

文章编号: 0258-7025(2004)08-0971-04

1.3 μm 高增益偏振无关应变量子阱 半导体光放大器

马 宏¹, 易新建², 陈四海¹

(华中科技大学¹ 光电子工程系,² 激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用低压金属有机化学气相外延法(LP-MOVPE)生长并制作了 1.3 μm 脊型波导结构偏振无关半导体光放大器(SOA),有源区为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(4C3T)结构,压应变阱宽为 6 nm,应变量为 1.0%,张应变阱宽为 11 nm,应变量为 -0.95%;器件制作成 7°斜腔结构以有效抑制腔面反射。半导体光放大器腔面蒸镀 $\text{Ti}_3\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 减反(AR)膜以进一步降低腔面剩余反射率至 3×10^{-4} 以下;在 200 mA 驱动电流下,光放大器放大的自发辐射(ASE)谱的 3 dB 带宽大于 50 nm,光谱波动小于 0.4 dB,半导体光放大器管芯的小信号增益近 30 dB,在 1280~1340 nm 波长范围内偏振灵敏度小于 0.6 dB,饱和输出功率大于 10 dBm,噪声指数(NF)为 7.5 dB。

关键词 激光技术;偏振无关;半导体光放大器;应变量子阱;金属有机化学气相外延法

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

1.3 μm High-Gain Polarization-Insensitive Strained Quantum-Well Semiconductor Optical Amplifier

MA Hong¹, YI Xin-jian², CHEN Si-hai¹

(¹Department of Optoelectronic Engineering, ²State Key Laboratory for Laser Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A polarization-insensitive multiple-quantum-well optical amplifier for 1.3 μm wavelength employing both four compressively-strained wells (1.0% strain, 6 nm well width) and three tensile-strained wells (-0.95% strain, 11 nm well width) in active region was grown by low pressure metalorganic vapor phase epitaxy (LP-MOVPE). The amplifier was fabricated forming ridge waveguide structure with 7° tilted cavity. The two facets were coated with two layers $\text{Ti}_3\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ anti-reflection (AR) thin films, residual facet reflectivity was found to be less than 3×10^{-4} . The 3-dB bandwidth of the amplified spontaneous emission (ASE) spectra was above 50 nm and the amplitude of the optical power ripple was bellow 0.4 dB. The amplifier exhibited an excellent polarization insensitivity (less than 0.6 dB) over the entire range of wavelength (1.28~1.34 μm). A small signal gain of 30 dB and a saturated output power of more than 10 dBm at bias current of 200 mA and 1305 nm wavelength were obtained. The noise figure of the amplifier was 7.5 dB.

Key words laser technique; polarization-insensitive; semiconductor optical amplifier; strained quantum-well; metalorganic vapor phase epitaxy

1 引 言

半导体光放大器(SOA)在光信息处理、光通信

网络、生物医学光子学、光传感等领域具有广泛的应用前景,尤其在光纤通信系统中,半导体光放大器将起到越来越重要的作用^[1,2]。随着以互联网为代表

收稿日期:2003-04-08;收到修改稿日期:2003-06-27

作者简介:马 宏(1971—),男,华中科技大学光电子工程系博士研究生,主要从事半导体集成光电子材料与器件的研究。

E-mail:mahong99@yahoo.com

的现代信息技术的飞速发展,对以光纤通信为主要骨架的现代通信网络的速率、容量提出了更高的要求。为解决传输的高速率问题,全光网络是一个有效的解决途径,而光放大器是全光网络中的关键器件;在光传输系统中,可以作为前置放大、后置放大、线路放大;在光网络中,可以作为光开关、波长转换器、全光 3R 再生设备、信号放大的关键元件^[3~8]。高增益、高饱和输出功率、偏振无关性是光网络对半导体光放大器提出的基本要求,为提高半导体光放大器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,同时也改善了半导体光放大器的其他性能。目前,实现偏振无关半导体光放大器的方法有很多种^[9~12],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。本文器件将采用混合应变量子阱结构,在这种结构中,TE 模的增益主要由压应变量子阱提供,TM 模的增益主要由张应变量子阱提供,两种偏振的增益来源相对独立,可以分别设计张应变量子阱和压应变量子阱的材料参数,优化设计参数的自由度大。

2 应变量子阱光放大器的结构与制作

应变量子阱光放大器采用脊型波导结构,该结构工艺过程相对简单,制作成品率较高,而且外延工艺一次完成。材料生长采用低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)技术^[13],生长的光放大器基本结构如图 1 所示。

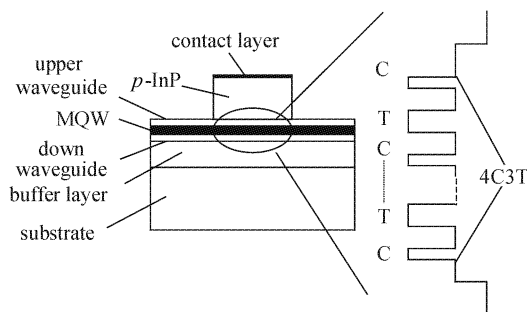


图 1 1.3 μm 偏振无关半导体光放大器结构示意图
Fig. 1 Schematic of the 1.3 μm polarization-insensitive optical amplifier structure

有源区采用 4C3T 混合应变量子阱结构,即 4 个压应变量子阱,3 个张应变量子阱,压应变和张应

变量子阱之间用与 InP 晶格匹配的 12 nm 宽的 InGaAsP 垒层隔开;压应变阱宽为 6 nm,应变量为 1.0% 的 InGaAsP;张应变阱宽 11 nm,应变量为 0.95% 的 InGaAsP;上下波导层分别为 0.1 μm , 0.15 μm 厚的波长为 1.15 μm 的 InGaAsP 匹配材料;包层为 1.5~1.7 μm 厚的 *p* 型 InP,接触层为 0.3 μm 的重 *p* 型掺杂 InGaAs 材料,材料的 MOVPE 生长过程中,*n* 型掺杂源为硅烷(SiH_4),*p* 型掺杂源为二甲基锌(DMZn);材料生长完成后,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 。

对于行波半导体光放大器而言,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。对制作的半导体光放大器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 $\text{Ti}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 减反(AR)膜以进一步降低腔面剩余反射率至 3×10^{-4} 以下。

3 半导体光放大器的测试结果与分析

在镀膜前,放大器管芯将以激光器的形式工作,主要测试管芯的偏振相关光功率和驱动电流。测试时,使管芯发射出来的光经一准直透镜变换为平行光,然后用偏振片选取 TE 或 TM 模,接入光功率计。测试在常温(25 $^\circ\text{C}$)下进行,图 2 为测试所得的 *P-I* 曲线。

从图 2 可以看到,镀膜前的放大器可以在两种偏振模式下工作,可以同时发射出两种模式的偏振

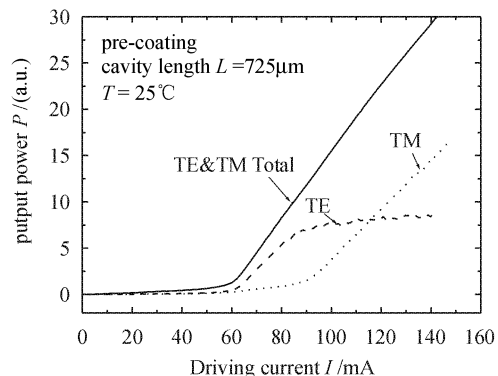


图 2 偏振相关 *P-I* 曲线
Fig. 2 Polarization-resolved *P-I* curve

光;同时还可清楚地看出,TE 和 TM 模式的阈值电流不同,TE 模的阈值电流大约在 60 mA 左右,而 TM 模的阈值电流则接近 90 mA;并且,当 TM 模开始激射时,可以看到 TE 模的功率开始出现饱和现象而偏离线性,这说明 TM 模的激射对 TE 模存在抑制作用;对于总的 $P-I$ 曲线,可以看到,其阈值电流与 TE 模的阈值电流相等,而且基本呈现线性变化。另外,该管芯激射阈值电流偏大,这与管芯采用斜腔结构有关,通常直腔器件未镀膜的理解面反射率在 30% 左右,而 7°斜腔的腔面剩余反射率只有 0.03~0.05 左右,大大降低了管芯端面的谐振效应,增大了激射阈值。

蒸镀减反膜后,测试器件在 100 mA,150 mA,200 mA,250 mA 下的自发辐射谱,设定工作温度为 25℃,管芯在 250 mA 电流下仍处于未激射状态,表明减反膜和斜腔结构有效抑制了芯片的激射。图 3 为 200 mA 电流下的偏振解析自发辐射谱,将此结果和镀膜前进行比较,从图 2 的镀膜前的 $P-I$ 曲线中,可以看出 TE 模的阈值电流比 TM 模式小很多,这是因为镀膜前自然解理面对 TE 模式的反射率比 TM 模式高,加之压应变量子阱中的透明载流子浓度比张应变量子阱中低;但从图 2 中并不能直观地看出镀膜后是否偏振无关,而从图 3 中可以看到,TE 和 TM 两种偏振模式的自发辐射光功率相差极小,在整个光谱范围内都小于 0.6 dBm,可以认为偏振无关。因为半导体光放大器的增益 3 dB 带宽近似等于自发辐射谱的谱宽,所以,从图 3 中还可以看出增益带宽约为 52 nm;另外自发辐射谱显示谱线波动小于 0.4 dB,从而可推断增益谱的波动基本上也会在此范围内。

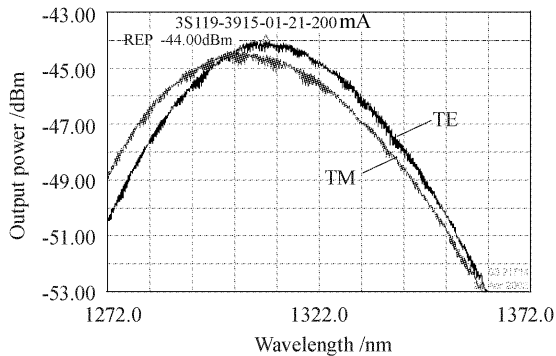


图 3 200 mA 电流下放大器的偏振解析自发辐射谱
Fig. 3 Polarization-resolved ASE spectra at 200 mA

图 4 为室温下光纤到光纤的增益和驱动电流的关系曲线,采用 1310 nm 的激光作为输入信号,信

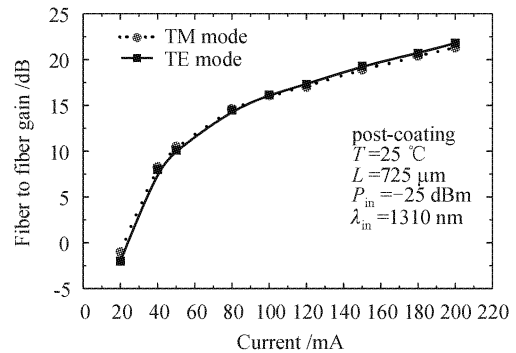


图 4 半导体光放大器增益与电流的关系曲线
Fig. 4 SOA gain characteristics versus current

号光功率为 -25 dBm;曲线反映,从 50 mA 到 200 mA 范围内,TE 模和 TM 模的增益差都小于 0.5 dB;其 200 mA 时的增益约为 21.5 dB,由于器件两端光纤和管芯之间存在耦合损耗,一般地,透镜光纤与半导体光放大器管芯之间的耦合损耗大致为每端 -3.5 dB 到 -5 dB,具体数值视光纤透镜的参数和耦合工艺水平而定。对于该放大器样品,经测试,每端的耦合损耗大约为 -4 dB 左右,由此推断,放大器管芯增益已经接近 30 dB。图 5 为 150 mA 和 200 mA 下半导体光放大器在 1.3 μm 波长窗口范围内的偏振解析小信号增益谱,从图中可以看到,无论是在 150 mA 还是在 200 mA 电流下,在整个 1.3 μm 波长窗口范围内,TE 和 TM 模的增益差小于 0.6 dB,该曲线直接说明我们已经成功制作出偏振无关半导体光放大器,在测试增益谱时,使用可调激光器使之输出从 1280 nm 到 1340 nm 不同波长的信号光,并且将入射光功率均设定为 -25 dBm,然后测试得出每一个波长所对应的增益;图中曲线显示,峰值增益波长约为 1305 nm,增益谱 3 dB 带宽大于 50 nm,与自发辐射谱宽基本相符。

在光放大器中,信号增益是输入信号光功率的函数,在高输入光功率情况下,由于增益饱和效应会使增益降低,因此输出功率会受此饱和效应的限制,在需要高功率工作的情况下,如作为后置功率放大器、多信道放大器时,信号的增益饱和特性就十分重要。对于半导体光放大器,总是希望有尽可能高的饱和输出功率,在讨论增益饱和时,考虑入射光的波长与峰值增益对应的波长一致;在测试时也遵循这一原则,选取入射信号光波长为 1305 nm,分别在驱动电流为 150 mA 和 200 mA 时,不断变化入射光功率值,测出输出信号增益与输出功率之间的关系曲线,如图 6 所示。通常,饱和输出功率 P_{sat} 定义为

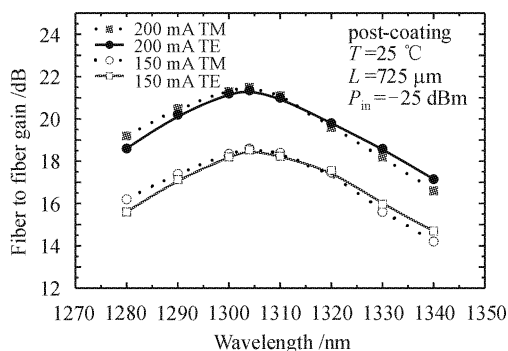


图5 不同电流下光放大器的偏振解析增益谱
Fig. 5 SOA gain spectra (TE & TM polarization) at two bias levels

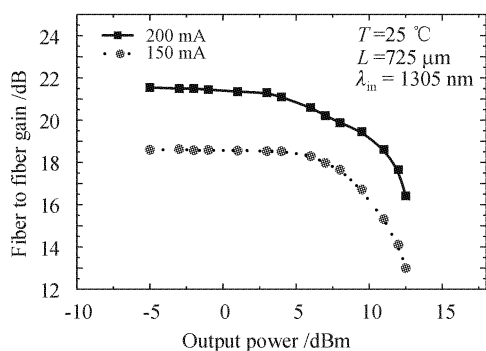


图6 不同电流下光放大器增益与输出功率的关系曲线
Fig. 6 SOA fiber to fiber gain as a function of output power at $I = 200$ mA, 150 mA and $\lambda = 1305$ nm

信号增益从它的饱和值下降 3 dB 时所对应的光放大器的输出功率。从图中可以看出,该样品的饱和输出功率在 10~11 dBm 之间;噪声指数(NF)是评价光放大器好坏的主要指标之一,经测试,该光放大器样品的噪声指数为 7.5 dB。

4 结 论

通过 LP-MOVPE 材料生长工艺和光刻、刻蚀等管芯制作工艺成功地制作了 $1.3 \mu\text{m}$ 脊型波导结构斜腔混合应变量子阱偏振无关半导体光放大器,在 1280~1340 nm 波长范围内,偏振灵敏度小于 0.6 dB,峰值增益近 30 dB,并且得到了大于 10 dBm 的饱和输出功率。

参 考 文 献

1 Hong Wei, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Numerical simulation of picosecond gain and index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers (SOAs) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):775~778

洪伟,黄德修,孙军强等. 半导体光放大器(SOA)皮秒增益和折射率非线性的数值模拟[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9):775~778

2 Wang Zhuoran, Yu Jinhong, Han Jinting *et al.*. Influences of injection current and the position offset of SOA on switching window of TOAD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):205~209

王卓然,于晋龙,韩金婷等. SOA 注入电流及位置偏移量对 TOAD 开关窗口的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):205~209

3 S. Kitamura, H. Hatakeyama, K. Hamamoto *et al.*. Spot-size converter integrated semiconductor optical amplifiers for optical gate applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(7):1067~1074

4 J. P. R. Lacey, S. J. Madden, M. A. Summerfield. Four-channel polarization-insensitive optically-transparent wavelength converter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10):1355~1357

5 G. Jeong, J. W. Goodman. Gain optimization in switches based on semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4):598~605

6 Hong Wei, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Numerical simulation of picosecond gain and index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers under repeated pulse injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):459~464

洪伟,黄德修,孙军强等. 重复脉冲注入下半导体光放大器皮秒增益和折射率非线性的数值模拟[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):459~464

7 Zhang Xinliang, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Noise characteristics of XGM wavelength conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10):1256~1259

张新亮,黄德修,孙军强等. 交叉增益调制型波长转换器噪声特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10):1256~1259

8 Zhao Yongpeng, Ye Peida. Switching characteristic of semiconductor optical amplifier based demultiplexer with symmetric Mach-Zehnder interferometer configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):99~106

赵永鹏,叶培大. 对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪解复用器的开关特性分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):99~106

9 M. Joma, H. Horikawa, C. Q. Xu *et al.*. Polarization insensitive semiconductor laser amplifiers with tensile strained InGaAsP/InGaAsP multiple quantum well structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(2):121~122

10 A. Ougazzaden, D. Sigogne, A. Mircea *et al.*. Atmospheric pressure MOVPE growth of high performance polarisation insensitive strain compensated MQW InGaAsP/InGaAs optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(15):1242~1244

11 A. Mathur, P. D. Dapkus. Polarization insensitive strained quantum well gain medium for lasers and optical amplifiers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(24):2845~2847

12 P. Koonath, S. Kim, W. Cho *et al.*. Polarization-insensitive quantum-well semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1282~1290

13 Ma Hong, Yi Xinjiang, Jin Jinyan *et al.*. Study on MOVPE growth of $1.3 \mu\text{m}$ uncooled AlGaInAs/InP strain-compensated quantum well lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):193~196

马宏,易新建,金锦炎等. MOVPE 生长 $1.3 \mu\text{m}$ 无致冷 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3):193~196