

# 宽带偏振不灵敏 InGaAs 半导体光放大器\*

王书荣<sup>1,2</sup> 王 圩<sup>1</sup> 刘志宏<sup>1</sup> 朱洪亮<sup>1</sup> 张瑞英<sup>1</sup> 丁 颖<sup>1</sup> 赵玲娟<sup>1</sup> 周 帆<sup>1</sup> 田慧良<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 光电子研发中心, 北京 100083)

(2 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650092)

**摘要:** 采用压应变 InGaAs 量子阱和张应变 InGaAs 准体材料交替混合的有源结构, 研制了宽带偏振不灵敏的半导体光放大器. 此放大器在 100 ~ 250mA 的工作电流范围内, 获得了大于 70nm 的 3dB 光带宽; 在 0 ~ 250mA 工作电流和 3dB 光带宽波长范围内, 偏振灵敏度小于 1dB. 对于 1.55 $\mu$ m 的信号光, 在 200mA 的注入电流下获得了 15.6dB 的光纤到光纤的增益、小于 0.7dB 的偏振灵敏度和 4.2dBm 的饱和输出功率.

**关键词:** 压应变 InGaAs 量子阱; 张应变 InGaAs 准体材料; 半导体光放大器; 偏振灵敏度; 增益; 饱和输出功率

**EEACC:** 4320J; 1220; 2530C

**中图分类号:** TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)03-0567-04

## 1 引言

众所周知, 半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 在全光网络光纤传输系统中有着许多重要应用, 如对光信号直接进行在线放大<sup>[1,2]</sup>, 用做光开关<sup>[3]</sup>和波长变换器<sup>[4]</sup>等. 但无论是线性应用 (在线放大) 还是非线性应用 (光开关或波长变换器), 高增益、低偏振灵敏度和大 3dB 增益带宽都是 SOA 必需具备的重要性能指标. 目前, 国内外主要采用以下几种方法制备偏振不灵敏的半导体光放大器: (1) 采用亚微米级近方形的无应变体材料做有源结构<sup>[5]</sup>, 该方法制作的 SOA 功耗较低, 但制作具有亚微米量级有源区的工艺难度较大; (2) 采用张应变的有源结构<sup>[6,7]</sup>, 通过直接在有源区中引入一定的张应变变量来提高 TM 模增益, 此方法制作的 SOA 可以在大的工作电流范围内和宽的信号波长范围内实现偏振不灵敏, 但噪声指数偏大, 3dB 增益带宽较小; (3) 采用张应变的量子阱做有源结构<sup>[8,9]</sup>, 此方法制作的 SOA 具有较大的饱和输出功率和较宽的 3dB 增益带宽, 但由于该有源结构中的量子尺寸效应 (能级分裂, 第一重空穴子带在上, 而第一轻空穴子带在下) 和张应变效应 (使轻空穴子带下移) 是相反的<sup>[10]</sup>, 使轻空穴带和重空穴带之间有

较强的相互作用, 增加了透明载流子的密度, 导致器件的其他性能降低; (4) 采用压应变的量子阱和张应变的量子阱交替混合的有源结构<sup>[11,12]</sup>. 但迄今为止, 对于 1.55 $\mu$ m 波段的 SOA 研究仅限于理论模拟<sup>[13]</sup>, 尚未见采用相同数目的张、压应变的量子阱混合制作的 1.55 $\mu$ m 偏振不灵敏的 SOA 的实验报道. 再者, 为了获得较大的 TM 模式增益实现偏振不灵敏, 需引进较大的张应变和较厚的张应变量子阱, 但具有较大张应变和较厚的量子阱难于生长, 不易获得较高的晶体质量.

为此, 我们首次提出采用三层压应变量子阱和三层张应变准体材料交替混合做有源区的方法, 研制出具有大的 3dB 光带宽和能在大的工作电流范围内及整个 3dB 光带宽范围内都能实现偏振不灵敏的 SOA. 在 100 ~ 250mA 的工作电流范围内, 放大器获得了大于 70nm 的 3dB 光带宽; 而且在 0 ~ 250mA 工作电流范围内和 3dB 光带宽波长范围内, 其偏振灵敏度远小于 1dB. 对于 1.55 $\mu$ m 的信号光, 在 200mA 的注入电流下, 获得了 15.6dB 的光纤到光纤的增益、小于 0.7dB 的偏振灵敏度和 4.2dBm 的饱和输出功率.

## 2 器件的结构设计及制作

器件的简单结构层如图 1 所示, 有源区主要由

\* 国家重点基础研究发展计划 (编号: G20000683-1) 和国家自然科学基金 (批准号: 90101023) 资助项目

王书荣 男, 博士研究生, 主要从事半导体光放大器及集成器件的研究.

2004-03-15 收到, 2004-05-17 定稿

3 层压应变 InGaAs 量子阱(厚度为 8~9nm,应变量为 +0.6%~+0.7%之间)和三层张应变 InGaAs 准体材料(厚度为 35~40nm,应变量为 -0.8%~-0.85%之间)相互交替构成.该结构具有以下优点:(1)充分利用了量子尺寸效应,能级分立,态密度呈阶梯状分布,使其内量子效率较高,微分增益较大;(2)充分利用了应变能带工程,量子阱中引入压应变,进一步分离价带中的重空穴带和轻空穴带,大

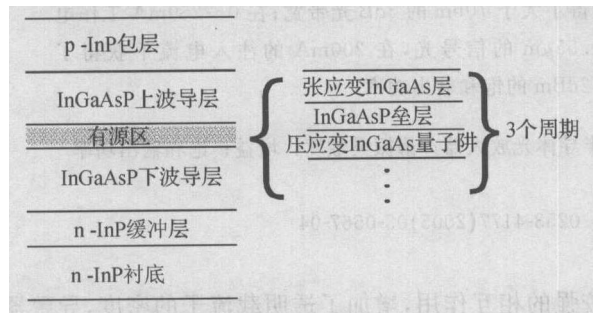


图 1 半导体光放大器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of SOA's structure

大减少了价带之间的相互吸收和俄歇复合.且压应变的引入,使重空穴有效质量变小,态密度减小,粒子数易于反转,从而降低了噪声指数.此外,体材料中引入张应变,消除了重空穴带和轻空穴带的简并,使得重空穴带和轻空穴带之间的相互作用变弱,从而提高了器件的性能.再者,张应变使得 TM 模式增益增强,从而能使器件实现偏振不灵敏;(3)采用了张应变准体材料,电流注入后,虽然体材料中的载流子流向量子阱中进行再分布,但由于此体材料较厚,故仍能保持较高的 TM 增益,使该结构的器件能在较大的工作电流范围内及整个 3dB 光增益带宽波长范围内均实现偏振不灵敏;(4)光限制因子较大,使得尺寸较小的 SOA 在不太大的电流下便可获得高增益.故采用该结构的光放大器,用作在线放大时能提供高增益,用作波长变换器时可获得高的转换效率,用作光开关时可获得高消光比和低无损工作电流;(5)该结构的优化设计自由度较大,进一步调整所引入的应变或改变量子阱的厚度,均可增加器件的 3dB 光带宽.

我们采用低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)方法,通过三次外延生长制备 SOA.首先在 n 型 InP 衬底上一次外延生长 0.5 $\mu\text{m}$  的 n 型 InP 缓冲层、150nm 不掺杂 InGaAsP 下波导层(带隙波长为 1.2 $\mu\text{m}$ )、相互交替的三层压应变 InGaAs 量子阱和三层张应变 InGaAs 准体材料和 150nm 不掺杂

InGaAsP(带隙波长为 1.2 $\mu\text{m}$ )上波导层,其中上、下 InGaAsP 波导层是与 n 型 InP 衬底晶格匹配的.在生长过程中,只需调节 Ga 源的源量,便可获得所需的压应变量和张应变.然后热氧化生长一层 SiO<sub>2</sub> 做掩膜,光刻腐蚀出宽 1.7 $\mu\text{m}$  的有源区条,为了有效地降低端面反射率,此有源区条偏离端面一定角度;清洗后,二次外延生长 p-n-p 电流阻挡层形成掩埋异质结(BH)有源结构.化学腐蚀掉条形有源区上的 SiO<sub>2</sub> 掩膜,三次外延 2 $\mu\text{m}$  厚的 p 型 InP 包层和 0.2 $\mu\text{m}$  厚的 p<sup>+</sup> 型 InGaAs 接触层.最后,正面蒸镀 Ti-Pt-Au 正电极,减薄,背面蒸镀 Au-Zn-Au 背电极,再进行电极合金.把样品沿正台方向解理出长 700~800 $\mu\text{m}$  的 SOA 条,再在 SOA 解理条的两个解理面上蒸镀抗反射膜(ARC)以便使 SOA 的端面剩余反射率降低到 10<sup>-4</sup> 以下.

### 3 器件性能测试结果

图 2 为镀抗反射膜后的半导体光放大器的光功率-电流特性曲线.由图可知,半导体光放大器的曲线特性与发光二极管相似,无拐点存在.镀抗反射膜后,即使在 250mA 的电流下器件也未激射,证明我们采用斜条和镀抗反膜技术相结合,能有效抑制器件的激射行为,使光放大器拥有相当小的增益 ripple.

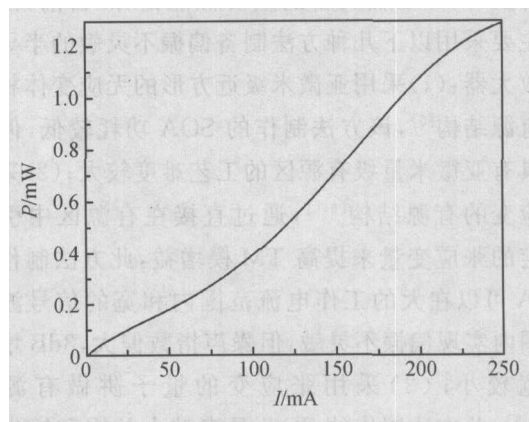


图 2 镀膜后半导体光放大器的 P-I 特性

Fig. 2 P-I characteristics of SOA with ARC

镀膜后半导体光放大器在不同的外加注入电流下放大的模式可分的自发发射谱如图 3 所示.可以看出,随着注入电流的增加,自发发射谱的峰值波长向短波方向漂移,这是由于能带填充效应所致.在不同的工作电流下,TE 模式的自发发射输出功率与 TM 模式之间的自发发射输出功率相差很小,远小

于 1dB. 更重要的是,这个远小于 1dB 的差值能在较宽的波长和较大的工作电流范围(0 ~ 250mA)内保持不变;而且在 0 ~ 160mA 的电流范围内,两者的差值远小于 0.5dB. 由此可知,采用该结构所制作的半导体光放大器,能在较大的工作电流范围内和 3dB 光带宽波长范围内实现偏振不灵敏. 再者,在 0 ~ 250mA 的工作电流范围内,增益 ripple 小于 0.3dB(所用的测试分辨率为 0.1nm),SOA 的 3dB 光带宽大于 70nm,说明采用该方法制作的 SOA,除能实现偏振不灵敏外,还能获得大 3dB 光带宽.

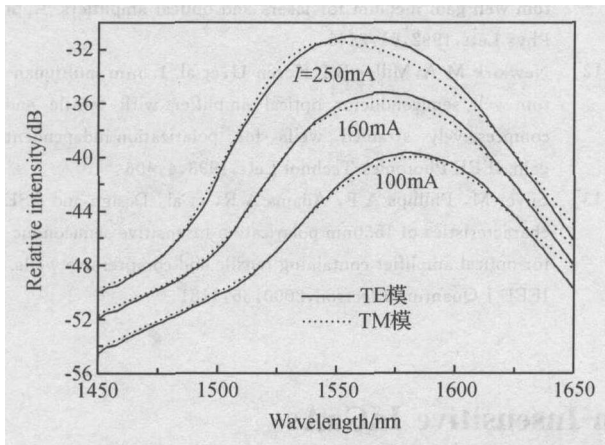


图 3 放大器分别在 100, 160 和 250mA 电流下的模式可分的自发发射谱

Fig. 3 Polarization-resolved ASE spectra of SOA at 100, 160, 250mA

图 4 为 SOA 的增益与电流的关系曲线. 在 200mA 的注入电流下,对于输入波长为 1.55 $\mu$ m 的小信号光,放大器获得了 15.6dB 的光纤到光纤的增益;在 40 ~ 200mA 的工作电流范围内,TE 模的增益与 TM 模的增益差小于 0.7dB,即偏振不灵敏. 值得指出的是,我们的测试中端面耦合插损较大(每个端面约 8.5dB),如果去除端面耦合插损的影响,我们能够期望在 200mA 的工作电流下得到大于 30dB 的 SOA 芯片增益. 因此,进一步提高端面耦合效率,可望得到较大的出纤净增益.

增益与输出功率的关系曲线如图 5 所示,对于 1.55 $\mu$ m 波长的小信号光,在 200mA 下,获得了 4.2dBm 的饱和输出功率. 由于 3dB 饱和输出功率受端面耦合效率影响,若进一步降低端面耦合损耗,可望得到更高的饱和输出功率. 再者,增加工作电流和缩短 SOA 的长度,也能提高器件的饱和输出功率.

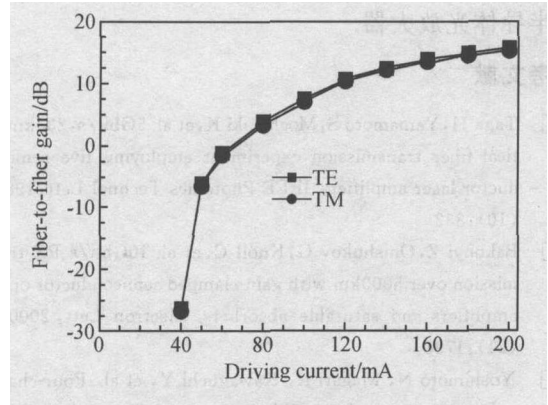


图 4 光纤到光纤的净增益与电流的关系  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

Fig. 4 Fiber-to-fiber net gain of SOA versus current for  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

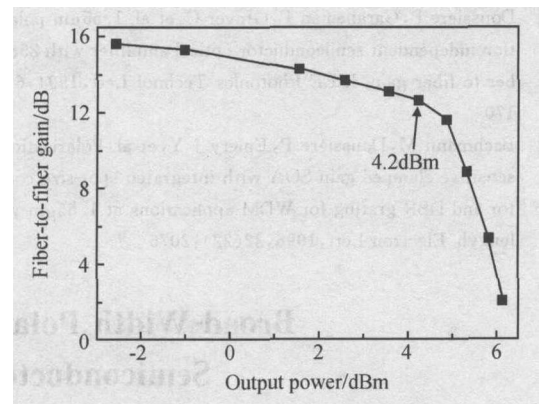


图 5 在 200mA 的注入电流下,增益与输出功率的关系曲线  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

Fig. 5 Fiber-to-fiber gain against output power at 200mA driving current  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

### 4 结论

本文首次采用压应变 InGaAs 量子阱和张应变 InGaAs 准体材料交替混合的有源结构,制备了掩埋斜条型的半导体光放大器. 所研制的 SOA,在 250mA 的工作电流下,仍能获得 70nm 的 3dB 光带宽. 而且尤为重要的是,在 0 ~ 250mA 的工作电流范围和 3dB 光带宽的波长范围内,该放大器的偏振灵敏度小于 1dB;在 0 ~ 160mA 的电流范围内,偏振灵敏度更低,小于 0.5dB. 对于 1.55 $\mu$ m 的输入小信号光,在 200mA 的工作电流下,获得了 15.6dB 的光纤到光纤的净增益、小于 0.7dB 的偏振灵敏度和 4.2dBm 的饱和输出功率. 如果进一步降低器件的端面插损,比如在放大器的两端分别集成一模斑变换器来提高端面耦合效率,可望获得性能更加优越

的半导体光放大器.

### 参考文献

- [ 1 ] Taga H, Yamamoto S, Mochizuki K, et al. 5 Gbit/s, 233km optical fiber transmission experiment employing five semiconductor laser amplifiers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1989, 1(10):332
- [ 2 ] Bakonyi Z, Onishukov G, Knoll C, et al. 10Gbit/s RZ transmission over 5000km with gain-clamped semiconductor optical amplifiers and saturable absorbers. *Electron Lett*, 2000, 36(21):1790
- [ 3 ] Yoshimoto N, Magari K, Kawaguchi Y, et al. Four-channel polarization-insensitive SOA gate array integrated with butt-jointed spot-size converters. *Electron Lett*, 1997, 33(24):2045
- [ 4 ] Durhuus T, Mikkelsen B, Joergensen C, et al. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *IEEE Lightwave Technol*, 1996, 14(6):942
- [ 5 ] Doussiere P, Garabedian P, Graver C, et al. 1.55 $\mu$ m polarization independent semiconductor optical amplifier with 25dB fiber to fiber gain. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1994, 6(2):170
- [ 6 ] Bachmann M, Doussi e P, Emery J Y, et al. Polarisation-insensitive clamped-gain SOA with integrated spot-size converter and DBR grating for WDM applications at 1.55 $\mu$ m wavelength. *Electron Lett*, 1996, 32(22):2076
- [ 7 ] Itoh M, Shibata Y, Kakisuka T, et al. Polarization-insensitive SOA with a strained bulk active layer for network device application. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(6):765
- [ 8 ] Koonath P, Kim S, Cho W J, et al. Polarization-insensitive optical amplifier in AlInGaAs. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(8):779
- [ 9 ] Koonath P, Kim S, Cho W J, et al. Polarization-insensitive quantum-well semiconductor optical amplifiers. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(9):1282
- [ 10 ] Thijs P J A, Tiemeijer L F, Binsma J J M, et al. Progress in long-wavelength strained-layer InGaAs (P) quantum-well semiconductor lasers and amplifiers. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(2):477
- [ 11 ] Mathur A, Dapkus P D. Polarization insensitive strained quantum well gain medium for lasers and optical amplifiers. *Appl Phys Lett*, 1992, 61:2845
- [ 12 ] Newkirk M A, Miller B I, Koren U, et al. 1.5 $\mu$ m multi-quantum-well semiconductor optical amplifier with tensile and compressively strained wells for polarization-independent gain. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1993, 4:406
- [ 13 ] Silver M, Phillips A F, Adams A R, et al. Design and ASE characteristics of 1550nm polarization-insensitive semiconductor optical amplifier containing tensile and compressive wells. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36:1181

## Broad-Width Polarization-Insensitive InGaAs Semiconductor Optical Amplifier \*

Wang Shurong<sup>1,2</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Liu Zhihong<sup>1</sup>, Zhu Hongliang<sup>1</sup>, Zhang Ruiying<sup>1</sup>,  
Ding Ying<sup>1</sup>, Zhao Lingjuan<sup>1</sup>, Zhou Fan<sup>1</sup>, and Tian Huiliang<sup>1</sup>

(1 *The Center of Optoelectronics Research & Development, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Institute of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China*)

**Abstract:** An active structure containing InGaAs compressive wells and tensile quasi-bulk layers is adopted to fabricate broad-band polarization-insensitive semiconductor optical amplifier. The 3dB optical bandwidth of more than 70nm is obtained ranging the driving current from 100 to 250mA, moreover, the SOA has less than 1dB polarization sensitivity over the 0~250mA injection current and 3dB optical bandwidth. For 1.55 $\mu$ m input signal light, 15.6dB fiber to fiber gain, less than 0.7dB polarization sensitivity, and 4.2dBm saturation output power are achieved at an injection current of 200mA.

**Key words:** compressively strained InGaAs quantum wells; tensile-strained InGaAs quasi-bulk layers; semiconductor optical amplifier; polarization sensitivity; gain; saturation output power

EEACC: 4320J; 1220; 2530C

Article ID: 0253-4177(2005)03-0567-04

\*Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China(No. 20000683-1), and National Natural Science Foundation of China(No. 90101023)

Wang Shurong male, PhD candidate. His research interest is in semiconductor optical amplifiers and integrated optoelectronic devices.

Received 15 March 2004, revised manuscript received 17 May 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics