

1.55 μm AlGaInAs-InP 偏振无关半导体光放大器及其温度特性研究

马 宏^{1,2)} 陈四海¹⁾ 金锦炎³⁾ 易新建¹⁾ 朱光喜²⁾

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)

³⁾ 武汉大学物理系, 武汉 430072)

(2003 年 12 月 16 日收到, 2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

采用低压金属有机气相外延(LP-MOCVD)设备生长并制作了 1.55 μm AlGaInAs-InP 偏振无关半导体光放大器, 有源区为 3 周期的张应变量子阱结构, 应变量为 -0.35%, 器件制作成脊型波导结构, 并采用 7° 斜腔结构以有效抑制腔面反射, 经蒸镀减反膜后, 半导体光放大器的自发辐射功率的波动小于 0.3 dB, 3 dB 带宽为 50 nm, 半导体光放大器小信号增益近 20 dB, 带宽亦为 50 nm. 在 1530—1580 nm 波长范围内偏振灵敏度小于 0.5 dB, 峰值增益波长的饱和输出功率达 7 dBm, 器件增益随温度的升高而减小, 当器件工作温度从 25°C 升高至 65°C 时, 增益降低小于 3 dB.

关键词: 半导体技术, MOCVD, 偏振无关, AlGaInAs-InP, 应变量子阱, 半导体光放大器, 增益

PACC: 4280S, 6855, 7280E, 7865K

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形成光开关矩阵、波长转换器、光上下话路复用(OADM)等器件和子系统^[1-4]; 并可与其他光电子器件实现集成形成许多光子集成(PIC)和光电子集成(OEIC)器件^[5-6]. 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(SOA)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, 实现偏振无关半导体光放大器的方法有很多种^[7-10], 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. 绝大多数半导体激光器和放大器都是温度敏感器件, 在半导体光放大器的实际应用中, 尤其是其集成应用中, 良好的温度特性具有极其重要的意义, AlGaInAs-InP 是制作无致冷半导体激光器的理想材

料. 较传统 InGaAsP-InP 材料, AlGaInAs-InP 半导体激光器件由于具有更好的导带电子限制, 从而具有更好的温度特性, SOA 的载流子浓度更高, 更需要强的电子限制, 因此 AlGaInAs-InP 也可望获得高温下的高增益. 本文设计并制作了 AlGaInAs-InP 材料系偏振无关半导体光放大器, 并对其增益特性、偏振特性和温度特性进行测试分析.

2. 设计考虑

在量子阱结构中, 载流子主要是导带电子会穿越势垒层而泄漏到有源区之外, 电子穿越势垒层泄漏出去的概率与量子阱导带的势垒高度有关. 一般地, 势垒高度越大, 载流子泄漏出去的概率越小, 因此提高导带的势垒高度能够有效减小电子的泄漏, 改善半导体激光器件的温度特性. 因此, 为了减小电子的泄漏, 需要增加电子的限制势能. 对于 AlGaInAs 材料, 不同的 $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 所组成的半导体异质结的导带不连续 $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$; 而 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 组成的半导体异质结的导带不连续 $\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$. 可见, AlGaInAs 能更有效地阻止电子穿越势垒层泄

[†] E-mail: mahong99@yahoo.com; 电话: 027-8754208(X), 027-8754589(O, H).

漏,改善器件的高温特性.同时应变效应改善了量子阱的价带结构,减少了俄歇复合和价带间吸收,提高透明载流子浓度和量子效率,进一步改善器件温度特性.

此外,AlGaInAs材料的另一优点是,与InGaAsP材料相比,同样带隙的AlGaInAs材料的折射率比InGaAsP材料的折射率大,使半导体激光器件不但具有大的电子限制,而且具有更大的光限制.正是由于AlGaInAs材料的上述特点,使其非常适合作为高温无致冷半导体激光器的材料^[11-13].采用应变量子阱结构,必须同时考虑最佳应变形式和应变量.1.55 μm 偏振无关半导体光放大器的有源区结构主要有以下几种:体材料、多量子垒和张应变量子阱结构.考虑到器件特性及工艺实现难度等因素,采用优化的张应变量子阱结构可以方便地实现横磁场/横电场(TM/TE)两种偏振模式的增益平衡^[14].

3. 器件结构与制作

图1为1.55 μm AlGaInAs-InP应变量子阱偏振无关半导体光放大器的结构示意图,器件采用脊型波导结构,有源区为三周期的张应变量子阱结构.经计算得到:阱宽10nm,应变量为-0.35%的量子阱第一导带电子子带到价带轻/重空穴子带的跃迁波长仅差10nm,且轻空穴子带在重空穴之上,这样保证了SOA在高工作电流下, TM/TE模式具有相同的峰值增益波长.量子阱之间用厚度为14nm、波长为1.28 μm 的AlGaInAs匹配垒隔开,采用目前广泛使用的分别限制异质结结构(SCH),上下波导层均为波长为1.28 μm 的AlGaInAs匹配材料,厚度分别为0.1 μm 和0.15 μm ;另外,由于AlGaInAs材料极易被氧化,因此,在上波导层上方InP包层中加入20nm厚的四元InGaAsP材料作为腐蚀停止层;然后依次为1.5 μm 厚P-InP包层和重p型掺杂三元InGaAs材料作为接触层.

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沉积设备(LP-MOCVD),具有Realttemp实时温度监控装置和独特的TurboDisc技术,生长时载有衬底片的托盘在反应腔内以900r/min高速旋转以保证材料生长的大面积均匀性.生长用的III族源为三甲基铟(TMIn)、三甲基镓(TMGa)和三甲基铝(TMAI),V族源为砷烷(AsH₃)和磷烷(PH₃),载气为经钯管扩散后的氢气.

P ⁺ -InGaAs	接触层	0.3 μm
p-InP	包层	1.5 μm
p-InGaAsP $\lambda = 1.24\mu\text{m}$	腐蚀停止层	20 μm
p-InP	包层	0.10 μm
p-AlGaInAs $\lambda = 1.28\mu\text{m}$	上波导层	0.1 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.6\mu\text{m}$ $\epsilon = -0.35\%$	量子阱	10 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.28\mu\text{m}$	匹配垒层	14 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.6\mu\text{m}$ $\epsilon = -0.35\%$	量子阱	10 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.28\mu\text{m}$	匹配垒层	14 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.6\mu\text{m}$ $\epsilon = -0.35\%$	量子阱	10 μm
AlGaInAs $\lambda = 1.28\mu\text{m}$	下波导层	0.15 μm
p-InP	缓冲层	1.0 μm
p-In衬底		

图1 1.55 μm AlGaInAs-InP应变量子阱偏振无关光放大器结构示意图

对于AlGaInAs材料,氧杂质含量是决定外延材料质量的一个极其重要的因素,因此,如何有效地降低材料中的氧含量是MOCVD外延生长所必须关注的问题.经多次实验,摸索出一套优化的AlGaInAs量子阱材料MOCVD生长参数,如表1所示;同时,AlGaInAs量子阱材料的生长必须考虑到III族和V族源的纯度、载气(氢气)的纯度和系统的气密性.为了保证生长出高质量的AlGaInAs应变量子阱材料,采用EPICHEM公司的外延纯级TMAI源,在MOCVD系统钼管后加装赛斯公司的吸附式纯化器,将H₂纯度从10⁻⁶提高到10⁻⁹,同时增设露点仪和微氧分析仪进行实时监测.采取这些措施之后,按照如图1所示的器件结构依次生长所需的外延材料.

表1 AlGaInAs应变量子阱材料MOCVD生长主要工艺参数

生长参数	优化值
反应腔压力, P/Pa	922
生长温度, T/°C	700
V/III比	> 300
生长速率, R/(nm/s)	0.28
III族源温度	TMIn: 17°C/TMGa: -10°C/TMAI: 0°C

在成功生长出AlGaInAs应变量子阱材料后,通过光刻、反应离子刻蚀(RIE)、湿法腐蚀、蒸发、溅射等标准制管工艺制作脊型波导半导体光放大器管芯.脊宽采用2.8 μm ,腔长为650 μm ;另外,为有效降低腔面反射率,采用7°斜腔以抑制腔面剩余反射率,并在器件端面蒸镀Ti₃O₅/Al₂O₃两层抗反膜系,

使腔面剩余反射率达到 3×10^{-4} 以下. 图 2 为放大器管芯扫描电镜(SEM)照片, 从图中可以清楚看到脊型波导结构, 脊高约 $1.5\mu\text{m}$, 脊宽约 $2.8\mu\text{m}$, 基本达到设计要求.



图 2 $1.55\mu\text{m}$ AlGaInAs-InP 应变量子阱光放大器扫描电镜图像

4. 器件测试与分析

管芯制作完成后, 采用带微透镜的光纤组件进行双端耦合封装, 根据实验, 光纤与放大器管芯的耦合损耗约为单端 -4dB , 封装器件中带有热电致冷器、热敏电阻为器件提供温控, 设定器件工作温度为 25°C , 对器件特性进行测试分析. 图 3 所示为不同偏置电流水平下(150mA , 200mA)测试所得的光放大器增益谱, 测试中, 保持输入信号功率为 -25dBm , 从图中可以看到, 200mA 偏置电流下, 在 $1.54\mu\text{m}$ 波长处, 器件具有最大增益约为 12dB , 根据耦合损耗推算, 此时 AlGaInAs 光放大器管芯的增益约为 20dB , 同时, 无论是在 150mA 或是在 200mA 电流下, 整个波长范围内($1530\text{--}1580\text{nm}$)增益的偏振相关度始终保持在 0.5dB 以下, 因此实现了大电流工作下的 AlGaInAs-InP 应变量子阱半导体光放大器的偏振不灵敏性. 图 4 为不同电流下信号增益与输出功率的关系曲线, 从图中可以推算出, 当输入信号波长 $1.54\mu\text{m}$, 在 200mA 电流下, 器件的 3dB 饱和输出功率约为 7dBm ; 图 5 为 200mA 时放大器的偏振解析自发辐射谱(ASE), 图中 ASE 谱功率波动值在 0.3dB 以下, 证明腔面具有 2×10^{-4} 以下的剩余反射率, TE 和 TM 模功率在整个波长范围内基本接近, 预示着 SOA 的 TM/TE 偏振模式增益的匹配. 另外从 ASE 谱可以看到其 3dB 带宽大于 50nm , 与增益谱基本一致.

前已述及, 与常规的 GaInAsP-InP 材料系器件相比, AlGaInAs-InP 材料系半导体激光器具有更好的

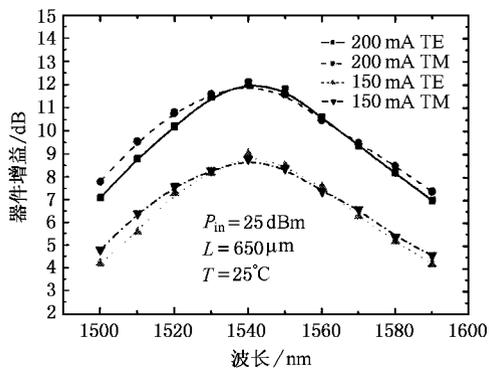


图 3 不同电流下光放大器偏振解析增益谱

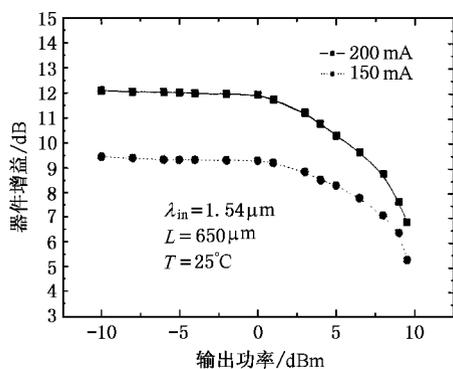


图 4 不同电流下光放大器增益与输出功率的关系

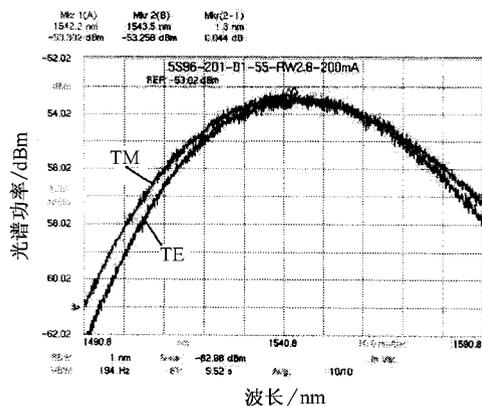


图 5 200mA 电流下光放大器偏振解析自发辐射谱

温度特性, 那么, 对于 AlGaInAs-InP 半导体光放大器而言, 其温度特性是否较常规的 GaInAsP-InP 器件有所改善是极为关心的一个问题, 也是尝试研究制作 AlGaInAs-InP 材料系半导体光放大器的主要目的之一, 为此, 在不同温度下对研制的 AlGaInAs-InP 应变量子阱光放大器的特性进行测试分析. 通过器件内部的半导体热电致冷器和热敏电阻, 分别设定

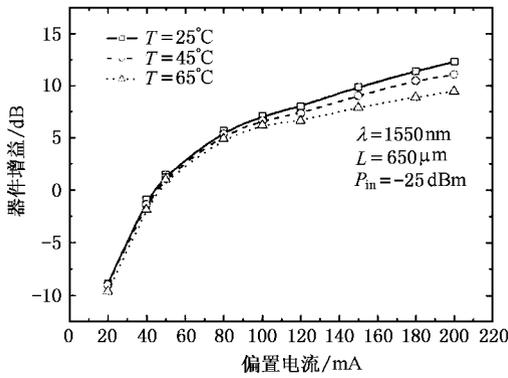


图6 不同温度下光放大器增益与电流的关系

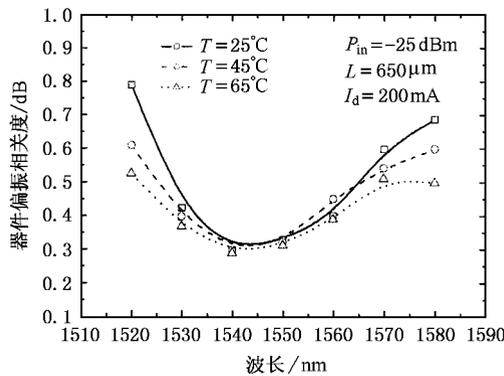


图7 不同温度下光放大器偏振相关度与输入信号光波长的关系

AlGaInAs-InP 应变量子阱光放大器的工作温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、45 $^{\circ}\text{C}$ 和 65 $^{\circ}\text{C}$ ，在不同的温度下测试器件在不同电流水平下的信号增益和偏振相关性。图 6 显示放大器在不同温度情况下，器件增益特性和偏置电流

的关系曲线，保持输入信号功率为 -25dBm，信号波长为 1.55 μm ，图中清晰显示，器件增益随温度的升高而减小，当器件工作温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 65 $^{\circ}\text{C}$ 时，增益降低小于 3dB，证实了 AlGaInAs/InP 量子阱对电子的增强限制作用同样适用于 SOA 温度特性的改善。图 7 显示在不同温度下器件偏振相关度的变化情况，测试过程中，保持偏置电流为 200mA，图中可见，在不同的温度情况下，器件都能保持较小的偏振相关性，且随温度的升高，偏振相关度有减小的趋势。

5. 结 论

MOCVD 生长并制作了脊型波导 AlGaInAs-InP 偏振无关应变量子阱半导体光放大器，有源区采用三周期的张应变量子阱结构。测试结果表明，200mA 电流下，AlGaInAs-InP 光放大器自发辐射(ASE)功率的波动小于 0.3dB，3dB 带宽为 50nm，管芯的小信号增益约为 20dB，饱和输出功率达 7dBm，整个波长范围内(1530—1580nm)增益的偏振相关度始终保持在 0.5dB 以下；同时，AlGaInAs-InP 半导体光放大器表现出了较好的温度特性，器件增益随温度的升高而减小，器件工作温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 65 $^{\circ}\text{C}$ 时，增益降低小于 3dB，在 25 $^{\circ}\text{C}$ 至 65 $^{\circ}\text{C}$ 全温范围内，器件都能保持 0.5dB 以下的偏振相关性，通过有源区结构、器件结构和器件腔面减反膜的进一步优化设计和工艺水平的提高，有望进一步提高其增益及饱和特性。因此，AlGaInAs-InP 材料系具备制作高性能半导体光放大器的潜力。

[1] Diez S, Ludwig R and Weber H G 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 60
 [2] Geraghty D F *et al* 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 452
 [3] Zhang X L, Sun J Q, Liu D M, Huang D X and Yi H Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 746 [in Chinese] 张新亮等 2000 *物理学报* **49** 746
 [4] Zhang X L, Huang D X, Sun J Q and Liu D M 2001 *Chin. Phys. Lett.* **10** 124
 [5] Simoyama T *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 31
 [6] Akiyama T *et al* 2002 *Electron. Lett.* **38** 239
 [7] Joma M *et al* 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 121

[8] Ougazzaden A *et al* 1995 *Electron. Lett.* **31** 1242
 [9] Mathur A and Dapkus P D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2845
 [10] Koonath P *et al* 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1282
 [11] Takemasa K *et al* 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 495
 [12] Yamamoto N, Seki S and Noguchi Y 2000 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **12** 137
 [13] Selmic S *et al* 2001 *IEEE Selected Topics in Quantum Electron.* **7** 340
 [14] Koonath P, Kim S, Cho W J and Gopinath A 2001 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **13** 779

Study on 1.55 μm AlGaInAs-InP polarization-insensitive semiconductor optical amplifier and its temperature characterizatics

Ma Hong^{1,2)} Chen Si-Hai¹⁾ Jin Jin-Yan³⁾ Yi Xin-Jian¹⁾ Zhu Guang-Xi²⁾

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)

³⁾ Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 16 December 2003 ; revised manuscript received 16 January 2004)

Abstract

Polarization-insensitive AlGaInAs-InP semiconductor optical amplifier is realized at wavelength of 1.55 μm . The active layer consists of three tensile-strained wells with a strain of 0.35%. The amplifier is fabricated with a ridge waveguide structure. The testing result shows that the amplifiers have an excellent polarization insensitivity (less than 0.5 dB) over the entire range of wavelength (from 1530 to 1580nm). The 1540 nm wavelength optical gain is 20 dB at the bias current of 200 mA. The AlGaInAs-InP optical amplifier shows good temperature characteristics, less than a 3dB reduction in the gain and polarization-insensitivity when the temperature is raised from 25 $^{\circ}\text{C}$ to 65 $^{\circ}\text{C}$.

Keywords : semiconductor technology, MOCVD, polarization-insensitive, AlGaInAs-InP, strained quantum well, semiconductor optical amplifier, gain

PACC : 4280S, 6855, 7280E, 7865K