

金属有机化学气相外延生长 1310 nm 偏振无关混合应变量子阱半导体光放大器研究^{*}

马 宏¹⁾²⁾ 朱光喜²⁾ 陈四海¹⁾ 易新建¹⁾

¹⁾ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

²⁾ 华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

(2003 年 12 月 16 日收到; 2004 年 3 月 8 日收到修改稿)

采用低压金属有机化学气相外延设备进行了 1.3 μm 压应变量子阱材料、张应变量子阱材料和混合应变量子阱材料的生长研究. 通过 X 射线双晶衍射和光致发光谱对生长材料进行测试和分析. 基于四个压应变量子阱和三个张应变量子阱交替生长的混合应变量子阱(4CW3TW)结构有源区, 并采用 7°斜腔脊型波导结构以有效抑制腔面反射. 经蒸镀减反膜后, 半导体光放大器光纤-光纤小信号增益达 21.5 dB, 在 1280—1340 nm 波长范围内偏振灵敏度小于 0.6 dB.

关键词: 偏振无关, 应变量子阱, 半导体光放大器, 减反膜

PACC: 4280S, 6855, 7280E

1. 引 言

行波半导体光放大器(TW-SOA)在光网络中具有广泛的应用前景, 可以作为发射机的后置放大、接收机前置放大、线路放大等; 基于半导体光放大器(SOA)形成光开关矩阵、波长转换器、光上下话路复用等器件和子系统^[1-4]. 高增益、高饱和输出功率、偏振无关性是光网络对 SOA 提出的基本要求, 为提高 SOA 的性能并增加其与其他光电子器件集成的灵活性, 偏振相关性是亟待解决的问题之一. 半导体能带工程的发展使得偏振无关的增益可以通过采用应变量子阱结构来实现. 实现偏振无关 SOA 的方法有很多种^[5-8], 如张应变量子阱结构、应变补偿结构、同时采用张应变量子阱和压应变量子阱的混合应变量子阱结构等. 对于 1310 nm SOA, 采用混合应变量子阱结构的有源区是实现偏振无关的主要手段. 金属有机化学气相外延(MOVPE)是量子阱、超晶格等超薄层半导体材料生长的主要手段, MOVPE 具有大面积均匀生长制造的能力^[9], 适合大批量生产, 并可在光子集成和光电子集成中发挥重要作用. 对于 MOVPE 材料生长而言, 较容易生长出高质量的压应变量子阱材料, 而对于张应变量子阱材料, 尤

其是大张应变量的材料生长仍然是一个难点. 本文主要集中在张应变量子阱结构材料的生长研究上. 在分别获得高质量的压应变和张应变量子阱材料后, 进行混合应变量子阱材料的生长研究.

2. MOVPE 材料生长

材料生长用的设备是 EMCORE 公司生产的 D-180 型低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)设备, 具有实时温度监控装置, 生长时载有衬底片的托盘在反应腔内以 900 r/min 高速旋转以保证材料生长的大面积均匀性. 生长用的 III 族源为三甲基镓(TMIn)和三甲基镓(TMGa), V 族源为砷烷(AsH₃)和磷烷(PH₃), 载气为经钽管扩散后的氢气.

为了获得高质量的应变量子阱结构, 首先必须摸索出一套优化的 MOVPE 材料生长参数, 如 V 族元素和 III 族元素的摩尔比(C_V/C_{III}), 生长温度、反应腔压力、生长速率以及各种源的流量等. 实验中采用的基本生长参数为: 反应腔压力 9.33×10^3 Pa, 生长温度 630°C, $C_V/C_{III} > 300$. 在分别获得高质量的压应变和张应变量子阱材料后, 进行混合应变量子阱材料的生长研究. 实验中共进行了 6 个样片的生

^{*} 中国博士后科学基金资助的课题.

长研究,分别记为样片 1# 2# 3# 4# 5# 6# 6 个样片的具体结构如表 1 所示. 阱层和垒层均采用 InGaAsP 四元材料, 垒层均为波长 $1.15 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 匹配材料, 量子阱结构上下各有 $0.1 \mu\text{m}$ 厚的 $1.15 \mu\text{m}$ InGaAsP 匹配波导层, 在下波导层下方都生长了 $1.0 \mu\text{m}$ 厚的 n-InP 缓冲层, 上波导层的上方生长了 $0.2 \mu\text{m}$ 厚的 p-InP 的帽层. 6# 样片为混合应变量子阱结构, 它是由不同类型的量子阱交替生长形成的, 即: 压应变量子阱(CW)-匹配垒层-张应变量子阱(TW)-匹配垒层-压应变量子阱(CW).....

表 1 应变量子阱材料结构

样片号	结构	阱 层		垒 层	
		阱厚/ nm, 应变量/%	阱厚/ nm, 应变量/%	垒厚/ nm, 应变量/%	垒厚/ nm, 应变量/%
1#	4CW	5—6	1.05	12	0
2#	3TW	10—11	-0.45	12	0
3#	3TW	10—11	-0.70	12	0
4#	3TW	10—11	-1.0	12	0
5#	3TW	10—11	-1.35	12	0
6#	4CW3TW	CW 6,	1.05	12	0
		TW 10—11,	-1.0		

3. 材料测试与分析

在生长完样片之后, 对它们分别进行了 x 射线双晶衍射和光致发光(PL)测试, 所用的测试设备分别为 Philip 公司生产的 RD-100 x 射线双晶衍射分析仪和 PLM-100 型光致发光测试设备.

分别测试各个样片的 PL 谱. 测试都是在室温 (25°C) 下进行的, 所用设备的抽运光源为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 YAG 激光器, 探头为 InGaAs 探测器.

图 1—图 3 为测得的 1#—6# 样片的 PL 谱. 在压应变量子阱材料中, 重空穴(hh)被提升至价带顶并与轻空穴(lh)充分分离, 因此基本上只存在电子到重空穴的跃迁($e-hh$), 发射 TE 模式的光子, 如图 1 中 1# 样片曲线所示, 只有一个峰存在. 图 1 中 2# 样片曲线中, 也只存在一个波长峰值, 这是因为张应变量子阱虽也可以造成轻、重空穴分离并将轻空穴提升至价带顶, 由于 2# 样片中引入的张应变较小, 轻、重空穴距离较近, 未有效分离, 因此虽同时存在电子到轻、重空穴的跃迁, 但是波长相近, 在图中不易分辨. 与 1# 样片曲线比较, 其半高全宽(FWHM)明显增大, 这是两种跃迁光谱叠加所造成的结果. 由于 3# 和 4# 样片中引入了较大的张应变

量, 轻、重空穴能够有效分离, 所以在 PL 谱中出现两个峰值波长, 如图 2 中 3# 样片曲线和 4# 样片曲线所示. 但由于 3# 样片中所引入的张应变仍较小, 轻、重空穴虽有效分离但距离还不够大, 所以 3# 样片中电子到重空穴的跃迁($e-hh$)强度仍大于电子到轻空穴的跃迁($e-lh$)强度. 我们知道, 电子与轻空穴的复合产生 TM 偏振模式的光子, 与重空穴的复合产生 TE 偏振模式的光子, 因此在这种情况下仍然无法实现 TE, TM 模式增益的平衡. 4# 样片中由于引入了很大的张应变(-1.0%), 造成轻、重空穴足够的分裂距离, 电子到轻空穴的跃迁强度大于电子到重空穴的跃迁强度. 5# 样片中因引入的张应变太大, 可能已经超过临界厚度, 很难生长出高质量的外延材料, 材料中存在很多失配位错. PL 谱反映, 虽然轻重空穴分离足够, 但 PL 强度很弱, 同时形貌观察结果也很差, 如图 2 中 5# 样片曲线所示. 6# 样片是混合应变量子阱结构材料, 同时含有压应变和张应变量子阱. 因此, 在这种结构材料中同时存在三种跃迁: 压应变量子阱中电子到重空穴的跃迁、张应变量子阱中较强的电子到轻空穴的跃迁和较弱的电子到重空穴的跃迁, 三种跃迁产生的 PL 谱互相叠加反映在图 3 的 6# 样片曲线中. 如果 PL 波长相近, 在 PL 曲线中则很难分辨. 如果较合理地组合两种应变量子阱的阱宽、应变等参数, 就可以方便地实现 TE, TM 模式增益的平衡, 为实现偏振无关 SOA 打下良好的材料基础.

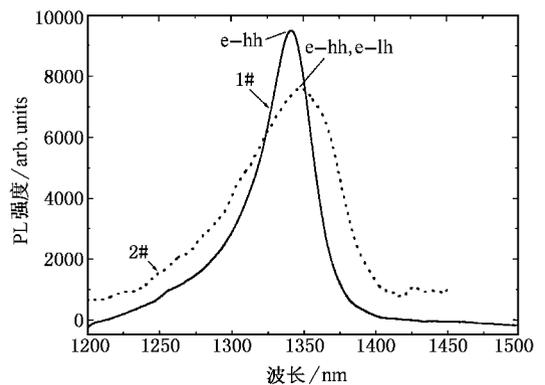


图 1 1# 和 2# 样片的室温 PL 谱

一般而言, 通过测得的 x 射线双晶衍射曲线, 可以用来分析应变量子阱的结构, 根据衍射卫星峰的角度间距可以计算出量子阱结构的周期, 通过确定零级峰的位置, 可以计算出量子阱结构的平均应变, 进而可以推算出阱层的应变. 假设压应变量子阱、

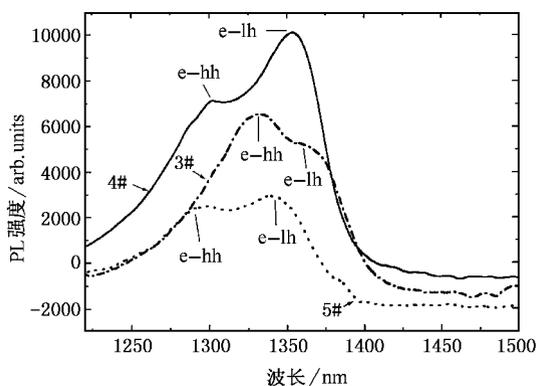


图2 3# 4#和5#样片的室温 PL 谱

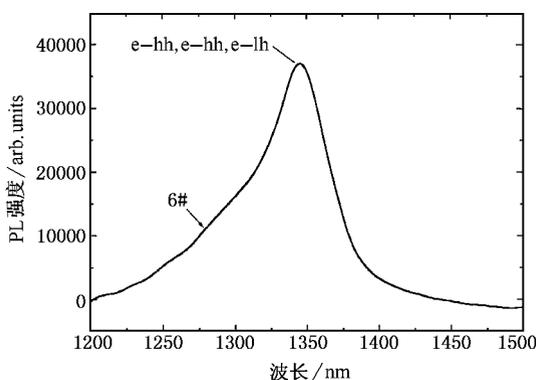


图3 6# 样片(4CW3TW 结构)的室温 PL 谱

张应变量子阱、垒层的宽度和应变量分别为 w_c , w_l , w_b , ϵ_c , ϵ_l 和 ϵ_b , 对于单纯的压应变量子阱或张应变量子阱结构, 衍射卫星峰角间距对应的周期包括一个压应变阱或张应变阱和一个垒层, 其周期 $\Lambda = w_c + w_b$ 或 $w_l + w_b$, 零级峰对应的平均应变量为 $\epsilon_{ave} = (w_c \epsilon_c + w_b \epsilon_b) / \Lambda$ 或 $\epsilon_{ave} = (w_l \epsilon_l + w_b \epsilon_b) / \Lambda$. 而对于混合应变量子阱结构, 衍射卫星峰的角间距对应的周期 $\Lambda = w_c + w_b + 2w_b$, 零级峰对应的平均应变量为 $\epsilon_{ave} = (w_c \epsilon_c + w_b \epsilon_b + 2w_b \epsilon_b) / \Lambda$. 对1#、4#和6# 样片分别进行了 x 射线双晶衍射测试并得到了各自的衍射曲线. 图4为6# 样片的 x 射线双晶衍射实验曲线, 压应变区与张应变区的卫星峰都很强(张应变主要影响衬底峰右侧的卫星峰, 压应变主要影响衬底峰左侧的卫星峰), 卫星峰级数很多, 强度较大, FWHM 很窄, 说明得到了高质量的混合应变量子阱结构材料. 根据上述计算方法可以算出, 混合应变量子阱的周期为 40.5 nm, 压应变量子阱宽为 6 nm, 应变量为 1.02%, 张应变量子阱宽为 10.5 nm, 应变量为 -0.98%. 这些计算结果都是基于 12 nm

宽匹配垒而得到的, 与设计基本相符.

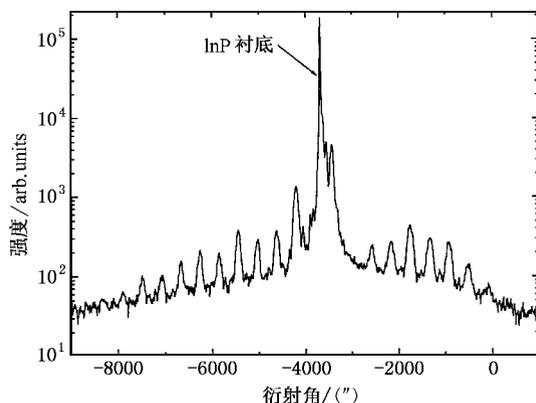


图4 6# 样片的 x 射线双晶衍射实验曲线

在得到高质量的量子阱结构材料, 即 SOA 有源区结构材料后, 就可以进行 SOA 的全结构材料的生长研究. 当然, 对于应变量子阱微结构材料特性的表征是十分复杂和困难的, x 射线双晶衍射和 PL 测试可以从一定程度上反映材料的某些基本特性, 但是对于材料质量和特性最终的判断还必须依靠器件结果来证实.

4. 器件测试结果

基于 4CW3TW 混合应变量子阱有源区结构进行 MOVPE 全结构材料生长, 而后采用标准的光刻、反应离子刻蚀、湿法腐蚀、蒸发、溅射等工艺制作脊型波导结构, 脊宽按 2.8—3.0 μm 制作, 腔长采用 725 μm . 对于行波 SOA 而言, 其腔面剩余反射率越低越好, 腔面剩余反射率对放大器的带宽、增益波动等性能指标有重要影响. 因此, 如何降低腔面剩余反射率是制作高性能半导体行波放大器的一项重要课题. 我们对制作的 SOA 采用斜腔结构以有效抑制腔面反射率, 选取的角度为 7° , 如果角度太大, 将影响放大器的外量子效率且给耦合带来极大的难度; 蒸镀 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 减反膜以进一步降低腔面剩余反射率至 3×10^{-4} 以下; 解理、装管后进行耦合封装, 采用透镜光纤双端耦合形式得到完整的 SOA 器件, 测试其增益谱. 图5为 200 mA 下 SOA 在 1.3 μm 波长窗口范围内的偏振解析小信号增益谱. 从图5可以看到, 在整个 1.3 μm 波长窗口范围内, TE 和 TM 模式的增益差小于 0.6 dB, 说明已经成功制作出偏振无关 SOA. 在测试增益谱时, 使用可调激光器使之输出从 1280 到 1340 nm 不同波长的信号光, 并且将入射

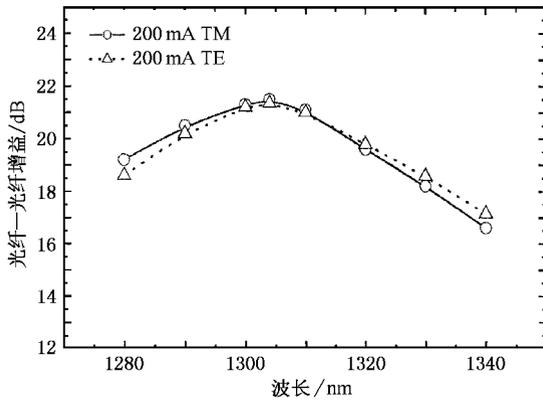


图 5 200 mA 电流下 SOA 的偏振解析增益谱

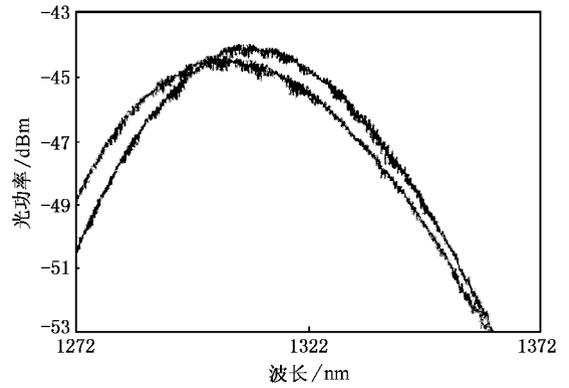


图 6 200 mA 电流下 SOA 的偏振解析 ASE 谱

光功率均设定为 -25 dBm, 然后测试得出每一个波长所对应的增益. 图 5 曲线显示, 峰值增益波长约为 1305 nm, 峰值增益为 21.5 dB, 考虑到透镜光纤每端约 3.5 — 4.0 dB 的耦合损耗, 可知 SOA 管芯增益已近 30 dB, 增益谱 3 dB 带宽大于 50 nm. 图 6 为 200 mA 电流下 SOA 的偏振解析的放大的自发辐射 (ASE) 谱 (光谱仪分辨率为 0.05 nm). 图 6 显示, ASE 谱波动 (ripple) 小于 0.3 dB, 3 dB 带宽约为 52 nm, 与增益谱相当.

5. 结 论

通过 LP-MOVPE 材料生长技术成功生长了压应变、张应变和混合应变多量子阱结构材料. 经一系列管芯制作和器件腔面减反膜工艺研究成功地制作了 1310 nm 脊型波导结构斜腔混合应变量子阱偏振无关 SOA. 在 1280 — 1340 nm 波长范围内, 偏振灵敏度小于 0.6 dB, 光纤—光纤小信号峰值增益达 21.5 dB.

- [1] Diez S, Ludwig R, Weber H G 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 60
- [2] Geraghty D F, Lee R B, Vahala K J *et al* 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 452
- [3] Zhang X L, Sun J Q, Liu D M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 746 (in Chinese) [张新亮, 孙军强, 刘德明等 2000 物理学报 **49** 746]
- [4] Zhang X L, Huang D X, Sun J Q *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 124

- [5] Joma M, Horikawa H, Xu C Q *et al* 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 121
- [6] Ougazzaden A, Sigogne D, Mircea A *et al* 1995 *Electron. Lett.* **31** 1242
- [7] Mathur A, Dapkus P D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2845
- [8] Koonath P, Kim S, Cho W *et al* 2002 *IEEE J. Quant. Electron.* **38** 1282
- [9] Loduwise M J 1985 *J. Appl. Phys.* **R 58** 31

MOVPE growth of 1310 nm polarization-insensitive strained quantum-well semiconductor optical amplifiers *

Ma Hong^{1,2)} Zhu Guang-Xi²⁾ Chen Si-Hai¹⁾ Yi Xin-Jian¹⁾

¹⁾(Department of Optoelectronics Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)

²⁾(Department of Electronics and Information Engineering ,

Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)

(Received 16 December 2003 ; revised manuscript received 8 March 2004)

Abstract

The compressively-strained quantum wells , tensile-strained quantum wells and the combination of tensile-strained and compressively-strained quantum wells were grown by metal-organic vapor phase epitaxy , the materials properties were measured by photoluminescence spectra and x-ray double-crystal diffraction. A polarization-insensitive multiple-quantum-well optical amplifier for 1310 nm wavelength employing both compressively-strained wells and tensile-strained wells in active region is reported. The amplifier was fabricated to ridge waveguide structure with 7° tilted cavity , the two facets were coated with anti-reflection thin films. The amplifier exhibited an excellent polarization insensitivity (less than 0.6 dB) over the entire range of wavelength (1.28 – 1.34 μm) and a fiber to fiber gain of 21.5 dB at bias current of 200 mA.

Keywords : polarization-insensitive , strained quantum-well , semiconductor optical amplifier , anti-reflection coating

PACC : 4280S , 6855 , 7280E

* Project supported by the Science Foundation for Postdoctor of China.