

选择区域生长高质量 InGaAsP 多量子阱材料*

刘国利¹ 王 坊¹ 张佰君¹ 许国阳¹ 陈娓兮¹ 叶小玲² 张静媛¹ 汪孝杰¹ 朱洪亮¹

(1 中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

(2 中国科学院半导体研究所 材料科学开放实验室, 北京 100083)

摘要: 采用 LP-MOVPE 在 SiO₂ 掩膜的 InP 衬底上实现了高质量的 InGaAsP 多量子阱 (MQW) 的选择区域生长 (SAG). 通过改变生长温度和生长压力, MQW 的适用范围由 C 波段扩展至 L 波段, 即 MQW 的光致发光波长从 1546nm 延展至 1621nm. 光致发光 (PL) 测试表明: 在宽达 75nm 的波长范围内, MQW 的质量与非选择生长的 MQW 质量相当, 并成功制作出电吸收调制 DFB 激光器 (EML).

关键词: 选择区域生长; LP-MOCVD; InGaAsP; 多量子阱; EML

EEACC: 0510D; 2520D; 2530C; 4270

中图分类号: TN 248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)05-0609-04

1 引言

在介质膜(SiO₂, SiN_x)覆盖的平面衬底的特定区域外延生长半导体材料, 利用介质膜对材料生长速率的影响, 通过改变介质膜的尺寸, 可方便地在同一衬底上一次外延实现光子集成器件中有源与无源器件的材料^[1-10]. 其主要用途是制作分布反馈(DFB)激光器与电吸收调制器的单片集成器件, 该集成器件由于具有低啁啾的特性, 成为长途干线光通信系统的首选光源, 得到广泛的研究^[1-10]. 采用选择区域外延(SAG)方法制作集成器件可大大降低成本、简化制作工艺. 随着增益平坦的掺铒光纤放大器(EDFA)的带宽展宽, 近来波分复用(WDM)的波段已由 1530—1560nm 的 C 波段扩展至 1565nm—1610nm 的 L 波段. 因此, 应用于 C 波段和 L 波段的高质量 MQW 材料的生长成为必须.

通常为制作不同波长的 MQW 需要重新调整量子阱、垒材料的组份, 这一过程费时又费力. 而我们通过改变 MQW 的生长温度和反应室的压力, 在 SiO₂ 掩膜衬底上生长出从 1546nm 到 1621nm 之间的 MQW, 选择区与非选择区的波长间隔保持为 50nm 左右. PL 测试显示, 选择区的 MQW 的光致

发光谱的半高宽(FWHM)在 40meV 以下, 其质量与非选择区域生长的 MQW 相当, 为单片集成电吸收调制 DFB 激光器(EML)奠定基础.

2 材料生长

首先, 在(100) n-InP 衬底上用 PECVD 淀积一层厚约 0.2 μm 的 SiO₂, 并沿[110]方向刻蚀出如图 1 所示的掩膜图形, 用以研究 SAG 对材料的影响. 其中 W_m 是作为掩膜的 SiO₂ 宽度, W_s 为选择生长

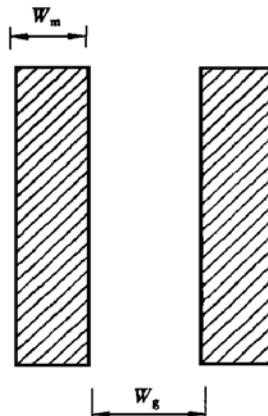


图 1 SAG 所使用的 SiO₂ 掩膜尺寸示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of SiO₂ Mask for SAG

* 国家“863”高技术计划(项目编号: 863-307-11-1(15)) 和国家自然科学基金(批准号: 69896260)资助项目.

区的宽度。采用 AIXTRON-200 型 LP-MOVPE 系统进行选择区域生长，采用三甲基铟(TMIn)、三甲基镓(TMGa)作为 III 族源，砷烷和(AsH₃)磷烷(PH₃)作为 V 族源。PL 测试采用 Bruker IFS120HR 型傅里叶(Fourier)光谱仪，采用石英分光板(bean splitter)，InGaAs 探测器，波长为 514nm 的 Ar 离子激光器做激发光源，功率恒定在 50mW。SAG 区的 PL 谱是在刻蚀去掉 SAG 区外的材料后所测得。

2.1 生长温度对体材料的影响

图 2 是 InGaAsP($\lambda_{PL} \approx 1.6\mu m$) 体材料在平面衬底上不同生长温度时的 PL 谱。由图可见，在不同生长温度下，晶体的 FWHM 基本一致，而且光致发光强度基本一致，但光致发光峰位由 635℃时的 1599.4nm 向长波方向移动到 615℃时的 1647nm。X-ray 双晶衍射测试表明：降低生长温度后，失配由原来的 5.6×10^{-3} 增加到 6.97×10^{-3} 。根据形变势理论^[11]，我们计算了不同生长温度下材料的组份。In 的含量由高温时的 0.372 增加到 0.375，变化很小；而 As 则由 0.885 增加到 0.913；V 族元素的变量大大超过了 III 族元素。这主要是因为 TMIn 和 TMGa 的裂解效率在 600℃附近受温度的影响很小，因此材料中的 In/Ga 比值保持不变；而 AsH₃ 和 PH₃ 的裂解效率受温度影响较大^[12]，导致 V 族元素中 As 的含量增加。通过改变生长温度，我们在波长范围为 47.6nm 内得到了失配变化小、晶体质量相当的体材料。

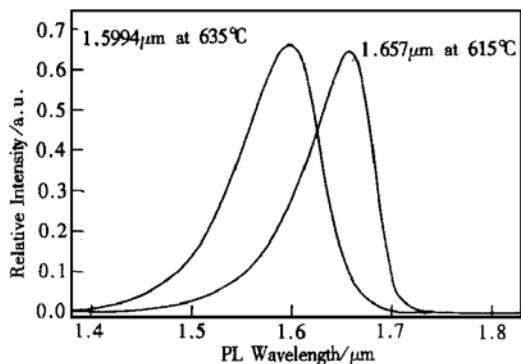


图 2 不同生长温度下的 InGaAsP 体材料的 PL 谱

FIG. 2 PL Spectra of InGaAsP Bulk Materials Grown at Different Growth Temperatures

2.2 SAG 方法生长高质量 MQW 材料

我们采用上述的材料做阱材料，用波长为

$1.15\mu m$ 的 InGaAsP 做垒，生长速率 $\sim 1\mu m/h$ ，在上述的掩膜衬底上外延 MQW 有源区，其中阱宽为 9nm，垒宽为 10nm。图 3 是我们在 635℃的生长条件下，得到的 MQW 的 PL 谱。图中，实线代表选择生长区域，方块代表非选择生长区。由于掩膜对生长速率的影响^[1, 5, 7, 8]，使选择生长区内 MQW 的厚度较非选择生长区的厚，因此选择生长区内 MQW 的 PL 谱的峰值位置向长波方向移动。在采用合适的掩膜和选择生长区的宽度后，我们在选择区内外实现了波长相差达 50nm 的 MQW 材料，符合 Lin 的理论计算要求^[13]，即为获得低啁啾、低驱动电压的电吸收调制器，EA 的能带带隙要大于激光器的光子能量 $\sim 30meV$ ，而我们制作的 MQW 的 EA 区的带宽较 LD 区要大 $26.8meV$ 。选择生长区域 MQW 的 FWHM 为 $28.7meV$ ，而非选择生长区 MQW 的 FWHM 为 $37.2meV$ ，而且光致发光强度相当，表明 SAG 区内的 MQW 的质量要高于非选择生长的 MQW 质量。

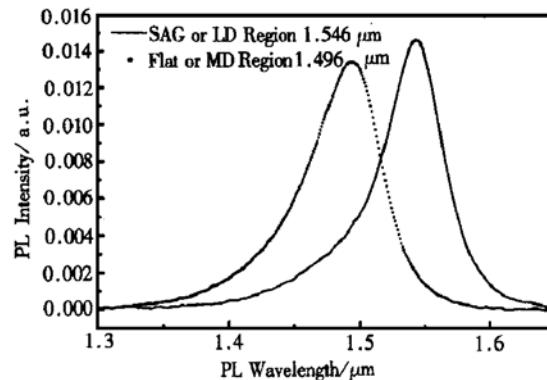


图 3 SAG 生长的 InGaAsP 的 MQW 在选择区内、外的 PL 谱
FIG. 3 PL Spectra of InGaAsP MQWs in and out of SAG Region

2.3 宽波段 MQW 材料的获得

为得到适用于 L 波段的 MQW 材料，我们降低 MQW 的生长温度，并在 615℃时，适当增加反应室的生长压力，不改变掩膜尺寸及其它的生长条件(源流量、载气流量、量子阱的生长时间等)，得到了带隙间隔基本保持一致的较长波长的 MQW 材料。如图 4 所示，降低生长温度，非选择生长区 MQW 的光致发光峰位向长波方向移动了 66.8nm，而选择生长区的 MQW 的光致发光峰位向长波方向移动了 75.5nm，不同生长温度下选择区与非选择区的 MQW 的带隙间隔分别为 50、47.3 和 58.7nm。可

见,在相同的生长压力下,尽管生长温度由 635℃降到 625℃,但带隙间隔基本保持为 50nm 左右;而生长压力升高后,气体流速降低,衬底表面的气体停滞层加厚,气相中有机源分子的横向扩散增加,导致选择区内生长速率的增强因子(enhance factor)增加^[7],MQW 的阱宽随之增加, MQW 的波长向长波方向移动,因此带隙间隔较低压有所增加。

图 4 中, MQW 光致发光光谱的半高宽(FWHM)均小于 40meV,与 Kudo 在 635℃下采用 SAG 得到的 MQW 的 FWHM 相当^[4]。我们生长的 MQW 在选择区内、外的光致发光强度相当, FWHM 分布集中在 30—40meV 之间,表明: 我们采用 SAG 技术,在波长从 1546nm 到 1621nm 内,获得了适于制作光子集成器件的高晶体质量的 MQW 材料。

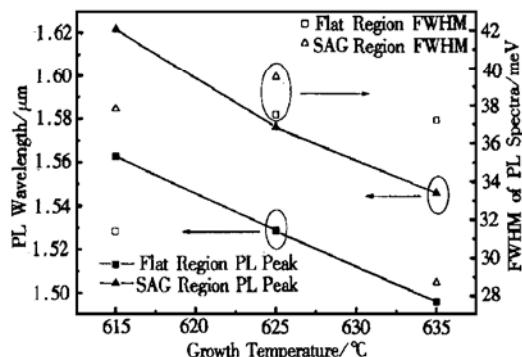


图 4 不同生长温度下选择外延的 MQW 的 PL 谱的峰位和半宽(■: MD 区域 MQW 的峰值位置; □: MD 区域 MQW 的 FWHM; ▲: LD 区域 MQW 的峰值位置; △: LD 区域 MQW 的 FWHM)

FIG. 4 PL Peak and FWHM of MQWs Grown at Different Temperatures (■: Flat Region Peak; □: Flat Region FWHM; ▲: SAG Region Peak; △: SAG Region FWHM)

3 应用

利用上述 SAG 生长的 MQW, 我们制作了单片集成电吸收调制 DFB 激光器, 其中 EML 的 DFB 激光器与调制器的能带带隙差为 26.8meV, 选择生长区为 DFB 激光器, 而非选择生长区为电吸收调制器, 结构采用单脊条形, 在文献[14]中有 EML 的详细制作过程。图 5 是典型的 EML 在不同的调制器电压下的输出光强-电流曲线, EML 的阈值电流为 27mA, 输出光功率近 10mW, 消光比(ER)大于

16dB($I_{LD}=100\text{mA}$, $V_{mod}=0\text{--}4\text{V}$, 由于采用大面积的探测器, 背底光的强度较大, 因此探测到的 ER 比实际耦合到光纤中的 ER 小), 初步的高温大电流筛选(条件为 100℃、100mA 下, 144h)显示: EML 的阈值变化小于 1mA, 输出光功率及消光比的变化小于 0.2dBm 和 0.1dB。

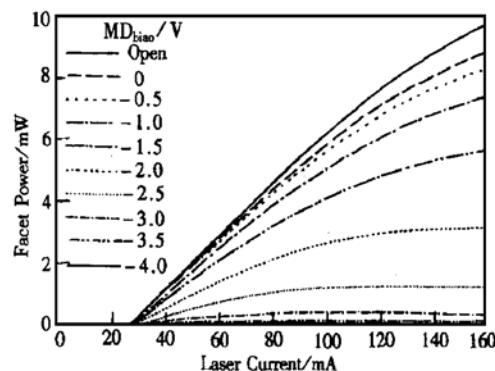


图 5 采用 SAG 生长的 MQW 制作的电吸收调制器的光强-电流曲线

FIG. 5 P - I Curves of the EML with SAG MQW as Active Layers

4 结论

我们采用 SAG 方法,通过改变生长温度和反应室压力,得到从光纤的 C 波段到 L 波段共计 75.5nm 的波长范围内高晶体质量的 MQW,而且选择区内外 MQW 的带宽间隔保持在~50nm; 并成功地制作出性能可靠、大消光比的单脊条形电吸收调制 DFB 激光器。

参考文献

- [1] M. Suzuki, M. Aoki, T. Tsuchiya *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1994, **145**: 249—255.
- [2] T. Tanbun-Ek, Y. K. Chen, J. A. Grenko *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1994, **145**: 902—906.
- [3] Moo-Sung Kim, C. Caneau, E. Colas *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1992, **123**: 69—74.
- [4] K. Kudo, T. Sasaki and M. Yamaguchi, *J. Cryst. Growth*, 1997, **170**: 634—638.
- [5] L. Silvestre, A. Ougazzaden, D. Delpart *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1997, **170**: 639—644.
- [6] Y. Chen, T. H. Chiu, J. E. Zucker and S. N. Chu, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(14): 1641—1643.
- [7] T. V. Caenegem, I. Moerman and P. Demeester, *Prog. Crystal Growth and Charact.*, 1997, **35**: 263—288.

- [8] XU Guoyang, WANG Wei, YAN Xuejin *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, **20**(8): 706—709[许国阳, 王圩, 颜学进, 等, 半导体学报, 1999, **20**(8): 706—709].
- [9] LUO Yi, SUN Changzheng, WEN Guopeng *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(8): 416—420[罗毅, 孙长征, 文国鹏, 等, 半导体学报, 1999, **20**(8): 416—420].
- [10] LIU Guoli, WANG Wei, WANG Xiaojie *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, to be published[刘国利, 王圩, 汪孝杰, 等, 半导体学报, 待发表].
- [11] Chris G and Van de Walle, Phys. Rev. B, 1989, **39**(3): 1871—1883.
- [12] Akinori Koukitu and Hisashi Seki, J. Cryst. Growth, 1986, **76**: 233—242.
- [13] S. C. Lin, P. K. L. Yu and W. S. C. Chang *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, **34**: 1100—1102.
- [14] LIU Guoli, WANG Wei, XU Guoyang *et al.*, Chinese Journal of Lasers, to be published[刘国利, 王圩, 许国阳, 等, 中国激光, 待发表].

High Quality InGaAsP MQW by Selective Area Growth^{*}

LIU Guo-li¹, WANG Wei¹, ZHANG Bai-jun¹, XU Guo-yang¹, CHEN Wei-xi¹, YE Xiao-ling², ZHANG Jing-yuan¹, WANG Xiao-jie¹ and ZHU Hong-liang¹

(1 National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Laboratory of Semiconductor Materials Sciences, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The high quality 75.5nm wide wavelength range InGaAsP MQW, which is grown on SiO₂ masked InP substrate by low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy (LP-MOVPE) is reported. By changing the growth temperature and growth pressure, peaks of MQW PL spectra vary from 1546nm to 1621nm. MQWs grown at different temperatures have the similar PL intensity and FWHM. A single ridge waveguide electroabsorption modulated DFB laser (DFB EML) is also fabricated with high quality MQW materials.

Key words: selective area growth; LP-MOCVD; InGaAsP; MQW; EML

EEACC: 0510D; 2520D; 2530C; 4270

Article ID: 0253-4177(2001)05-0609-04

* Project Supported by National High Technology Research and Development (863) Program (No. 863-307-11-1(15)) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69896260).