

# 1.31 $\mu\text{m}$ 垂直腔面发射激光器材料生长 及其物理特性\*

吴惠桢 黄占超 劳燕锋

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

**摘要:** 采用气态源分子束外延(GSMBE)技术在 InP 衬底上生长发光波长为 1.31 $\mu\text{m}$  的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱和在 GaAs 衬底上生长 GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜(DBR),并用直接键合技术将生长在 InP 基上的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱结构组装到 GaAs 衬底上生长的 DBR 结构上,对其微结构和发光等特性进行了比较系统的研究.发现 500~620 $^{\circ}\text{C}$  的高温键合过程和后续的剥离工艺不仅没有引起量子阱发光效率的降低,反而由于键合过程中的退火改进了晶体质量,大大提高了量子阱的发光强度,其中 620 $^{\circ}\text{C}$  退火处理后的光致发光强度是原生样品的 3 倍.

**关键词:** GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜; InAsP/InGaAsP 多量子阱; 键合

**PACC:** 7280E; 6855; 7833E

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)S0-0121-05

## 1 引言

近年来,长波长垂直腔面发射激光器(VCSEL)是半导体光电子器件研究领域的热点之一.由于其容易实现单模操作、高速率调制,并具有圆形对称光斑、采用平面工艺集成度高和易与光纤耦合等特性,使得 VCSEL 最有希望代替分布反馈布拉格(DBF)激光器成为光纤通信的主要光源,而且它在平行光互联以及 WDM 等方面应用的优势也十分明显.目前对 850nm 和 980nm VCSEL 器件的研究已经比较成熟,并已进入商品化生产,在光通信中得到大量应用.在 1.31 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  VCSEL 器件的研究方面,国际上许多研究小组正对其展开了研究,并取得了积极的进展,例如采用与 GaAs 相匹配的 InGa-NAs/GaAs 量子阱体系和 AlGaAs/GaAs 分布布拉格反射镜(DBR),获得了室温连续(RTCW)工作模式下的单模输出功率为 2mW,90 $^{\circ}\text{C}$  下单模输出功率为 1mW 的 1.3 $\mu\text{m}$  的 VCSEL<sup>[1]</sup>. Jayaraman 等人<sup>[2,3]</sup>采用 GaAs/AlGaAs DBR 双键合及掩埋隧道

结技术,使器件的工作温度达到了 134 $^{\circ}\text{C}$ , RTCW 单模达到了 2mW,80 $^{\circ}\text{C}$  下单模出射功率为 1mW,器件不同出射波长在 1.31~1.34 $\mu\text{m}$  之间.但是 1.31 $\mu\text{m}$  及 1.55 $\mu\text{m}$  VCSEL 还存在不足之处,如阈值电流、出射功率、工作温度等参数还远不及短波长的 VCSEL.

相比较国内在长波长 VCSEL 的研究起步较晚,主要的难点是与 InP 衬底晶格匹配的高质量 DBR 材料的生长,我们采用气态源分子束外延(GSMBE)技术在 InP 基衬底上生长了发光波长为 1.31 $\mu\text{m}$  的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱,在 GaAs 衬底上生长了 GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜(DBR),并用直接键合技术将生长在 InP 基上的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱结构组装到 GaAs 衬底的 DBR 结构上,对其物理特性,如微结构、发光等特性进行了比较系统的研究.

## 2 实验及测试

实验设备为气态源分子束外延系统(Thermal

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:2003CB314903)

吴惠桢 男,1959 年出生,教授,主要从事化合物半导体材料、物理与器件的研究. Email: hzhu@mail. sim. ac. cn

2004-09-23 收到,2004-12-10 定稿

V90), III 族材料 Al, Ga, In 为固态源, V 族材料用高纯  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{PH}_3$  气体, 经高温裂解( $1040^\circ\text{C}$ )形成  $\text{As}_2$  和  $\text{P}_2$ , 所使用的衬底为 AXT 公司的  $n^+$  GaAs(001) Epi-ready 衬底. 首先在 GaAs 衬底上生长厚度为 300nm 的 Si 掺杂 n 型 GaAs 缓冲层; 然后依次生长 Si 掺杂 n 型 AlGaAs 及 GaAs, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . GaAs 生长速率为  $0.79 \mu\text{m/h}$ , 单层厚度为 109.2nm.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料采用高 Al 组分 ( $x = 0.78$ ), 生长速率为  $1.04 \mu\text{m/h}$ , 单层生长厚度为 96.1nm, 整个生长过程衬底温度保持在  $680^\circ\text{C}$ . DBR 的对数分别为 10 对和 30 对, AlGaAs 和 GaAs 的折射率参数由文献[4]给出. InAsP/InGaAsP 多量子阱在 InP 衬底上生长, 生长多量子阱之前依次生长了 200nm 的 InP 缓冲层, 100nm 的 InGaAsP ( $Q = 1.15 \mu\text{m}$ ) 腐蚀阻挡层, 200nm 的 InP 匹配层. 阱层材料  $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$  中 As 组分为  $y = 0.39$ , 阱材料为压应变材料, 阱宽为 8.8nm. 垒材料为 InGaAsP ( $Q = 1.15 \mu\text{m}$ ), 为张应变材料, 垒宽为 10nm, 衬底温度为  $485^\circ\text{C}$ , 量子阱对数为 3~6 对. 为了避免在键合过程中 GaAs 中的 As 原子和 H, O, N 等原子在高温下扩散至 InP 衬底上生长的量子阱发光区, 生长完量子阱结构后, 还生长了 270nm 的 InP 接触层. 接着将  $\text{InAs}_{0.39}\text{P}_{0.61}/\text{InGaAsP}$  ( $Q = 1.15 \mu\text{m}$ ) 多量子阱与 GaAs 衬底、GaAs/AlGaAs DBR 直接键合. 键合完成后将 InP 衬底剥离, 用光致荧光谱对键合后发光特性的影响进行了表征和分析. 对 AlGaAs 外延薄膜和 DBR 结构用 Philips X'pert MRD 高分辨率四晶衍射仪进行了 X 光衍射(XRD) 摇摆曲线的表征, 我们采用自制的反射光谱测量装置测量了 DBR 的反射率随波长的变化.  $\text{InAs}_{0.39}\text{P}_{0.61}/\text{InGaAsP}$  ( $Q = 1.15 \mu\text{m}$ ) 多量子阱的发光特性研究采用  $\text{Ar}^+$  激光器的 514.5nm 线激发, Nicolet 860 FTIR 光谱仪, 探测器为液氮冷却的 InSb 探测器.

### 3 结果及讨论

#### 3.1 材料的 XRD 表征

GSMBE 生长的高质量 AlGaAs 单层材料的高分辨率 XRD 如图 1 所示, 其晶格失配度为 0.1%, Al 的组分为 78%, 半峰宽(FWHM)为  $30.3''$ . 在此基础上生长了中心波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的 10 对 GaAs/AlGaAs DBR 及 30 对 GaAs/AlGaAs DBR. 其高分

辨率 X 射线摇摆曲线的测量结果和理论拟合曲线见图 2. 图中实线为实验测量曲线, 虚线为模拟曲线. 通过对实验曲线的模拟, 得到了 DBR 中相应的每层材料的厚度及材料组分, 并与台阶仪测得的两个 DBR 结构的总厚度作比较, 对生长速率进行校正, 提高薄膜生长的控制精度.

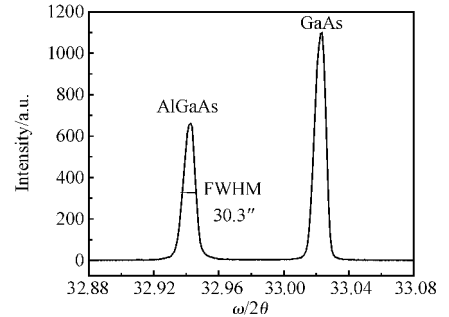


图 1 气态源分子束外延  $\text{Al}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  单晶薄膜的高分辨率 X 射线衍射图

Fig. 1 HRXRD curve for GSMBE grown  $\text{Al}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  thin film on GaAs substrate

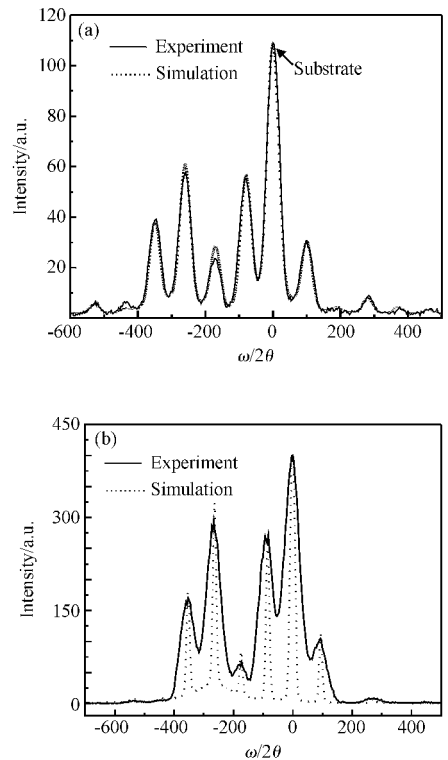


图 2 (a) 10 对 GaAs/AlGaAs DBR 的 XRD 摇摆曲线及其模拟曲线; (b) 30 对 GaAs/AlGaAs DBR 的 XRD 摇摆曲线及其模拟曲线

Fig. 2 (a) Measured and simulated HRXRD curves for 10-pair GaAs/AlGaAs DBR; (b) Measured and simulated HRXRD curves for 30-pair GaAs/AlGaAs DBR

从图 2(a) 中可以看出, XRD 的拟合曲线与测量曲线十分吻合. 我们发现通过拟合得到的外延层厚度的准确性要比通过测量 XRD 卫星峰的间距获得的外延层厚度具有更高的准确性, 用 XRD 卫星峰的间距来测量量子阱的厚度有时会引入较大的误差<sup>[6]</sup>, 对于 10 对、30 对 DBR 来说, GaAs 和 AlGaAs 的单层拟合所得厚度与设计厚度都有微小差别, 这应该是用台阶仪测量单层 GaAs 和 AlGaAs 外延层厚度时存在小的误差, 进而导致生长速率计算存在微小误差所致. 10 对 DBR 的拟合总厚度与通过台阶仪所测定的厚度之间的差别为 26nm, 误差为 1%, 已经十分接近. 但是随着生长对数的增大, 相应的 DBR 生长时间也延长, 生长过程中束源炉束流变动, 衬底温度的改变等都会引起生长速率发生小的改变. 因此 30 对 DBR 的 XRD 拟合结果与测量结果的符合程度没有像 10 对 DBR 的 XRD 拟合符合得那么好.

### 3.2 DBR 及其键合结构的反射光谱

图 3 所示是 10 对 DBR 和 30 对 DBR 的反射率谱线, 其中实线为实验测得的反射率谱线, 虚线为通过理论拟合得到的反射率谱线, 具体理论计算见文献<sup>[6]</sup>.

在反射率谱线的理论拟合过程中, AlGaAs, GaAs 的厚度采用由 XRD 摇摆曲线拟合所得到的厚度, 我们通过改变 AlGaAs 及 GaAs 的折射率来拟合实验得到的反射率, 因为不同的生长技术和生长参数都会引起材料折射率的小的改变. 通过理论拟合, 当取 AlGaAs 的折射率为 2.97, GaAs 的折射率为 3.40 时, 得到图 3(a) 中的理论反射率谱线(虚线), 其对称中心与实验测得的反射率谱线在高反射带对称中心的差别只有 1.1nm, 表明实验与理论计算十分吻合. 实验曲线在对称中心处反射率比理论值略低, 这主要是由于测量反射率时, 所用标准反射镜的绝对反射率的定标可能存在小的误差所致, 同时在理论计算时没有考虑材料的吸收、DBR 各个界面的散射等问题. 综合各方面因素从而导致了实际反射率比理论反射率略低. 拟合所得到的 AlGaAs, GaAs 的折射率比我们设计 VCSEL 结构所用的折射率分别小 0.03 及 0.05, 折射率下降的原因可能是材料的掺杂( $\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )引起的, 这与已报道的 n 型半导体材料的折射率比本征材料略有降低一致<sup>[7]</sup>.

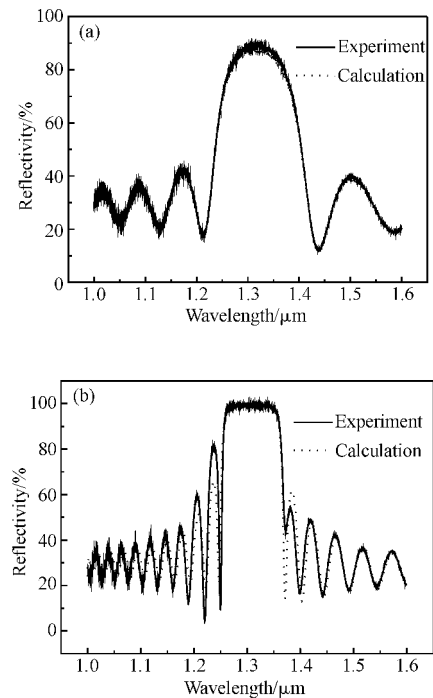


图 3 (a) 10 对 GaAs/AlGaAs DBR 反射率的实验测量谱线及其理论拟合曲线; (b) 30 对 GaAs/AlGaAs DBR 反射率的实验测量谱线及其理论拟合曲线

Fig. 3 (a) Measured and simulated reflectivity spectra for 10-pair DBR; (b) Measured and simulated reflectivity spectra for 30-pair DBR

应用 30 对 DBR 的 XRD 摇摆曲线的拟合所得到的各层厚度, 及 10 对 DBR 反射率谱线的理论拟合得到的折射率, 计算了 30 对 DBR 的反射率谱线(虚线). 此图中的理论曲线与实验曲线也符合得较好. 但是高反射率禁带两边小峰的反射率存在小的差异, 这与 30 对 DBR 的生长时间长, 束流、衬底温度的微小变化会引起的 DBR 各层的层厚和 Al-GaAs 组分产生小的波动有关.

图 4 所示是 InP 衬底上生长的  $\text{InAs}_{0.39}\text{P}_{0.61}/\text{InGaAsP}$  ( $Q = 1.15 \mu\text{m}$ ) 多量子阱 (MQWs) 结构与 GaAs 衬底上生长的 GaAs/AlGaAs DBR 键合后的反射率光谱, 实线为实验测量谱线, 虚线为通过理论模拟所得到的反射率谱线. 在模拟过程中考虑了量子阱子能级的吸收和折射率的色散, 可见在高反射率光谱区域实验和模拟结果基本符合. 但是测量的反射率与理论值比较有所降低, 反射率降低的原因可能是在键合界面形成了一层纳米量级的过渡层的吸收所致. 扫描电子显微镜分析发现当键合过程中所加压力不均匀时, 就会出现比较明显的键合界面

层,因此通过改善所加压力的均匀性可以改进键合界面的质量.

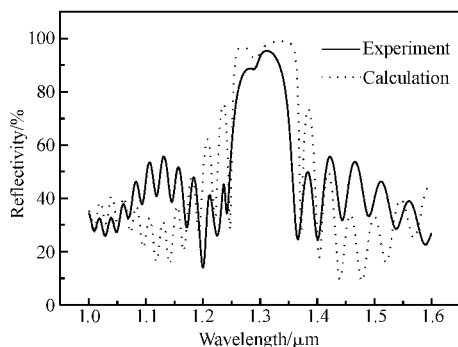


图 4 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 多量子阱与 GaAs/AlGaAs DBR 键合后的反射光谱 实线为测量的反射率谱线,虚线为理论模拟的反射率谱线

Fig. 4 Reflectivity spectra for the bonding structure of InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) MQWs and GaAs/AlGaAs DBR

### 3.3 键合过程对量子阱发光特性的影响

我们的键合是在 N<sub>2</sub> 气氛下高温退火实现的,为了分析高温退火及其后续的减薄、化学剥离过程对 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 量子阱有源层的发光特性的影响,用相同的键合工艺条件将 InP 衬底上生长的 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 量子阱直接键合到 GaAs 衬底上,然后将 InP 衬底剥离后,再测量键合后的量子阱的室温光致发光谱,并与原生样品的光致发光谱进行比较.图 5 (a) 是键合前后 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 多量子阱结构在室温下测得的光致发光谱 (PL), InP 基 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 多量子阱结构与 GaAs 衬底的键合是在 620°C 温度和 N<sub>2</sub> 气氛下进行的.从图 5(a) 可见,键合前后量子阱的发光峰都位于 1.305 eV,没有发生发光峰位移动,而且键合后样品的发光峰的强度是没有键合量子阱样品的 3 倍,所观察到的键合后量子阱发光强度的成倍增强是出乎我们预料的,那么键合后光致发光强度的增强又是什么原因呢? 对此,我们做了进一步的退火实验,将原生的量子阱样品直接置于退火炉中,在 N<sub>2</sub> 保护下 620°C 退火 35min,然后将其自然降温至室温后,进行光致发光谱的测试.图 5 (b) 是同一量子阱样品退火前后的光致发光谱的比较,可见退火后样品的发光峰位与退火前相比,发生了 5nm 的蓝移,从退火前的 1.307 μm 移到了 1.302 μm,但是退火后的样品的发光峰强度也得到

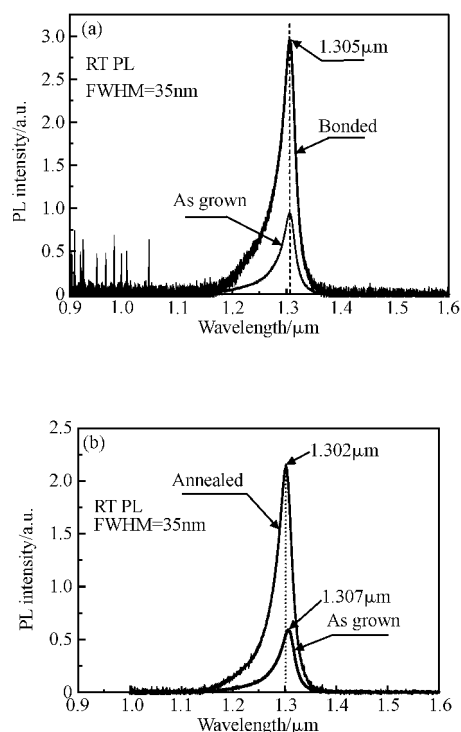


图 5 (a) 键合前后 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 应变补偿多量子阱的室温光致发光谱的比较; (b) 退火前后 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱的室温光致发光谱的比较

Fig. 5 (a) Comparison of RT PL intensities of strain-compensated InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) MQWs before and after bonding to GaAs at 620°C; (b) Comparison of RT PL intensities of strain-compensated InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) MQWs before and after annealing at 620°C

了显著增强,是退火前的 3 倍多.这一结果说明,用气态源分子束外延技术在 InP 衬底上生长的 InAsP/InGaAsP 多量子阱,用 620°C 退火温度直接键合到 GaAs 衬底上,键合过程和后继的化学腐蚀等并没有造成量子阱发光效率的降低,反而由于键合过程中的高温退火引起量子阱微结构的改变使发光强度大大提高了.应当指出,由于直接键合是在 InP 基上生长的 InAs<sub>0.39</sub>P<sub>0.61</sub>/InGaAsP ( $Q = 1.15\mu\text{m}$ ) 多量子阱与 GaAs 衬底之间进行的,两者的折射率差别很小,因此由键合界面反射产生对发光谱的影响可以忽略.在键合过程中 GaAs 中 As 原子和 H, N, O 等原子在高温下的扩散被覆盖在量子阱上的 270nm 的键合区域阻挡了,没有到达量子阱发光区,从而引入非辐射复合中心的可能性小.同样,在 500°C 下键合也得到了类似的结果,但是发光强度的增强为 620°C 的键合温度最高.高温退火过程对 In-

AsP/InGaAsP 多量子阱微结构影响的具体物理机理有待进一步研究。

## 4 结论

采用气态源分子束外延技术在 InP 基衬底上生长发光波长为 1.31 $\mu\text{m}$  的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱和在 GaAs 衬底上生长 GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜(DBR),然后用直接键合技术将生长在 InP 基上的 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱结构组装到 GaAs 衬底上生长的 DBR 结构上。对其微结构和发光特性的研究表明,500~620 $^{\circ}\text{C}$  的键合过程和后续的剥离工艺过程不仅没有引起量子阱发光效率的降低,反而由于键合过程中的高温退火改进了晶体质量,大大提高了量子阱的发光强度。其中 620 $^{\circ}\text{C}$  的退火处理后的光致发光强度是原生样品的 3 倍。这些有趣的结果对用高温键合方法研制 1.31 $\mu\text{m}$  垂直腔面发射激光器具有重要的作用。

## 参考文献

- [1] Thompson L R, Chirovsky L M F, Jackson A W, et al. Performance of monolithic 1.3 $\mu\text{m}$  VCSELs in telecom applications. Photonics West SPIE Conf, San Jose, CA, 2002; 4649
- [2] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W, et al. High-power 1320-nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. IEEE Photonics Technol Lett, 2003, 15(11): 1495
- [3] Jayaraman V, Goodnough T J, Beam T L, et al. Continuous-wave operation of single-transverse-mode 1310-nm VCSELs up to 115 $^{\circ}\text{C}$ . IEEE Photonics Technol Lett, 2000, 12(12): 1595
- [4] Palik E D. Hand book of optical constants of solids. Orlando, Florida: Academic Press, Inc, 1985; 429, 295
- [5] Fewster P F. X-ray scattering from semiconductors. London: Imperial College Press, 2000; 203
- [6] Huang Zhanchao, Wu Huizhen. Design of synthesized DBRs for long-wavelength InP-based vertical-cavity surface-emitting lasers. Chinese Physics Letters, 2004, 21(2): 316
- [7] Sell D D, Casey H C Jr, Wecht K W, et al. Concentration dependence of the refractive index for n- and p-type GaAs between 1.2 and 1.8eV. J Appl Phys, 1974, 45(6): 2650

# Epitaxy and Physical Properties of 1.31 $\mu\text{m}$ Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers\*

Wu Huizhen, Huang Zhanchao, and Lao Yanfeng

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Gas source molecular beam epitaxy was used to grow InAsP/InGaAsP strain-compensated multiple quantum wells for 1.31 $\mu\text{m}$  vertical cavity surface emitting lasers on InP substrates and GaAs/AlGaAs distributed Bragg reflectors on GaAs substrates. Then the InAsP/InGaAsP strain-compensated multiple quantum wells were directly bonded to DBR grown on GaAs substrates. Physical properties, such as microstructures, luminescence emission of the bonded structures were investigated. Photoluminescence characterization showed that 500~620 $^{\circ}\text{C}$  bonding processes and following removal of InP substrates did not lower the luminescence efficiency of the MQWs. The annealing effect in the bonding process improved the crystalline quality and enhanced the luminescence efficiency. The PL intensity of the MQWs after 620 $^{\circ}\text{C}$  annealing is 3 times of the as grown samples.

**Key words:** GaAs/AlGaAs DBR; InAsP/InGaAsP MQWs; bonding

**PACC:** 7280E; 6855; 7833E

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0121-05

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. 2003CB314903)

Wu Huizhen male, was born in 1959, professor. His work focuses on materials, physics and devices of compound semiconductors. Email: hzhu@mail.sim.ac.nm

Received 23 September 2004, revised manuscript received 10 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics