

doi:10.3788/gzxb20174603.0325001

# GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱外延结构 及其 LP-MOCVD 生长工艺研究

胡伟<sup>1</sup>, 曾庆高<sup>1</sup>, 叶嗣荣<sup>1</sup>, 杨立峰<sup>2</sup>

(1 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

(2 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

**摘 要:**在低压金属有机化学气相沉积生长工艺中,对用于制作 850nm 垂直腔面发射激光器件的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱外延结构的生长温度、反应室压力、总载气流量以及生长速度等主要工艺参量进行优化,并进行了完整外延结构的生长.实验结果表明:在 700℃ 条件下,得到多种组分的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱结构,通过光致发光谱对比测试得到的最佳组分  $x$  为 0.24,同时得到良好的表面形貌,最终确定的最佳生长速度为 0.34~0.511nm/s.

**关键词:**金属有机化学气相沉积;生长温度;多量子阱;生长速度;外延结构

**中图分类号:**TN304.2+3;TN304.054 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2017)03-0325001-8

## Epitaxial Structure of Multiple Quantum Well and Its LP-MOCVD Growth for GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As

HU Wei<sup>1</sup>, ZENG Qing-gao<sup>1</sup>, YE Si-rong<sup>1</sup>, YANG Li-feng<sup>2</sup>

(1 Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060 China)

(2 School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The multiple quantum well structure for 850nm vertical cavity surface emitting laser device based on GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As has been design in this paper. The major process parameters of Low Pressure-Metal Organic Chemical Vapor Deposition (LP-MOCVD), such as the growth temperature, the reaction chamber pressure, total carrier gas flow rate and so on, have been optimized and the growth of complete epitaxial structure has been carried out. The experimental results showed that components of the GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum well structure devices was obtained under the condition of 700℃, the best composition  $x$  is 0.24 by the Photoluminescence (PL) spectrum comparison test and a good surface morphology of the multiple quantum well structure had been obtained. The optimum growth rate growth rate was 0.34~0.511 nm/s ultimately.

**Key words:** Metal-organic chemical vapor deposition; Growth temperature; Multiple quantum well; Growth rate; Epitaxial structure

**OCIS Codes:** 250.5590; 230.0230; 250.0250; 060.0060; 140.0140

## 0 引言

垂直腔型面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 具有低阈值、高电光转换效

**基金项目:**国家自然科学基金 (No. 61571096) 和中国博士后科学基金 (No. 2016M592658)、四川省科技计划国际合作项目 (No. 2014HH0064)、中央高校基础科研业务费 (No. ZYGX2014J047) 资助

**第一作者:**胡伟 (1980-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为激光应用及新型光器件. Email: huweicet44@163.com

**通讯作者:**杨立峰 (1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学工程、光信号处理及光电器件. Email: mythlocust206@163.com

**收稿日期:**2016-09-29; **录用日期:**2016-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

率、易于高速调制等优点,可应用于长距离、高速率、大容量数据处理的光纤通信系统中,近年来,得到了国内外学者的广泛关注.随着金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)技术的出现,VCSEL得到了长足发展.1986年 Emeritus K. Iga 教授的科研小组制备了 6 mA 的面发射激光器<sup>[1-2]</sup>,并且在 1987 年应用 MOCVD 技术在 GaAs 衬底上研制出了第一只室温(Room Temperature, RT)连续激光(Continuous Wave lasing, CW)的 VCSEL<sup>[3]</sup>.从 20 世纪 90 年代初期开始,VCSEL 的研究在国内外得到了快速发展,Furukawa 等<sup>[4]</sup>通过二维三角孔结构设计了 850 nm VCSEL 器件,得到了高功率稳定的单模输出;张建等<sup>[5]</sup>制备了氧化限制型非闭合台面结构的 795 nm 顶发射 VCSEL 器件;刘丽杰等<sup>[6]</sup>比较了 1 310 nm VCSEL 芯片制备方法,指出全外延生长法比键合法更具产业化前景;张金胜等<sup>[7]</sup>在注入电流为 30 A 的条件下,实现 808 nm 的 VCSEL 高功率输出,最大功率达到 9 W.

VCSEL 有源区的体积小、腔短,容易实现单纵模、低阈值(亚毫安级)电流工作,但是为了得到足够高的增益,其腔镜的反射率必须达到 99%. VCSEL 具有较高的弛豫振荡频率,在高速数据传输以及光通信中,有着广泛的应用<sup>[8-12]</sup>.

GaAs/AlGaAs 是目前为止应用最为广泛、最为成熟的分布式布喇格反射镜(Distributed Bragg Reflector DBR)材料体系. VCSEL 芯片中包括数十层外延材料,为了降低阈值电流,提高斜率效率和调制带宽,必须在芯片结构上对各层外延材料的组分、厚度、掺杂浓度进行优化设计<sup>[13-15]</sup>,使光场和电场分布能够得到有效交叠,注入载流子被限制在光增益区内辐射复合,提高激光器内量子效率,降低非辐射复合损耗<sup>[16]</sup>.本文对用于制作 VCSEL 芯片器件的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱结构进行设计,在 LP-MOCVD(Low Press-Metal Organic Chemical Vapor Deposition)生长工艺中,对生长温度、反应室压力、总载气流量以及生长速度等主要工艺参量进行优化,并进行了完整外延结构的生长.

## 1 模型及结构设计

VCSEL 是一种半导体激光器的单片谐振器,如图 1 所示,其发射光的方向是垂直于芯片表面. VCSEL 上下腔由两个 DBR 形成,夹层中有源区通常由多量子阱结构组成.

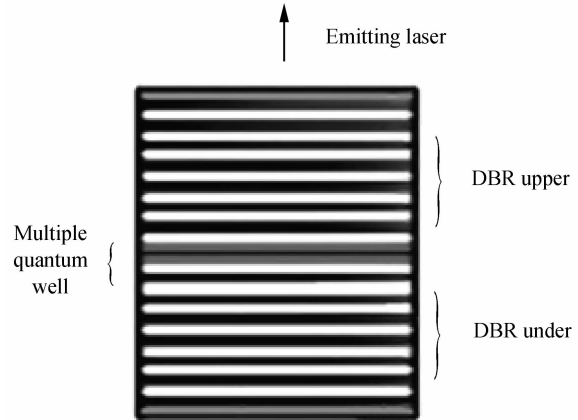


图 1 VCSEL 的基本结构横截面  
Fig. 1 The basic structural cross section of the VCSEL

### 1.1 理论模型

当多层相邻两介质层的电磁场关系满足<sup>[16]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_{\perp} \\ H_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_b & -\frac{i}{\eta_b} \sin \delta_b \\ -i\eta_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\parallel} \\ H_{\parallel} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\delta_b = -\frac{\omega}{c} n_b h_b \cos \theta_b$ ,  $\eta_b = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_b \cos^2 \theta_b$ ,  $n_b$ ,  $h_b$ ,  $\theta_b$  分别表示第  $b$  层介质的折射率、厚度和入射电磁波与其法线的夹角,则第  $b$  层单层介质的传输矩阵为

$$\mathbf{M}_b = \begin{bmatrix} \cos \delta_b & -\frac{i}{\eta_b} \sin \delta_b \\ -i\eta_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于图 1 的一维周期性结构,可逐层应用式(2),求得整个一维光子的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_1 \cdots M_1 M_2 \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

分别在第一个界面及最后一个界面上列电磁场分量方程,并将求得的  $E_1, H_1, E_{N+1}, H_{N+1}$  代入式(1),展开可求得反射系数<sup>[18-19]</sup>为

$$r = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} = \frac{A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} - C - D\eta_{N+1}}{A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} + C + D\eta_{N+1}}$$

反射率为

$$R = r \cdot r^* \quad (4)$$

利用 X 射线测量多量子阱,利用摇摆曲线计算多量子阱的周期厚度.假设多量子阱一周期厚度为  $L_p$ ,根据布喇格定律

$$L_p = \lambda / [2(\sin \theta_{n+1} - \sin \theta_n)] \quad (5)$$

式中,  $L_p$  为多量子阱的周期厚度,即阱宽与势垒宽度之和;  $\lambda$  为 X 射线波长;  $\theta_{n+1}$  和  $\theta_n$  是两相邻的卫星峰对应衍射角,  $n$  为卫星峰的衍射级数.

## 1.2 结构设计

GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 外延材料采用 LP-MOCVD 方法生长.以 2 英寸的半绝缘 GaAs 作为外延材料生长衬底,以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)作为 III 族源,砷烷(AsH<sub>3</sub>)作为 V 族源,硅烷(SiH<sub>4</sub>)作为  $n$  型掺杂源.

顶层 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 晶格常量与 GaAs 吸收层匹配,光吸收截止波长 710 nm,对于 850 nm 的信号光为透明窗口,为使 PN 结远离芯片表面,增加器件可靠性,设计厚度 500~700 nm,顶层 GaAs 材料将吸收信号光,设计厚度小于 100 nm,以减弱对器件响应度的影响. GaAs 吸收层的吸收系数  $\alpha$  在 850 nm 波长大于 Ge,远大于 Si,经计算,当 GaAs 吸收层厚度  $W$  大于 2.5  $\mu\text{m}$  时,响应度大于 0.5 A/W( $\lambda=0.85 \mu\text{m}$ ).

## 2 生长实验

### 2.1 势垒层 Al 组分的确定

生长 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱,首先需确定势垒层 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 三元合金中 Al 组分  $x$ .根据前期试验的经验,本项目多量子阱的势垒层设计为 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As(即  $x=0.24$ ),并进行 2 次实验.实验中材料的生长层次以及光致发光谱(Photoluminescence, PL)测试结果如图 2 和图 3 所示.

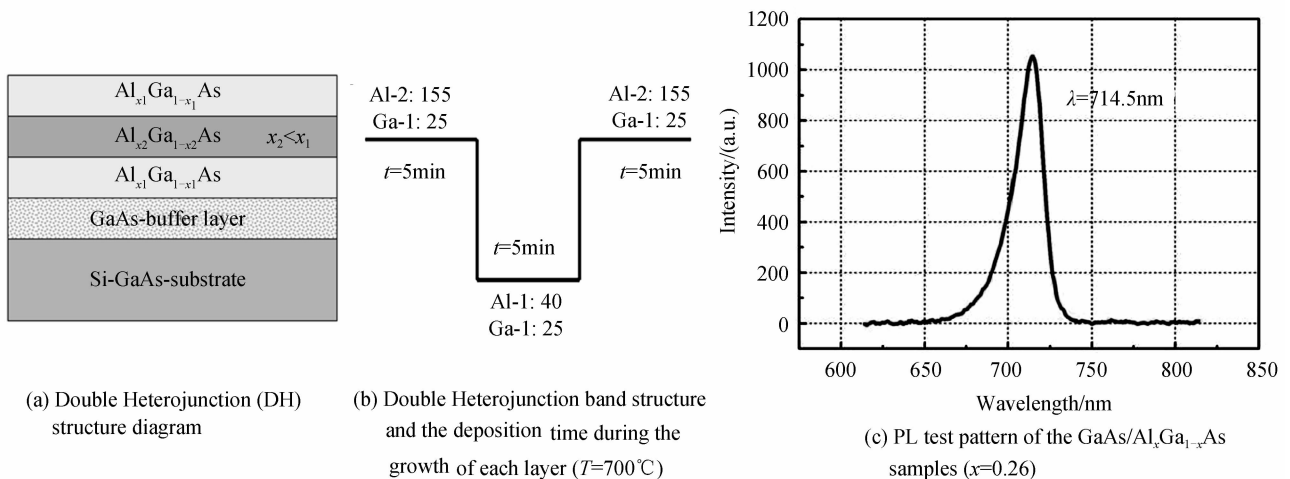


图 2 双异质结结构的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 外延层薄膜的组分控制结果( $x=0.26$ )

Fig. 2 The composition control results of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As epitaxial film with the Double Heterojunction band structure ( $x=0.26$ )

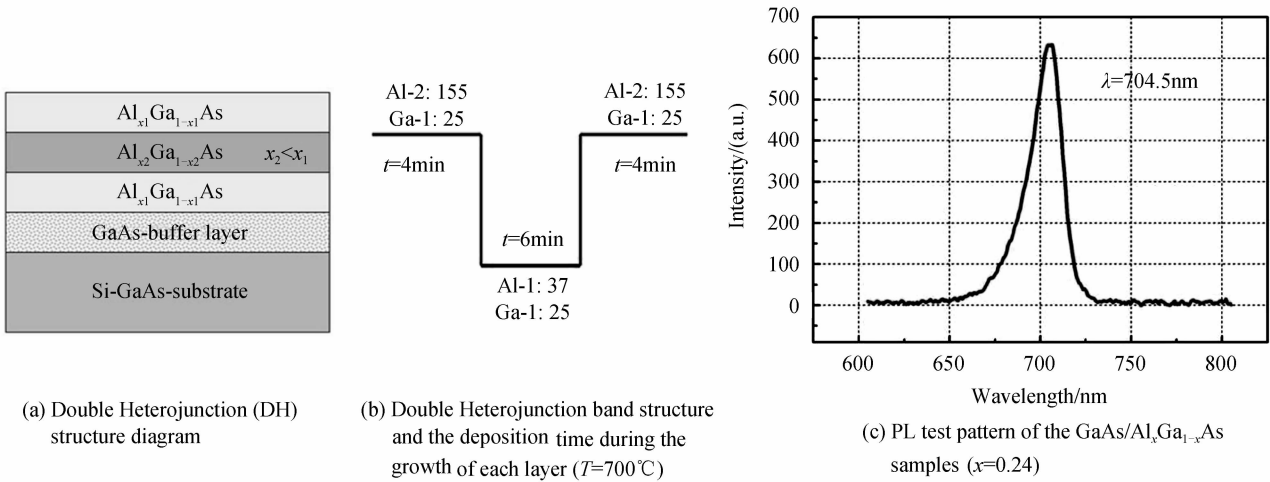


图 3 双异质结结构的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 外延层薄膜的组分控制结果 ( $x=0.24$ )  
 Fig. 3 The composition control results of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As epitaxial film with the Double Heterojunction band structure ( $x=0.24$ )

第一次生长实验中采用双异质结(Double Heterojunction, DH)对 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 进行组分判定, 结构如图 2(a)所示, 同时如图 2(b)所示设定衬底温度为 700 °C 时各层薄膜生长过程中 Ga 源与 Al 源的流量比例与沉积时间, 得到的 PL 测试结果如图 2(c)所示, 根据其峰值波长可确定窄带隙层 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的 Al 组分为 0.26, Al 组分偏高, 考虑适当降低 Al-1 源的流量. 第二次生长实验中, 采用相同的双异质结结构如图 3(a)所示, Al-1 源流量调整为 40 mL/min, 同时, 进一步增加了窄带隙层的生长时间 ( $t=6$  min), 如图 3(b)中所示, 以尽可能避免量子效应的影响, PL 测试结果表明, 该 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的 Al 组分为 0.24, 如图 3(c)所示. 因此, 势垒层 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 的源流量确定为 Al-1=37 mL/min、Ga-1=25 mL/min (生长温度  $T=700$  °C).

2.2 生长速率与掺杂条件的确定

因为量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)的跃迁类型以及峰值响应波长等性能参量对阱宽的变化很敏感, 相对于势垒层 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 而言, 阱层 GaAs 的生长速率需精确确定. 首先, 利用单量子阱(Single Quantum Well, SQW)确定 GaAs 的生长速率, 材料生长层次以及 PL 测试结果如图 4. 采用单量子阱结构如图 4(a)所示, 仍然设定衬底温度为 700 °C 时各层薄膜生长过程中 Ga 源与 Al 源的流量比例与沉积时间如图 4(b)所示, 从图 4(c)的 PL 测试图谱可知, 量子效应使得阱层 GaAs 的 PL 峰值波长向短波方向漂移(838 nm), 右峰为典型的 GaAs 体材料峰(864 nm), 可以测算阱层 GaAs 的厚度为 6.8 nm, 则生长速率为 0.34nm/s.

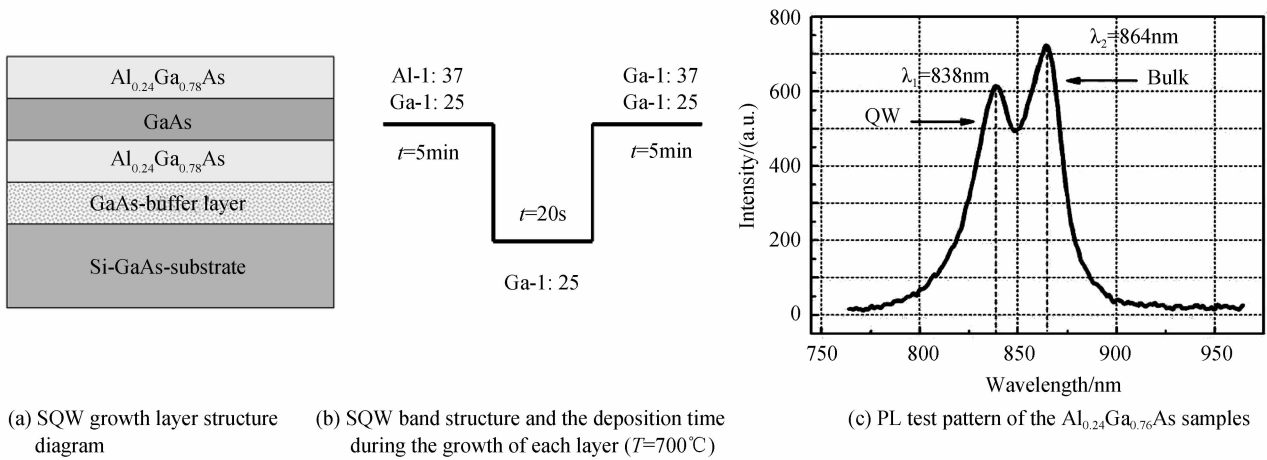


图 4 单量子阱阱层结构的 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 外延层薄膜的组分控制结果  
 Fig. 4 The composition control results of Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As epitaxial film with the single quantum well

由式(5)计算, 多量子阱的周期厚度约为  $L_p \approx 46$  nm, 略大于 40.4 nm 的预计周期厚度. 这是因为势垒层 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 的实际生长速率稍快于预计生长速率(0.42 nm/s). 若假定阱层 GaAs 的厚度控制是精确的,

则势垒层 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 的实际生长速率为 0.49 nm/s,略小于扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测得的生长速率 0.511 nm/s.

### 3 材料特性分析及测试结果

利用 SEM 测试 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 结面厚度来验证阱层 GaAs 的生长速率,测定 Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 的生长速率.通过 Hall 测试确定阱层和接触层的掺杂浓度.

GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的生长速率与阱层掺杂浓度采用图 5 所示的生长结构进行确定.此次生长实验中,GaAs、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的生长时间较长,分别为 20 min、23 min,因此,GaAs、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 外延层均较厚,一定程度上减小了平均生长速率的测试误差.另外,在中间层 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 进行了 p 型掺杂,保证能够对最上层 n-GaAs 进行准确的 Hall 测试.

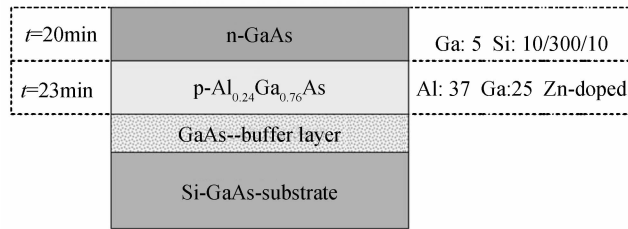


图 5 GaAs/AlGaAs 生长速率与阱掺杂浓度实验结构  
Fig. 5 Configuration to growth rate and well doping of GaAs / AlGaAs

Hall 测试结果表明,在此 Si 掺杂条件下,GaAs 的 n 型载流子浓度为  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,与预期的  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  略有差别,在随后的外延生长中应适当增加 Si 的掺杂剂量.接触层的 n 型掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,其掺杂条件根据此次实验结果进行相应调整.

SEM 测试结果如图 6 所示,从图中可以发现:GaAs 与 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 之间有较为清晰的界面,另一方面,由于对 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 外延层进行了 p 型 Zn 掺杂,而 Zn 的扩散系数较大,因此在 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 界面处,可见 45 nm 左右的 Zn 扩散层,因此,在计算 GaAs 外延层厚度时,应将 Zn 扩散层计入在内.根据 SEM 测试结果得到的生长速率见表 1.

结合 PL 与 SEM 测试结果,可确定 GaAs/Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As 的生长速率,如表 2 所示.根据最后得到的平均生长速率,可确定正式外延片的生长条件.

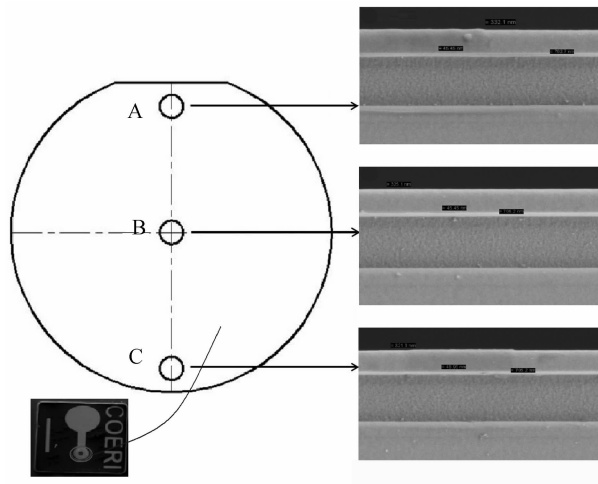


图 6 对于三个不同测试点 A,B,C 的 SEM 测试图谱(放大倍数:100 000×)  
Fig. 6 SEM test pattern about three different test points A, B, C (magnification: 100 000×)

表 1 SEM 测得 GaAs 与  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  的生长速率  
Table 1 The growth rates of GaAs and  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  measured by SEM

Epitaxial layer	Growth rate/(nm · s <sup>-1</sup> )			Average growth rate/(nm · s <sup>-1</sup> )
	Test point A	Test point B	Test point C	
GaAs	0.315	0.309	0.308	0.310
$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	0.509	0.512	0.512	0.511

表 2 GaAs 与  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  的生长速率  
Table 2 Growth rate of the GaAs and  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$

Epitaxial layer	Growth rate/(nm · s <sup>-1</sup> )		Average growth rate/(nm · s <sup>-1</sup> )
	PL measurement	SEM measurement	
GaAs	0.340	0.310	0.325
$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	0.509	0.512	0.511

图 7 为 80 层结构的 DBR, 根据式 (4) 计算得反射率超过 99%, 实际测量值为 95.6% 以上, 是理想的 DBR, 反射谱测试结果如图 8 所示. 在 MOCVD 生长过程中, 为提高多量子阱的异质界面质量, 采用“过长”法, 异质界面的生长停顿时间为 1s, 这样可改善阱宽的均匀性以及界面的清晰度. 阱层 GaAs 与接触层 GaAs 的流量控制不同, 生长较厚的接触层时, III 族源 Ga 的流量为生长超薄阱层时 Ga 源流量的两倍.

40 periods	$t=20.50\text{min}$	n-GaAs 800nm	Ga-1: 50 Si: 13/100/15
	$t=83\text{s}$	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 35nm	Ga-1: 25 Al-1:37
	$t=17\text{s}$	n-GaAs 5.4nm	Ga-1: 25 Si:10/280/10
	$t=83\text{s}$	$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 35nm	Ga-1: 25 Al-1:37
	$t=13\text{min}$	n-GaAs 500nm	Ga-1:50 Si: 13/100/15
		Si-GaAs-substrate	AsH <sub>3</sub> =200 T=700°C

图 7 QWIP 的外延结构及 MOCVD 生长条件

Fig. 7 QWIP epitaxial structures and MOCVD growth conditions

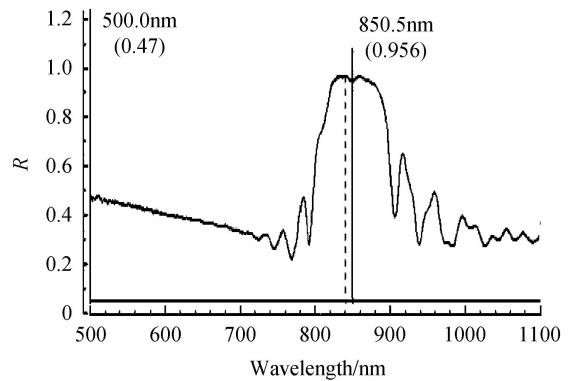


图 8 DBR 的反射谱

Fig. 8 Reflection spectrum of the DBR

这样既提高了接触层的生长速率, 缩短了生长时间, 又能够以较慢的生长速率准确控制阱层厚度. 整个生长过程中没有变温中断, 生长温度均为 700°C, 避免了变温过程中生长表面的保护问题.

QWIP 外延片的 X 射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD) 测试结果如图 9 所示. 由图 8 可见多量子阱的卫星峰强度较弱, 这是由多量子阱之上较厚的覆盖层 (800nm 的上接触层) 造成的.  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  QWIP 的外延片 SEM 见图 10,  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  量子阱清晰可见.

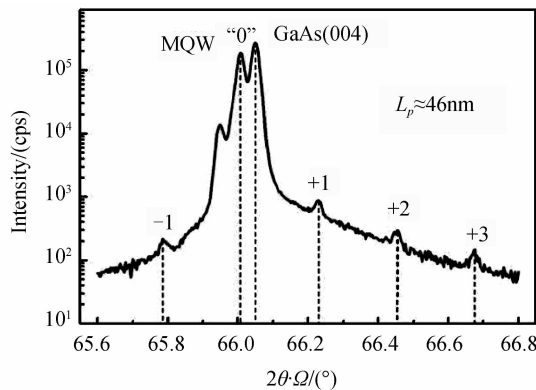


图 9 QWIP 外延片的 XRD 测试图谱

Fig. 9 XRD pattern of QWIP epitaxial wafers

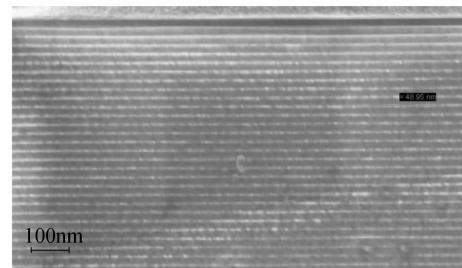


图 10  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  QWIP 的外延片 SEM 图

Fig. 10 SEM of  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  QWIP epitaxial wafers

此外, 单层实验中得到的  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  生长速率 (0.511 nm/s) 明显快于预计的生长速率 (约 0.42 nm/s), 考虑到此次  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  生长速率的确定只采用了 SEM 测试手段, 而对于需精确到纳米级的薄层测

量,SEM的分辨率较为有限,其测试误差相对略大.SEM的优点是能够直接观察样品表面的结构,样品不用切成薄片,而且样品可以作三维的平移和旋转,图像的立体感较强,分辨率可达3 nm.其缺点是由于荷电效应,造成异常反差,以及由于静电场作用造成图像畸形和漂移.另一方面,必须保证足够的Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>As势垒厚度以有效降低器件暗电流,因此,采用相对较慢的生长速率(0.42 nm/s)进行外延生长.

## 4 结论

在LP-MOCVD生长工艺中,通过对生长温度、反应室压力、总载气流量以及生长速度等主要工艺参量进行控制,成功地制备了用于850nm垂直腔型面发射激光器件的GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As多量子阱结构,通过Al组分的调节实现了量子阱与GaAs底层的晶格匹配,得到了平整的界面,发现了合适的Al组分,可以在上述两种多量子阱材料中获得优良近红外发光.结果表明:实验中器件在700°C得到多种组分的GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As多量子阱结构,通过PL谱的测试对比分析,找出最佳组分为0.24之后,得到良好的表面形貌,最终得到最佳生长速度为0.34~0.511 nm/s.制备的VCSEL激光器阵列因其低成本、高速率、高集成度的特点,与微透镜、微光机电系统等集成应用,实现功能性集成模块,如高速多路并行光发送组件,在短距离、大容量并行数据链路将有巨大应用市场.

## 参考文献

- [1] IGA K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(6): 1201-1215.
- [2] SODA H, IGA K, KITAHARA C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, **18**(12): 2329-2330.
- [3] KOYAMA F, KINOSHITA S, IGA K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, **55**(3):221-222.
- [4] FURUKAWA A, SASAKI S, HOSHI M, *et al.* High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with triangular holey structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(22): 5161-5163.
- [5] ZHANG Jian, NING Yong-qiang, ZHANG Jian-wei, *et al.* 795nm VCSELs for <sup>87</sup>Rb based miniaturized atomic clock [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(1):50-57.  
张建,宁永强,张建伟,等. 微型铷原子钟专用795nm垂直腔表面发射激光器[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(1):50-57.
- [6] LIU Li-jie, WU Yuan-da, WANG Yue, *et al.* Research progress of 1 310 nm VCSELs chip technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7): 809-815  
刘丽杰,吴远大,王玥,等. 1 310 nm垂直腔面发射激光器芯片制备技术的研究进展[J]. *发光学报*, 2016, **37**(7):809-815.
- [7] ZHANG Jin-sheng, LIU Xiao-li, CUI Jin-jiang, *et al.* High peak power 808nm vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(9): 1098-1103.  
张金胜,刘晓莉,崔锦江,等. 高峰值功率808nm垂直腔面发射激光器阵列[J]. *发光学报*, 2014, **35**(9):1098-1103.
- [8] NISHIYAMA N, CANEAU C, TSUDA S, *et al.* 10-Gb/s error-free transmission under optical reflection using isolator-free 1.3 μm InP-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**( 8): 1605-1607.
- [9] IGA K. Vertical cavity surface emitting laser: Its conception and evolution[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(1):1-10.
- [10] ONOMURA A, ARAI M, KONDO T, *et al.* Densely integrated multiple-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, **42**(5): 529-531.
- [11] PARK S, AHN D. Spontaneous emission and optical gain characteristics of blue InGaAlN/InGaN quantum well structures with reduced internal field[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**: 043107.
- [12] SOMPIE S, URANUS H. The transverse modal properties of VCSEL with photonic crystal cladding of rectangular lattice pattern[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **50**(9): 388-396.
- [13] KALER R. Performance evaluation of VCSEL through single and multi mode fibers[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, **123**(10): 911-914.
- [14] KOYAMA F. Advances and new functions of VCSEL photonics[J]. *Optical Review*, 2014, **21**(6): 893-904.
- [15] CAI Li-e, ZHANG Bao-ping, ZHANG Jiang-yong, *et al.* Fabrication and characteristics of GaN-based blue VCSEL [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(4): 452-456.  
蔡丽娥,张保平,张江勇,等. GaN基蓝光VCSEL的制备及发光特性[J]. *发光学报*, 2016, **37**(4):452-456.
- [16] WANG Jin-hui, SAVIDIS I, FRIEDMAN E. Thermal analysis of oxide-confined VCSEL arrays[J]. *Microelectronics Journal*, 2011, **42**(5): 820-825.

- [17] IGA K. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)[C]. *Proceedings of The IEEE*, 2013, **101**(10): 2229-2233.
- [18] REN Hong-wen, LIU Shi-wen, XU Xian-gang, *et al.* Assessment on MOCVD growth techniques of GaAs/AlGaAs quantum heterostructures[J]. *Journal of Synthetic Crystal*, 1993, **22**(2): 132-135.  
任红文,刘士文,徐现刚,等. MOCVD 生长 GaAs/AlGaAs 掺杂量子异质结构工艺评价[J]. *人工晶体学报*,1993,**22**(2):132-135.
- [19] ZHENG Xin-he, XIA Yu, LIU San-jie, *et al.* MBE growth of GaNAs-based superlattice solar cells and clevice properties[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(8): 923-929.  
郑新和,夏宇,刘三姐,等. GaNAs 基超晶格太阳能电池的分子束外延生长与器件特性[J]. *发光学报*,2015,**36**(8):923-929.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61571096) , the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2016M592658) , the Sichuan Provincial International Cooperation(No. 2014HH0064) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. ZYGX2014J047)