

# 液相外延生长超薄有源层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 分别限制双异质结构激光器

任大翠 李含轩 薄报学

(长春光学精密机械学院近代光学所, 长春 130022)

**摘 要** 报道超薄有源层  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  分别限制双异质结构半导体激光器的液相外延的过程。讨论了过冷度、生长温度和降温速率等对生长速率的影响。扫描电镜测得生长温度为  $680^\circ\text{C}$  时,  $\text{GaAs}$  有源层厚度可低至  $25\sim 35\text{ nm}$ 。宽接触分别限制双异质结构 LDs 的室温连续阈值电流密度多在  $700\sim 800\text{ A}/\text{cm}^2$ 。

**关键词** 液相外延生长, 分别限制双异质结构 LDs, 超薄有源层。

## 1 引 言

当有源区的厚度薄至量子阱尺寸时(为  $10^{-8}\text{ cm}$  量级),可以降低半导体激光器的阈值。由于液相外延的优点,已有不少人做过液相外延生长超薄层的探索。Reynolds<sup>[1, 2]</sup>首先提出液相外延初始生长存在三种机制的理论,奠定了薄层生长的理论基础。Lockwood<sup>[3]</sup>用盖片和薄母液法首先获得了  $50\text{ nm}$  的薄层, Zwicknagl<sup>[4]</sup>用  $550\sim 630^\circ\text{C}$  的低温液相外延得到  $15\text{ nm}$  的  $\text{GaAs}$  外延层。

为了研制低阈值半导体激光器,作者也进行了理论和实验研究,前一阶段的结果已报道<sup>[5]</sup>,本文对前一阶段的液相外延工艺进行优化,结果是获得了  $25\sim 35\text{ nm}$  的超薄有源层。

## 2 理论分析

实验已证明谢肇金的生长厚度与时间的关系的方程已不适用短时间的薄层生长,实验生长厚度比理论计算结果要厚得多。因为这些方程是假定溶质在溶剂中的扩散是液相外延唯一生长机制的前提下得出的,这种近似,对长时间生长是合适的。在初始短时间生长机制中,按溶质运输的驱动力分为表面吸附、溶质滚动和扩散。那个机理占主导地位应按时间顺序来分,在推舟时间内应是表面吸附和滚动并存。推舟过程结束后,因为熔体滚动而被破坏的组分过冷重新建立,所以接下来的便是因滚动而产生的非平衡的过冷生长,然后过渡到扩散限制的近平衡生长。在推舟时间内表面吸附和滚动并存,此时外延层的厚度应由两者中起主导作用的机制决定。Reynolds 认为,究竟那种机制起主要作用取决于降温速率。

当降温速率  $R$  小于某个值时滚动机制为主导,生长厚度与时间关系由下式确定<sup>[1]</sup>:

$$d(t) = d_r + d_r(t - t') + d_D(t - t') \quad (1)$$

式中  $d_r$  为与推舟速率<sup>[1]</sup>和初始过冷度<sup>[7]</sup>有关的恒定厚度。

$$d_D(t - t') = (4/3)(R/C_s m) (D/\pi)^{1/2} (t - t')^{3/2} \quad (2)$$

是扩散机制引起的层厚,  $C_s$  为生长层中溶质浓度,  $m$  为液相线斜率,  $T_s$  为过冷度,  $D$  为溶质扩散系数,  $R$  为降温速率,  $t$  为生长时间,  $t'$  为流动中形成的湍流时间。

$$d_r = \left(\frac{2T_s}{C_s m}\right) \left[\frac{D(t - t')}{\pi}\right]^{1/2} \quad (3)$$

是由于近平衡被破坏而形成的有效过冷度对生长厚度的贡献, 显然(1)式的第二项和第三项只有在推舟过程结束后才起作用, 因此在用连推法(即让熔体连续滑过衬底)生长时, 外延层厚度决定于推舟速度和初始过冷度。

当  $R$  大于某个值时表面吸附为主导, 生长厚度与时间关系为<sup>[2]</sup>:

$$d(t) = (T_s/C_s m) [2(D/\pi)^{1/2} t^{1/2} - D/K + (D/k) \exp(k^2 t/D) \operatorname{erfc}(k^2 T/D)^{1/2}] \quad (4)$$

$k$  为表面反应系数。

由(2)和(3)式可见, 若生长时间  $t < t'$ , 则厚度由  $d_r$  决定, 与推舟时间和初始过冷度有关。若生长时间  $t > t'$ , 则厚度与过冷度  $T_s$  和液相线斜率  $m$  有线性关系, 也与  $D$  有关。因此为了获得重复率较高的  $< 40 \text{ nm}$  的分别限制双异质结构有源层和  $100 \text{ nm}$  的波导层, 应降低过冷度, 采用大的液相线斜率和小的溶质扩散系数。  $m$  在低温下比高温下 ( $800^\circ\text{C}$ ) 增加了近一个数量级, 而  $D$  却降低了近一个数量级, 因此  $D/m$  降低了近两个量级。

### 3 实验装置及方法

综上所述, 解决超薄有源层液相外延生长的关键在于:

1) 降低生长时间。本文用连推法生长超薄有源层。生长时间  $t$  为熔体尺寸  $L$  除以推舟速率  $V$ 。因此减小熔体尺寸可以大大减小熔体与衬底接触时间。  $t$  随推舟速率变化而变化 ( $V$  可达  $3 \text{ cm/sec.}$ )。

2) 减小组分过冷。除了通过降低降温速率  $R$  来减小过冷度外, 也可以用盖片和薄的母液达到降低过冷度的目的。盖片的作用是使生长更接近平衡生长。  $T_s$  越小, 在最短的生长时间内外延层越薄。

薄层生长另一个问题是回熔问题, 回熔与  $\text{GaAlAs}$  在  $\text{GaAs}$  中溶解度有关,  $700^\circ\text{C}$  时,  $\text{GaAs}$  层大约只有  $8 \text{ nm}$  被回熔掉<sup>[8]</sup>。由此可看出, 超薄层的实现只能在低温下进行。

实验采用改进的水平滑动石墨舟, 与普通的石墨舟的区别是生长有源区小室底部是个单缝 ( $3 \text{ mm}$ ), 其熔体上盖块内  $ln$  的重力作用可以消除溶体的球形表面张力作用。高纯  $\text{GaAs}$  晶片和单缝分别用以达到降低薄熔体过冷度和生长时间的目的, 如图 1 所示。

由于超薄有源层的实现只能在极短时间内完成, 任何机械的扰动, 都会对有源区的生长产生影响使有源区变得不均匀。因此采用步进电机推舟以获得比较恒定和可变的推舟速率。用低位错 P 型  $\text{GaAs}$  为衬底。实验前对衬底进行常规清洗和处理, 为除去液  $\text{Ga}$  中的氧, 在  $850^\circ\text{C}$  下脱氧两小时, 装入  $\text{GaAs}$ 、 $\text{Al}$ 、掺杂剂等配成饱和溶液, 整个反应过程中以经钯管过滤的超纯  $\text{H}_2$  作为保护气。为防止加热过程中  $\text{GaAs}$  衬底热分解, 衬底上面加盖石墨块。作者研究了  $780 \sim 680^\circ\text{C}$  之间的  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  液相外延生长特性, 在  $\text{GaAs}$  衬底上依次生长分别限制双异质结构六层结构: P- $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  限制层 (掺  $\text{Ge}$ ,  $p = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), P- $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  波

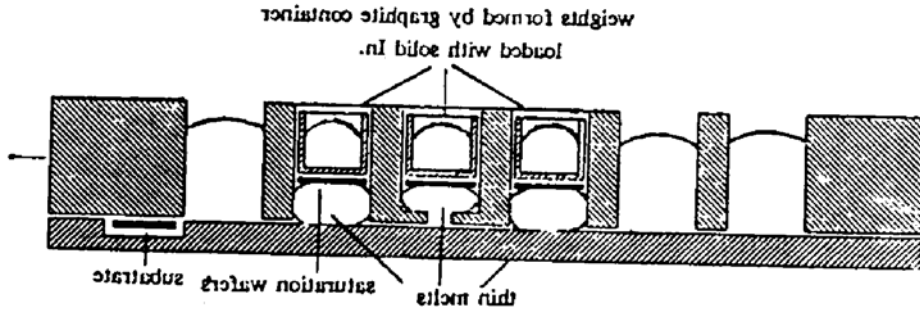


Fig. 1 Graphite boat used for LPE of SCH LD with ultra-thin active layer. Cross section showing saturation wafers and weights to compress melts

导层(Ge,  $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), GaAs 有源层(非故意掺杂), N-Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 波导层( $n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), N-Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As 限制层( $n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), n-GaAs 欧姆接触层( $n > 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )结构如图 2 所示。

### 4 实验结果与分析

为了得到比较好的外延质量和超薄有源层,实验采用 0.2 °C/min 降温速率,研究了 780°C~680°C 之间 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs 液相外延生长特性。生长有源区时有时采用连推法,其生长时间由推舟速率和溶体尺寸决定,一般为 0.05~0.3 s,有时停顿 3~10 s,在 680°C 情况下,用连推法生长有源层经 Hitachi 扫描电镜测量,厚度多在 25~35 nm 之间,图 3 给出了有源层的厚度与生长时间的关系曲线。

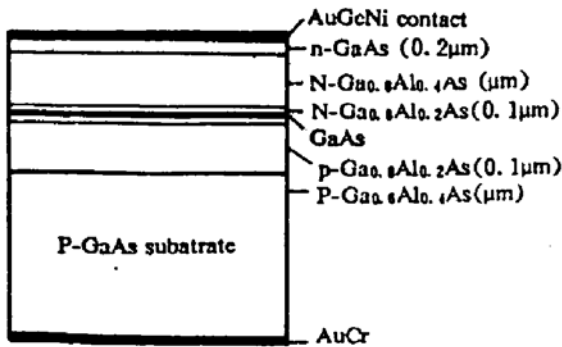


Fig. 2 Schematic structure graph of SCH LD

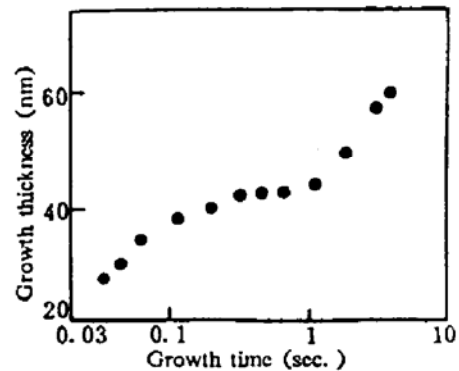


Fig. 3 Thickness variation of GaAs layer with growth time

实验采用上述的低温液相外延制作宽接触分别限制双异质结构激光器,测试结果表明:腔长  $L = 350 \mu\text{m}$ , 条宽  $W = 70 \mu\text{m}$  时,连续激光阈值电流密度已降低到  $700 \text{ A/cm}^2$ 。值得指出的是,有源区生长时间太短,而不能精确控制层厚,可是在一系列连推法实验中,发现可以重复地得到 25~35 nm 的有源层,这个厚度是有实用价值的,因为这个厚度已经出现量子尺寸效应,如果进一步降低生长温度,有希望进一步减小有源层厚度。

### 参 考 文 献

[1] C. L. Reynolds *et al.*, Analysis of short-time LPE Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. *J. Crystal Growth*, 1982, **57**(1): 109~112  
 [2] C. L. Reynolds *et al.*, (Al, Ga) As active layer in dependence on cooling rate. *J. Crystal Growth*, 1982, **59**(3): 525~529

- [3] H. F. Lockwood, M. Etienberg, Thin solution-multiple layer epitaxy. *J. Crystal Growth*, 1972, **15**(1) : 81~83
- [4] Zwicknagl, LPE growth of ultra-thin multiple GaAs layer. *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**(6) : 1513~1515
- [5] 薄报学, 任大翠, 张兴德, 低阈值 GaAs/GaAlAs SCH 激光器的液相外延. 1994 年光电子器件与集成技术年会论文集, 北京, 北京林业大学出版社, 93~94
- [6] R. A. Logan, F. K. Reinhart, LPE growth of GaAlAs. GaAs laser struture. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(10) : 4172~4174
- [7] Satoru Todoroki, Isao Ohbu, Thickness control of GaAlAs layer grown by LPE at low temperature. *J. Crystal Growth*, 1987, **85**(2) : 461~468

## LPE Growth of SCH LD with Ultra-Thin Active Layer

Ren Dacui    Li Hanxuan    Bo Baoxue    Zhang Xingde

(Changchun Institute of Optucs and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 17 July 1994; revised 9 December 1994)

**Abstract** The realization of SCH multilayer structure with ultra-thin GaAs active layer using a modified graphite boat system and low temperature technology is demonstrated. Our method utilizes thin solutions and saturation wafers to achive GaAs epitaxial layer in the thickness of 25~35 nm which is uniform over relatively large area. Broad-contact LDs using the above mentioned epitaxial wafers are fabricated. These devices have threshold current density of 700~800 A/cm<sup>2</sup> at room temperature.

**Key words** SCH LDs, ultra-thin layer, LPE.