相同, 只是在生长上盖层之前, 经历了不同的原位退火过程, 原位退火温度分别为  $630, 650, 680$  和  $700^\circ\text{C}$ , 退火时间为  $1\text{min}$ . 原位退火结束后, 衬底温度降至  $580^\circ\text{C}$  并保温  $30\text{min}$ , 这一过程是与生长激光器时的上 AlGaAs 层的生长条件相对应的. 有源区中的 In, N, Sb 的组分是由高分辨率 X 射线衍射 (HRXRD) 和光荧光 (PL) 测量确定<sup>[10]</sup>. 光荧光激发光源为  $632.8\text{nm}$  的 He-Ne 激光器, 信号由冷却的 Ge 探测器接收. 非原位退火是在国产的 RTP-300 快速热退火炉中进行的. 退火过程中, 样品片正面朝下并被另一 GaAs 片盖着, 氮气做为保护气被通入炉腔中.

## 3 结果与讨论

图 1 中空点为样品 S1 在  $600, 650, 700, 750$

\* 国家自然科学基金, 国家高技术研究发展计划和国家重点基础研究发展规划资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: zhao.huan@chalmers.se

2006-12-30 收到, 2007-01-12 定稿

和 800 $^{\circ}\text{C}$  非原位退火 1min 后的光致发光强度的结果. 580 $^{\circ}\text{C}$  对应于原位生长的样品强度. 样品的光致发光强度随着退火温度的提高先增强后减弱. 由于在低温生长的过程中会产生一些缺陷, 同时由于应力积累也会产生一些缺陷, 高温退火可以消除一部分上述缺陷, 所以材料的性能获得了改善. 但是, 高温过程同时会引起界面处 In-Ga 和 N-As 的互扩散, 由此会使得原来的量子阱变为一缓变势阱. 势垒变低, 对载流子的限制作用减弱. 这种效应在高温下更为显著, 所以过高的退火温度反而使得材料光致发光强度下降. 图中实心点代表的是 Q1, Q2, Q3, Q4 的强度, 由于设备加热丝的限制, 原位退火的最高温度只能到 700 $^{\circ}\text{C}$ . 和非原位退火相似, 在 700 $^{\circ}\text{C}$  以下, 样品强度随退火温度的提高而增加. 在 700 $^{\circ}\text{C}$  时, 原位退火样品 Q4 的强度是 S1 在非原位退火后强度的三倍. 这是由于 S1 已经历了 30min、温度为 580 $^{\circ}\text{C}$  退火的过程, 这一过程对有源区也起退火作用. 由于未退火样品的缺陷比较多, 所以缺陷辅助的互扩散更为严重, 这将削弱非原位退火对材料的改善作用. 而在高温原位退火后, 材料质量得到了改善, 缺陷减少, 580 $^{\circ}\text{C}$  过程的互扩散被削弱, 所以 Q4 的强度得到了增强.

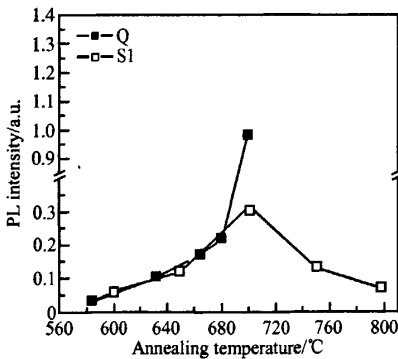


图 1 S1 在不同非原位退火温度下的光致发光强度以及样品 Q1, Q2, Q3, Q4 的光致发光强度  
Fig. 1 Photoluminescence intensity of S1 after post-growth annealed at different temperatures and the photoluminescence intensity of samples Q1, Q2, Q3, Q4

#### 4 激光器的制作与测试

激光器 L1 的结构如图 2 所示: 有源区为  $\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.38}\text{N}_{0.032}\text{As}_{0.938}\text{Sb}_{0.03}$  (7nm)/ $\text{GaN}_{0.38}\text{As}_{0.962}$  (20nm) 的单量子阱, 两边被对称的 30nm GaAs、150nm 超晶格等效生长的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0 \sim 0.5$ ) 渐变层以及 1500nm  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  的覆盖层所包围. p $^-$  和 n $^-$  型 1.5 $\mu\text{m}$   $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  的掺杂物分

别为 Be 和 Si. 上电极 150nm GaAs 接触层的掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . GaInNAsSb 和 GaNAs 层的生长温度均为 380 $^{\circ}\text{C}$ , AlGaAs 层生长温度为 580 $^{\circ}\text{C}$ . GaNAs 层生长过程中, RHEED 图案仍显示出明晰的条状, 与生长 GaAs 时相同, 这说明 GaNAs 全层具有较高的质量. 700 $^{\circ}\text{C}$  原位退火 1min. 然后降回 580 $^{\circ}\text{C}$  生长折射率渐变层以及 p 型 AlGaAs 包层.

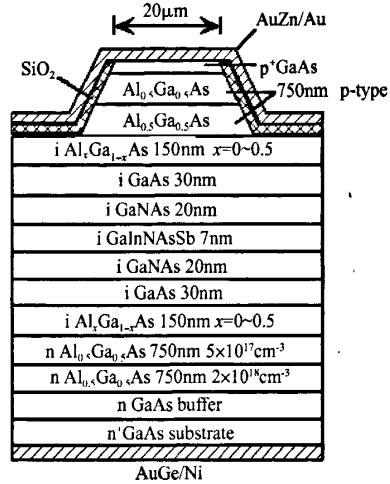


图 2 1.55 $\mu\text{m}$  GaInNAsSb 边发射激光器结构  
Fig. 2 Structure of the 1.55 $\mu\text{m}$  GaInNAsSb edge emitting lasers

激光器条宽为 20 $\mu\text{m}$ , 腔长为 1000 $\mu\text{m}$ , 实现了室温连续工作, 其 L-I-V 曲线如图 3 所示. 器件以自然解理面 ( $R \approx 32\%$ ) 为反射镜, 未镀高反膜. 激光器的正向开启电压约为 1V, 阈值电流密度为 2.6kA/ $\text{cm}^2$ . 脉冲情况下测得激光波长为 1586.6nm.

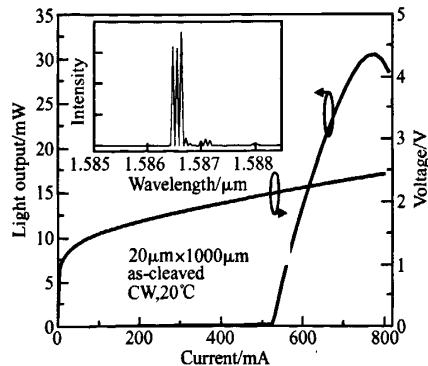


图 3 GaInNAsSb 激光器室温连续激光 L-I-V 曲线 插图为脉冲工作时测得的激光谱  
Fig. 3 Room temperature continuous work L-I-V curves of the GaInNAsSb laser The inset is the lasing spectrum under pulsed condition.

## 参考文献

- [ 1 ] Kondow M, Uomi K, Niwa A, et al. GaInNAs: a novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance. *Jpn J Appl Phys*, 1996, 35 (2): 1273
- [ 2 ] Tansu N, Kirsch N J, Mawst L J. Low-threshold-current-density 1300-nm dilute-nitride quantum well lasers. *Appl Phys Lett*, 2002, 81 (14): 2523
- [ 3 ] Wang S M, Wei Y Q, Wang X D, et al. Very low threshold current density 1.3 $\mu$ m GaInNAs single-quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy. *J Cryst Growth*, 2005, 278 (1): 734
- [ 4 ] Fischer M, Reinhardt M, Forchel A. GaInAsN / GaAs laser diodes operating at 1.52 $\mu$ m. *Electron Lett*, 2000, 36 (14): 1208
- [ 5 ] Jaschke G, Averbeck R, Geelhaar L, et al. Low threshold In-GaAsN/GaAs lasers beyond 1500nm. *J Cryst Growth*, 2005, 278 (1): 224
- [ 6 ] Li L H, Sallet V, Patriarche G, et al. 1.5 $\mu$ m laser on GaAs with GaInNAsSb quinary quantum well. *Electron Lett*, 2003, 39 (6): 519
- [ 7 ] Bank S R, Wistey M A, Goddard L L, et al. Low-threshold continuous-wave 1.5 $\mu$ m GaInNAsSb lasers grown on GaAs. *IEEE J Quantum Electron*, 2004, 40 (6): 656
- [ 8 ] Yang X, Héroux J B, Mei L F, et al. InGaAsNSb/GaAs quantum wells for 1.55 $\mu$ m lasers grown by molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 78 (26): 4068
- [ 9 ] Gupta J A, Barrios P J, Zhang X, et al. 1.53 $\mu$ m GaInNAsSb laser diodes grown on GaAs (100). *Electron Lett*, 2005, 41 (2): 71
- [ 10 ] Niu Z C, Ni H Q, Xu X H, et al. Electronic properties of GaAs/GaInNAsSb superlattices. *Phys Rev B*, 2003, 68 (23): 235326

## Room Temperature Continuous Wave Operation 1.59 $\mu$ m GaInNAsSb Quantum Well Lasers\*

Zhao Huan<sup>†</sup>, Du Yun, Ni Haiqiao, Zhang Shiyong, Han Qin, Xu Yingqiang, Niu Zhichuan, and Wu Ronghan

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Investigations of *in-situ* and *ex-situ* annealing effects on GaInNAs(Sb)/GaAs/GaAs quantum wells (QWs) laser diodes grown by molecular beam epitaxy are carried out systematically. The crystal quality of QWs can be improved effectively by rapid thermal annealing. Few investigations were made for lasers especially at a wavelength of 1.55 $\mu$ m. The emission wavelength of those QWs lasers, which were grown by MBE using low growth rates and introducing *in-situ* annealing process during the growth, has been extended up over 1.55 $\mu$ m. A 1.59 $\mu$ m lasing of a GaInNAsSb/GaAs single quantum well laser diode is obtained under continuous current injection at room temperature. The threshold current density is 2.6kA/cm<sup>2</sup>.

**Key word:** molecular beam epitaxy; rapid thermal annealing; quantum well

**PACC:** 8115G; 8140G; 7855E

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0486-03

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China, the National High Technology Research and Development Program of China, and the State Key Development Program for Basic Research of China

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: zhao.huan@chalmers.se

Received 30 December 2006, revised manuscript received 12 January 2007