

反射各向异性谱在线监测 852 nm 半导体激光器 AlGaInAs/AlGaAs 量子阱的 MOCVD 外延生长

徐华伟^{1,2} 宁永强¹ 曾玉刚¹ 张 星¹ 张建伟^{1,2} 张 建^{1,2} 张立森^{1,2}

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 研究了生长温度和中断时间对 AlGaInAs/AlGaAs 量子阱外延质量的影响, 并使用金属有机化合物汽相沉积(MOCVD)外延生长了 AlGaInAs/AlGaAs 量子阱和 852 nm 半导体激光器。通过使用反射各向异性谱(RAS)和光致发光谱在线监测和研究了 AlGaInAs/AlGaAs 界面的外延质量。研究结果表明高温生长可以导致从 AlGaInAs 量子阱层到 AlGaAs 势垒层的 In 析出现象。通过优化生长温度和在 AlGaInAs/AlGaAs 界面处使用中断时间, 可以有效抑制 In 析出, 从而获得 AlGaInAs/AlGaAs 陡峭界面。使用优化后的外延生长条件, 外延生长了整个 852 nm 半导体激光器, 使用 RAS 在线监测了激光器的外延生长过程, 可以有效地分辨出不同外延层和生长阶段。

关键词 激光器; AlGaInAs; 反射各向异性谱; 金属有机化合物汽相沉积

中图分类号 TN2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502010

MOCVD Growth of AlGaInAs/AlGaAs Quantum Well for 852 nm Laser Diodes Studied by Reflectance Anisotropy Spectroscopy

Xu Huawei^{1,2} Ning Yongqiang¹ Zeng Yugang¹ Zhang Xing¹

Zhang Jianwei^{1,2} Zhang Jian^{1,2} Zhang Lisen^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The influence of the growth temperature and interruption time on the crystal quality of AlGaInAs/AlGaAs quantum well is investigated. The AlGaInAs/AlGaAs quantum well and whole 852 nm laser structures are grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). Reflectance anisotropy spectroscopy (RAS) and photoluminescence (PL) spectra are applied to measure the AlGaInAs/AlGaAs interfaces crystalline quality. The results show that high growth temperature will lead to indium segregation from AlGaInAs quantum well to AlGaAs barrier. By lowering the growth temperature and using of interruption time between AlGaInAs quantum well and AlGaAs barriers, the indium segregation effect can be effectively suppressed. The AlGaInAs/AlGaAs quantum well shows an abrupt interface and good crystalline quality under this growth conditions. With optimizing growth conditions, whole laser structures are grown. All the epilayer and growth process can be distinguished *in situ* by RAS transient spectra.

Key words lasers; AlGaInAs; reflectance anisotropy spectroscopy; metal-organic chemical vapor deposition

OCIS codes 140.5965; 230.5590; 240.0310

收稿日期: 2011-12-29; **收到修改稿日期**: 2012-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(10974012, 11074247, 61106047, 61176045, 61106068, 51172225, 61006054)和国家自然科学基金重点项目(90923037)资助课题。

作者简介: 徐华伟(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事半导体激光器外延生长方面的研究。

E-mail: xuhwciomp@163.com

导师简介: 宁永强(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型半导体激光器及其相关物理等方面研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

半导体激光器^[1~3]由于其体积小、重量轻、寿命长等特点在通信、军事、医疗和工业等领域有着广阔的应用前景,特别是波长为 852 nm 半导体激光器可以用于 Cs 原子钟。为了获得良好的温度稳定性,本文采用 AlGaInAs 替代传统的 InGaAs 和 AlGaAs 作为量子阱材料^[4]。AlGaInAs/AlGaAs 量子阱是 852 nm 半导体激光器的核心部分,对激光器的最终性能有着至关重要的影响,因此对精确控制并在线监测 AlGaInAs/AlGaAs 量子阱的金属有机化合物汽相沉积(MOCVD)外延生长进行研究就显得非常必要。反射各向异性谱(RAS)已经被证明是在线监测研究 In 组份控制和 InGaAs/GaAsP 多量子阱应变影响的有力工具^[5,6]。通过 RAS 在线监测研究 AlGaInAs/AlGaAs 量子阱的 In 析出现象和影响,研究发现通过降低外延生长温度和采用中断时间可以抑制 In 析出,从而得到 AlGaInAs/AlGaAs 突变界面。最后通过 RAS 在线监测了用于 Cs 原子钟 852 nm 半导体激光器的外延生长过程并测量了激光器性能。

2 器件结构与 RAS 理论

采用具有水平反应室和气悬浮旋转石墨衬底托的 AIXTRON 200/4 低压(LP)MOCVD 系统在

GaAs 衬底(001)面外延生长器件结构。TMGa、TMAl、TMIn 作为三族源,AsH₃ 和 PH₃ 作为五族源,SiH₄ 和 DEZn 分别作为 n 型掺杂源和 p 型掺杂源,H₂ 作为载气,反应室压力 10⁴ Pa。

所设计的 852 nm 半导体激光器使用 Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 作为有源区,为了研究生长温度和中断时间对 Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 有源区的影响,设计了具有相同结构的两个样品,但是采用不同的外延生长条件。样品结构是:有源区包括 8 nm 厚的 Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As 单量子阱层和 10 nm 厚 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 势垒层,有源区夹在 150 nm 厚渐变组分的 Al_xGa_{1-x}As 波导层(见表 1)。外延生长有源区 Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的 V/III 为 200,其他外延层的 V/III 为 80。

外延生长样品 A 时,整个外延生长过程采用的生长温度为 710 °C,没有使用中断时间。外延生长样品 B 时,Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 有源区使用的生长温度为 650 °C,其他外延层使用的生长温度为 710 °C。在外延生长样品 B 过程中,在降温过程(从 710 °C 降到 650 °C)使用中断时间为 3 min,升温过程(从 650 °C 升到 710 °C)使用的中断时间为 5 min,在 Al_{0.11}Ga_{0.74}In_{0.15}As 单量子阱(SQW)层和 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 势垒层之间使用中断时间为 10 s。器件结构和外延生长条件见表 1。

表 1 样品 A 和样品 B 的器件结构和外延生长条件
Table 1 Structures and growth conditions of sample A and sample B

Sample A			Sample B		
Layer	Material	Temperature / °C	Material	Temperature / °C	
Waveguide	Al _x Ga _{1-x} As (x=0.55~0.3)	710	Al _x Ga _{1-x} As (x=0.55~0.3)	710	
			Interruption time (3 min)	710~650	
Barrier	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	710	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	650	
			Interruption time (10 s)	650	
SQW	Al _{0.11} Ga _{0.75} In _{0.15} As	710	Al _{0.11} Ga _{0.75} In _{0.15} As	650	
Barrier	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	710	Interruption time (10 s)	650	
			Al _{0.3} Ga _{0.7} As	650	
Waveguide	Al _x Ga _{1-x} As (x=0.3~0.55)	710	Interruption time (5 min)	650~710	
			Al _x Ga _{1-x} As (x=0.3~0.55)	710	

原位监测设备固定在 MOCVD 反应室标准的石英窗口上方,光谱仪的光可以通过石英视窗以近似垂直的角度入射并接收反射光。本实验室的原位监测设备可以同时测量反射谱和 RAS,光谱的测量范围是 248 nm(5 eV)~775 nm(1.6 eV)。其原理是测量垂直入射偏振光在立方相半导体晶面两个主轴方向的反射光差别。由于立方相半导体的光学特性是各向同性的,观测到的非对称起源于表面重构

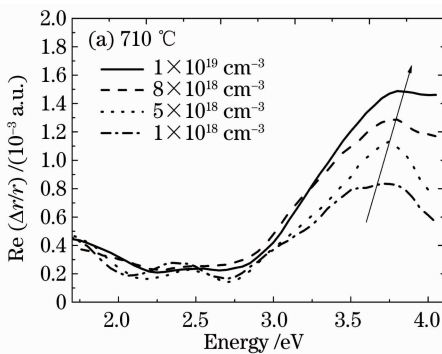
和弛豫引起的表面非对称性,RAS 所反映的就是最外层表面的各向异性,因此测得的 RAS 可以非常敏感地反应出表面重构的各向异性信息,并能进一步分析外延表面的生长质量。对于 GaAs 衬底(100)表面,RAS 测量(110)表面沿 $[\bar{1}10]$ 轴的复反射系数 $r_{[\bar{1}10]}$ 和 $[110]$ 轴的复反射率系数 $r_{[110]}$ 之差,通常用平均反射系数 $(r_{[\bar{1}10]} + r_{[110]})/2$ 归一化,RAS 可以表示为^[7]

$$\frac{\Delta r}{r} = 2 \frac{r_{[\bar{1}10]} - r_{[110]}}{r_{[\bar{1}10]} + r_{[110]}} = \text{Re} \frac{\Delta r}{r} + \text{Im} \frac{\Delta r}{r}, \quad (1)$$

复反射系数所携带的信息来源于光穿透深度内所有的原子。应用时通常仅使用光谱的实部 $\text{Re}(\Delta r/r)$ ，所得到的图谱也都是光谱的实部的绝对值。

3 实验结果与讨论

选取适合的探测光能量来在线监测 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区以及整个激光器的外延生长过程，需要考虑以下因素：由于 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层厚度只有 8 nm，因此需要选择较高的探测光能量，因为这样不仅穿透深度浅，可以更好地得到最外层的信息，而且探测光能量能够有效地分辨出不同组分、不同掺杂类型以及不同掺杂浓度。图 1(a) 显示出 GaAs 层中不同 Zn 掺杂浓度随



探测光能量变化的 RAS。可见随着 Zn 掺杂浓度的增大，整个 RAS 最高峰值随着掺杂浓度的增大向高能量值移动(箭头指向)，这与线性光电效应有关^[8]。不同掺杂浓度之间区分最明显的区域在 3.8 eV 左右，图 1(b) 显示不同组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 随探测光能量变化的 RAS，可见不同组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 在 3.5~4 eV 之间能够被很好的区分出来，随着 Al 组分的增大，最大的峰值移向高能量值区域，这种变化与能带中的 E_1 有关^[9]。探测光的能量值越大，穿透深度就越浅，这意味着越高的探测光能量值对最外层就越敏感。因此，选取 3.8 eV 的探测光在线监测 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区和整个激光器的外延生长过程。

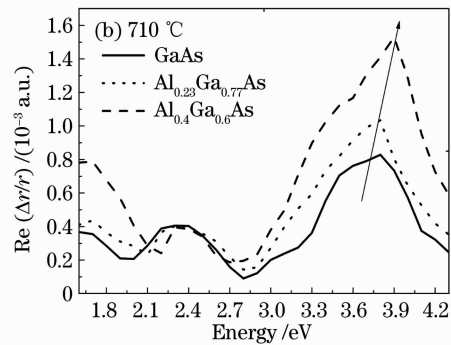


图 1 (a) GaAs 层中 Zn 掺杂浓度范围在 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 RAS 和 (b) AlGaAs 层中 Al 组分分别为 0, 0.23, 0.4 的 RAS

Fig. 1 (a) RAS spectra of Zn-doped GaAs layers with increasing Zn concentration from $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ to $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and (b) RAS spectra with the Al composition $x=0, 0.23, 0.4$

图 2 显示探测光能量为 3.8 eV，不同外延温度条件下样品 A 和样品 B 随时间变化的 RAS。外延生长和 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层所用的时间分别为 75 s 和 97 s，这样可以保证足够的时间以监测出 RAS 细微变化。图 2 中，可以观察到 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层以及样品 B 的降温过程和升温过程，降温过程和升温过程的时间分别为 3 min 和 5 min，温度变化都是渐变的，从图 2 中可以观察到样品 B 的降温过程和升温过程的 RAS 值也都是渐变的，通过 RAS 可以很好地在线检测出外延生长温度的变化。样品 A 在生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层之后外延生长 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层，样品 B 在 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层与 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层之间有中断时间 10 s。从图 2 中可以观察到两个样品的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层与 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱

层界面的 RAS 值是垂直下降的，这表明 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 界面外延质量很好，采用变温生长和中断时间对 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 界面外延质量影响不大。

在生长完 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱之后，样品 A 直接外延生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层，样品 B 在中断 10 s 后才开始外延生长 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层。图 2 中可以观察到(椭圆虚线)样品 B 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的 RAS 值几乎是垂直上升的，而样品 A 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的 RAS 值变化是渐变的，从而可以推断出样品 A 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面是渐变的，样品 B 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面是突变的，变温生长和中断时间对 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面外延质量产生了较大的影响。 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面的这

种渐变是由 In 析出导致的,在 710 °C 高温外延生长条件下,In 很容易从 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层中析出扩散进入到 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层中,这样便导致了 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面出现了 In 组分逐渐降低的渐变层,因此出现了样品 A 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处 RAS 值渐变。样品 B 采用 650 °C 低温外延生长,低温生长可以有效抑制 In 析出,同时在 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处采用 10 s 的中断时间,即使有少量析出 In 析出也不会扩散进入 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层,样品 B 的 RAS 出现了垂直的界面。样品 B 中, $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 应变单量子阱两侧的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层的 RAS 值整体一致(水平虚线),这表明生长的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层前后质量一致,没有出现因为应变而导致的缺陷。

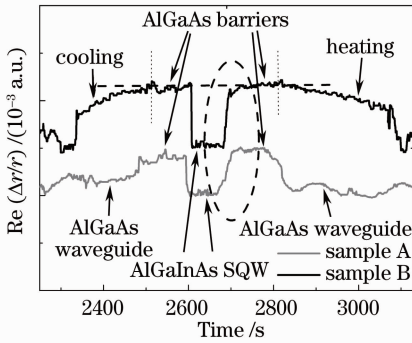


图 2 不同外延生长温度和中断时间的 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱生长过程的 RAS

Fig. 2 RAS during growth process of $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ quantum well with different growth temperatures and interrupt times

图 3 为样品 A 和样品 B 的在 20 °C 时的光致发光(PL)谱,可见样品 A 的峰值波长是 826 nm,样品 B 的峰值波长是 832 nm,这与理论设计的 20 °C PL 中心波长一致,说明样品 B 的 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层的 Al 组分和 In 组分的值和厚度与设计的一致。而样品 A 的峰值波长向短波方向飘移,说明样品 A 的 In 组分值比理论设计值小,这是由于 In 析出导致 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱的 In 组分变小。从图 3 中还可以观察到,样品 A 的半峰全宽是 24.5 nm,大于样品 B 的半峰全宽 17.2 nm,这是由于样品 A 中 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面渐变引起的。

通过变温生长和采用中断时间可以有效抑制 In 析出,从而得到外延质量良好的 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面,使用优化后的生长条件

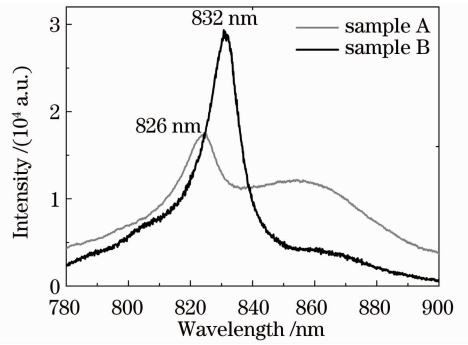


图 3 温度为 20 °C 时 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱的 PL 谱

Fig. 3 PL spectra at temperature of 20 °C for $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ quantum well

MOCVD 外延生长了用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器,该激光器是在 GaAs 衬底(001)面上依次生长 100 nm 厚 n 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 缓冲层,1200 nm 厚 n 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层,厚度为 150 nm 组分从 0.55 渐变到 0.3 的 AlGaAs 的波导层, $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 应变单量子阱的有源区,有源区包括 8 nm 厚的 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 单量子阱层和 10 nm 厚的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的势垒层。 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层外是厚度为 150 nm 组分从 0.3 渐变到 0.55 的 AlGaAs 的波导层,400 nm 厚 p 型掺杂浓度为 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层和 800 nm 厚 p 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层,为了获得良好的欧姆接触,最后生长 200 nm 厚 p 型掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 接触层。

图 4 探测光能量为 3.8 eV 时 852 nm 半导体激光器随时间变化的 RAS。从图中可以分辨出外延生长的每一层以及重要的外延生长阶段。从图 4 中

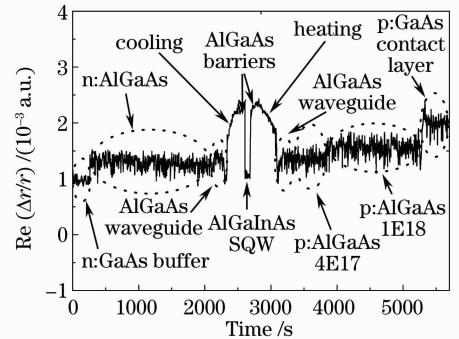
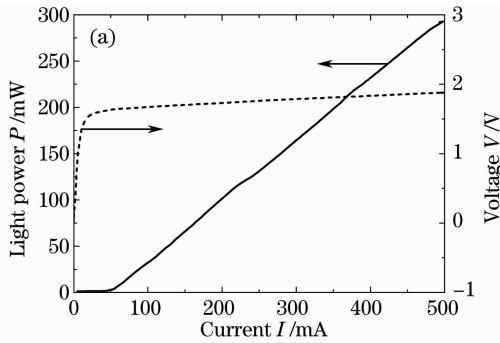


图 4 使用 RAS 在线监测整个激光器结构的外延生长过程

Fig. 4 Growth process of a complete laser structure monitored by RAS

可以观察到具有相同掺杂类型和掺杂浓度但有不同组份的 GaAs 和 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 具有不同的 RAS 值,这与图 1(b)中在 3.8 eV 时的 RAS 趋势一致。n 型 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层的 RAS 值比 p 型 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层的 RAS 值小,对于 p 型 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 覆盖层掺杂浓度为 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 RAS 值比 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 RAS 值小,这与图 1(a)中在 3.8 eV 时的 RAS 趋势一致。从图中还可以观察到降温过程与升温过程,并且降温可以增大 RAS 的整体值。能够很明显地观察到 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}$ 量子阱层,并且量子阱层两边的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的势垒层的



RAS 值基本一致,这说明没有因为引入应变而产生缺陷。

图 5(a)为本文研制出的腔长为 1 mm,条宽为 100 μm 的用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器在室温下不加水冷时功率 P 和电压 V 随电流 I 变化的曲线。在脉冲宽度为 50 μs ,重复频率为 100 Hz 的准连续工作状态下,阈值电流为 50 mA,斜率效率是 0.64 W/A,电光转换效率为 31.6%,外加电流为 500 mA 时,输出功率为 290 mW。图 5(b)为激光波长随环境温度呈线性变化趋势,激光波长的温度飘移为 0.268 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

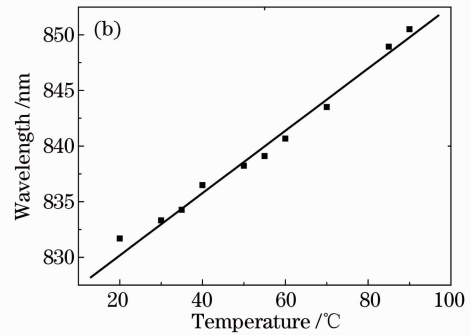


图 5 (a)功率 P 和电压 V 随电流 I 变化的特性曲线; (b)波长随温度(λ - T)变化曲线

Fig. 5 (a) Characteristic curves of P and V vary with I ; (b) curve of wavelength λ vary with temperature T

4 结 论

通过 RAS 在线监测了 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区和用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器的外延生长过程。选取 3.8 eV 为探测光能量,在线监测并研究了生长温度和中断时间对 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 有源区的影响,外延生长温度为 710 $^{\circ}\text{C}$ 时,通过 RAS 在线监测发现 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面存在 In 析出现象,将外延生长温度从 710 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 650 $^{\circ}\text{C}$,并在 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处采用 10 s 的中断时间,RAS 在线监测发现 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.74}\text{In}_{0.15}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 界面处 In 析出现象消失,通过 PL 谱测试,进一步证明低温生长和中断时间可以抑制 In 析出以及 RAS 在线监测的有效性。使用 RAS 在线监测了用于 Cs 原子钟的 852 nm 半导体激光器的外延生长过程,RAS 可以有效地分辨出不同组分、不同掺杂类型和不同掺杂浓度的外延层,以及降温过程和升温过程。实验测得激光波长随温度飘移为 0.268 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

参 考 文 献

1 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Wang Ye *et al.*. High power

vertical-cavity surface-emitting laser array with small divergence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2428~2432

张岩,宁永强,王焯等.高功率低发散角垂直腔面发射激光器阵列[J].*中国激光*,2010,**37**(9):2428~2432

2 Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Jiang Chenyu *et al.*. Beam quality of high power vertical-cavity bottom-emitting semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0102002

崔锦江,宁永强,姜琛昱等.大功率垂直腔底发射半导体激光器的光束质量[J].*中国激光*,2011,**38**(1):0102002

3 Wang Wei, Ning Yongqiang, Zhang Jinlong *et al.*. Polarization properties of high-power vertical-cavity bottom-emitting lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0302002

王伟,宁永强,张金龙等.高功率垂直腔底发射激光器的偏振特性[J].*中国激光*,2012,**39**(3):0302002

4 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Zhang Lisen *et al.*. Design and comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12569~12581

5 M. Zorn, J. T. Zettler, A. Knaller *et al.*. In situ determination and control of AlGaInP composition during MOVPE growth[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, **287**(2): 637~641

6 F. Bugge, M. Zorn, V. Zeimer *et al.*. MOVPE growth of InGaAs/GaAsP-MQWs for high power laser diodes studied by reflectance anisotropy spectroscopy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, **311**(4): 1065~1069

7 J. T. Zettler, K. Haberland, M Zorn *et al.*. Real-time monitoring of MOVPE device growth by reflectance anisotropy spectroscopy and related optical techniques [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, **195**(1-4): 151~162

8 M. Zorn, M. Weyers. Comprehensive study of (Al)GaAs Si-doping using reflectance anisotropy spectroscopy in metal-organic

vapour-phase epitaxy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, **40**(3): 878~882
9 K. Haberland, A. Bhattachary, M. Zorn *et al.*. MOVPE

growth of (Al,Ga)InP-based laser structures monitored by real-time reflectance anisotropy spectroscopy [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(4): 468~472

栏目编辑:韩 峰