

文章编号: 0258-7025(2004)11-1381-04

高增益偏振不灵敏 InGaAs/InP 体材料 半导体光放大器

王书荣^{1,2}, 王 圩¹, 朱洪亮¹, 张瑞英¹, 赵玲娟¹, 周 帆¹, 田慧良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 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092)

摘要 采用三元 InGaAs 体材料为有源区, 通过直接在 InGaAs 体材料中引入 0.20% 张应变来加强 TM 模的增益, 研制了一种适合于作波长变换器的偏振不灵敏半导体光放大器(SOA)。在低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)的过程中, 只需调节三甲基 Ga 的源流量便可获得所要求的张应变。制作的半导体光放大器在 200 mA 的注入电流下, 获得了 50 nm 宽的 3 dB 光带宽和小于 0.5 dB 的增益抖动; 重要的是, 半导体光放大器能在较大的电流和波长范围里实现小于 1.1 dB 的偏振灵敏度。对于 1.55 μm 波长的信号光, 在 200 mA 的偏置下, 其偏振灵敏度小于 1 dB, 同时获得了大于 14 dB 光纤到光纤的增益, 3 dBm 的饱和输出功率和大于 30 dB 的芯片增益。用作波长变换器, 可获得较高的波长变换效率。进一步提高半导体光放大器与光纤的耦合效率, 可得到性能更佳的半导体光放大器。

关键词 光电子学; 半导体光放大器; 张应变; 偏振不灵敏; 信号增益; 饱和输出功率

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

High-Gain Polarization-Insensitive Semiconductor Optical Amplifier with Tensile-Strained InGaAs/InP Bulk Material

WANG Shu-rong^{1,2}, WANG Wei¹, ZHU Hong-liang¹,

ZHANG Rui-ying¹, ZHAO Ling-juan¹, ZHOU Fan¹, TIAN Hui-liang¹

¹ National Research Center of Optoelectronic Technology,
Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China
² Institute of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China

Abstract Ternary InGaAs bulk layer is used as active region. TM mode gain is enhanced by directly introducing 0.20% tensile strain into bulk InGaAs active layer so that a polarization insensitive semiconductor optical amplifier (SOA) for converter is fabricated. The desired tensile strain value is achieved by only changing the TMGa source flow during low-pressure metalorganic vapor-phase epitaxy (LP-MOVPE). At injection current of 200 mA, the fabricated SOA has a 3 dB optical bandwidth of 50 nm and the gain ripple is less than 0.5 dB. More important is that the polarization sensitivity of SOA is less than 1.1 dB over a wide current and wavelength range. Under bias of current of 200 mA, for $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, the SOA shows less than 1 dB polarization sensitivity, 14 dB fiber to fiber gain, 3 dBm saturation output power and more than 30 dB chip gain. A high conversion efficiency can be obtained when SOA is used as wavelength converter. A better performance SOA will be achieved if the coupling loss between the SOA chip and the fiber is decreased further.

Key words optoelectronics; semiconductor optical amplifier; tensile strain; polarization insensitivity; signal gain; saturation output power

收稿日期: 2003-06-23; **收到修改稿日期**: 2003-12-15

基金项目: 国家 973 计划项目(G20000683-1)和国家自然科学基金重大研究计划项目(90101023)资助课题。

作者简介: 王书荣(1968—), 男, 中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心博士研究生, 现主要从事半导体光放大器研究。E-mail: shrw@red.semi.ac.cn

1 引 言

在全光网络光纤传输系统中,半导体光放大器(SOA)有着诸多应用,除能对光信号直接进行放大外^[1~4],还可以用作光开关^[5]和波长变换器^[6,7];同时,由于半导体光放大器体积小,制作工艺简单,因此,也易于与其他光子器件集成^[8]。在诸多应用中,特别是用作波长变换器,大的增益和较低的偏振灵敏度是半导体光放大器所必需具有的重要性能指标,而体材料结构的半导体光放大器易于满足该要求。目前,国内外利用体材料制备偏振不灵敏的半导体光放大器有以下几种方法:1) 大光腔结构^[9],该结构可以在大的注入工作电流范围内和大的信号波长范围内实现偏振不灵敏,但该结构的半导体光放大器有较低的饱和输出功率和高的噪声指数,而且所需的工作电流较大。2) 采用亚微米级近四方形的无应变有源结构^[10,11],该结构功耗较低,但制作具有亚微米量级有源区的工艺难度大,往往拥有大的远场发散角,从而导致低的光纤耦合效率。3) 有源区应变渐变结构^[12],该结构的半导体光放大器能获得较大的 3 dB 增益带宽,但器件结构的优化自由度小。4) 张应变有源结构^[13,14],通过直接在有源区中引入张应变来提高 TM 模的增益,可以在大的工作电流和宽的信号波长范围内获得较低的偏振灵敏度,该方法制作简单,但需准确控制有源区中的张应变变量。

半导体光放大器通常是在较大的电流下工作,由于能带填充效应而导致的波长蓝移量较大,因此,设计制作半导体光放大器时,带隙波长应向长波方向偏调,鉴于此考虑,我们采用三元 InGaAs 体材料做有源区,通过在有源区中引入适度的张应变就能获得低的偏振灵敏度和较大的增益,而且在三元 InGaAs 材料的外延生长过程中,只需调节 In 或 Ga 其中一个量就可以引进获得偏振不灵敏所需要的张应变变量。通过调节 Ga 量引进了 0.20% 的张应变,制作了能在较大的电流和波长范围里偏振不灵敏的 InGaAs 半导体光放大器。

2 半导体光放大器的制作

采用低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)方法,通过三次外延制备半导体光放大器。首先是在 *n*-InP 衬底上一次外延生长厚为 0.5 μm 的 *n*-InP 缓冲层,150 nm 厚不掺杂的 InGaAsP(带隙波长为 1.2 μm)下波导层,90 nm 厚的不掺杂

的三元 InGaAs 张应变有源层及 150 nm 厚的不掺杂 InGaAsP(带隙波长为 1.2 μm)上波导层。其中上、下 InGaAsP 分别限制波导层,它的晶格常数是与 *n*-InP 衬底晶格相匹配的,在生长过程中,只需通过调节三甲基 Ga 的源量,有源层 InGaAs 中获得了 0.20% 的张应变;然后利用热氧化生长一层 SiO₂ 作掩膜,光刻腐蚀出宽为 1.7 μm 的有源区条,为了有效降低端面反射率,光刻时,让有源区条偏离(110)方向一定角度;清洗后,二次外延生长 *p-n-p* 电流阻挡层形成掩埋异质结有源结构。化学方法蚀掉条形有源区上面的 SiO₂ 掩膜,三次外延 2 μm 厚的 *p*-InP 限制层和 0.2 μm 厚的 *p*⁺-InGaAs 接触层。最后,样品 *p* 面蒸镀 Ti-Pt-Au 正电极,减薄后,背面蒸镀 Au-Zn-Au 电极,然后进行电极合金,再把样品沿正台方向解理为长 700~800 μm 的半导体光放大器条,再在其解理条的两个解理面上蒸镀抗反射膜以便使半导体光放大器的端面剩余反射率降低到 10⁻⁴ 以下。

3 性能测试结果和讨论

首先对一次外延生长的 InGaAs 有源结构进行 X 射线双晶衍射测试来检测所引入的应变变量,由 X 射线测试结果知,在 InGaAs 有源结构中,引入的张应变量为 0.20%。图 1 为半导体光放大器芯片腔面镀光学膜前安装在热沉上所检测到的 *P-I* 特性。由该图知,尽管芯片是一种斜腔掩埋结构,但仍保留足够大的端面反射率,在腔内存在较大的正反馈,导致半导体光放大器芯片在较低的偏置直流下激射,激射阈值电流为 25 mA;再者,半导体光放大器芯片拥有较大的斜率效率,其值为 0.21 mW/mA。因

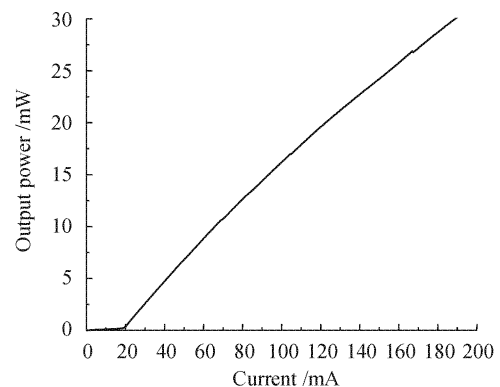


图 1 镀光学膜前半导体光放大器芯片的 *P-I* 特性曲线
Fig. 1 *P-I* characteristics of SOA before antireflection coating

此,如此低的激光阈值和高的斜率效率,表明该张应变 InGaAs 体材料有源区的晶体质量较高,微分增益较大,腔内损耗较小,因而能用此结构获得具有较大增益的半导体光放大器芯片。

图 2 为蒸镀减反射膜后半导体光放大器芯片在不同外加电流下的放大自发辐射(ASE)谱。从图中可知,即使外加电流大于 200 mA,半导体光放大器也未激射,说明所镀的减反膜能有效地抑制半导体光放大器激射;同时,由该图可以看出,随注入电流的增加,放大自发辐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。

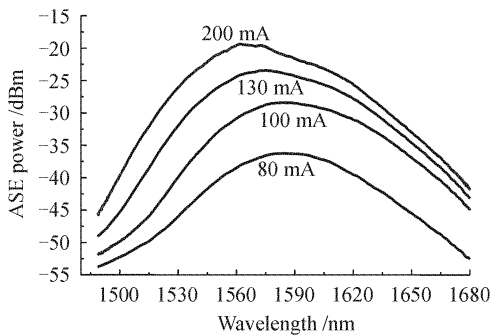


图 2 在不同注入电流下半导体光放大器的放大自发辐射谱

Fig. 2 Amplified spontaneous emission spectra of SOA at driving current of 80 mA, 100 mA, 130 mA, 200 mA

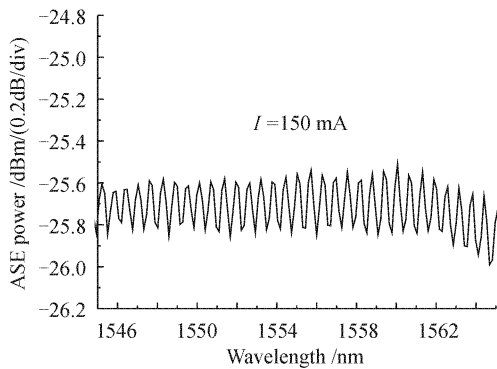


图 3 在 150 mA 下放大的半导体光放大器的放大自发辐射谱

Fig. 3 Amplified spontaneous emission spectrum of SOA at driving current of 150 mA

图 3 为在 150 mA 注入电流下的放大自发辐射谱,由图知,在 150 mA 外加注入电流下,获得了小于 0.3 dB 的增益抖动。即使在 200 mA 的条件下,也得到了小于 0.5 dB 的增益抖动;由此可知,已获得了足够低的端面反射率。

图 4 为半导体光放大器的增益与电流的关系曲

线。由图知,在 130 mA 的注入电流下,对于输入波长为 1.55 μm 的小信号光,获得了 10 dB 的光纤到光纤的增益;在 200 mA 的工作电流下,获得了 14 dB 的光纤到光纤的增益;由于在测试中,端面耦合插损较大,每个端面约 9 dB,由此可知,在 200 mA 的工作电流下,能得到大于 30 dB 的半导体光放大器芯片增益。显然,进一步提高端面耦合效率,可望得到较大的出纤增益。

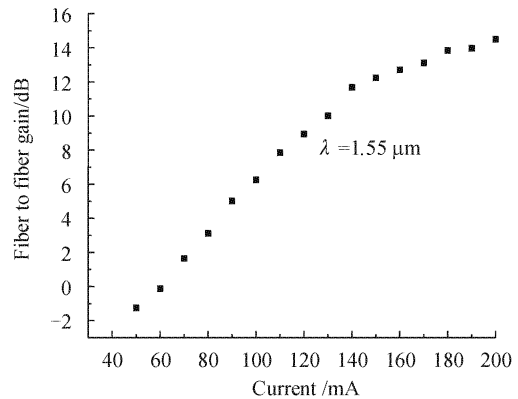


图 4 增益与注入电流的关系

Fig. 4 Gain against driving current

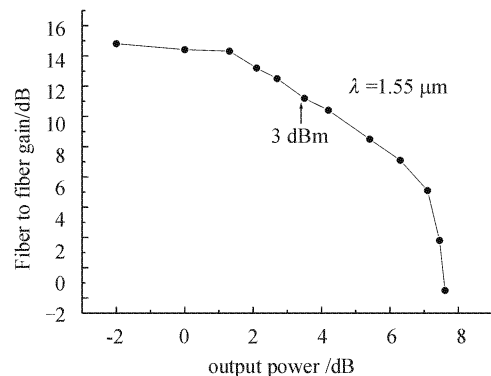


图 5 在 200 mA 的注入电流下增益与输出功率的关系曲线

Fig. 5 Gain against output power at driving current of 200 mA

图 5 为半导体光放大器增益与输出功率的关系曲线,对于 1.55 μm 波长的信号光,在 200 mA 下,获得了 3 dBm 的饱和输出功率。由此可知,这种半导体光放大器既有较大的增益,又有适度的饱和输出功率,因此,很适合用于作交叉增益调制的波长转换器。

测试半导体光放大器偏振灵敏度的方法是把由可调谐激光器输出的光信号先经过偏振控制器,由偏振控制器出来的信号光再耦合进入半导体光放大

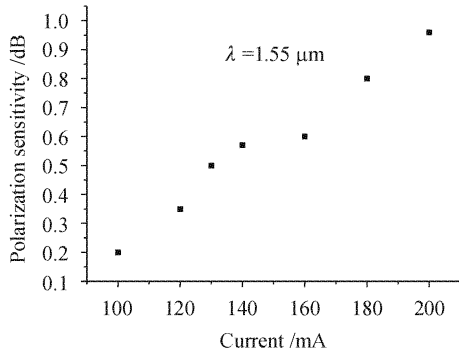


图 6 偏振灵敏度与注入电流的变化关系

Fig. 6 Polarization sensitivity against driving current

器,在一定的工作电流下,经半导体光放大器放大后,最后进入光谱分析仪,由光谱分析仪得到放大的信号谱强度随时间变化的关系,即可得到偏振灵敏度的大小。图 6 为半导体光放大器偏振灵敏度与注入电流的变化关系,由图 6 可知,在 100~200 mA 工作电流范围里,对于 1.55 μm 波长的信号光,获得了小于 1.1 dB 的偏振灵敏度;同时还检测了在相同工作电流下不同输入信号波长的偏振灵敏度,测试结果表明,该半导体光放大器也能在较宽的波长范围内实现偏振不灵敏。

4 结 论

我们直接在 InGaAs 体材料有源层中引入一定量的张应变,制备了斜角掩埋异质结结构的半导体光放大器,通过蒸镀单层减反膜,在 200 mA 的注入电流下获得了小于 0.5 dB 的增益抖动,而且所研制的半导体光放大器能够在较大的工作电流和较宽的波长范围内实现偏振不灵敏;对波长为 1.55 μm 的信号光,在 200 mA 工作电流下,其偏振灵敏度小于 1.1 dB,同时获得了 14 dB 的光纤到光纤的增益,3 dBm 的饱和输出功率和大于 30 dB 的芯片增益。显然,这种具有大的增益、低的偏振灵敏度和小的饱和输出功率的张应变三元 InGaAs 体材料半导体光放大器,比较适合用作增益交叉调制的波长变换器,而且能获得较高的转换效率。

参 考 文 献

- 1 H. Taga, S. Yamamoto, K. Mochizuki *et al.*. 5 Gbit/s, 233 km optical fiber transmission experiment employing five semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(10):332~334
- 2 Z. Bakonyi, G. Onishukov, C. Knöll *et al.*. 10 Gbit/s RZ transmission over 5000 km with gain-clamped semiconductor optical amplifiers and saturable absorbers [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(21):1790~1791
- 3 L. H. Spiekman, A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld *et al.*. DWDM transmission of thirty two 10 Gbit/s channels through 160 km link using semiconductor optical amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(12):1046~1047
- 4 Yin Jingzhi, Liu Suping, Liu Zongshun *et al.*. Polarization insensitive gain medium for InGaAsP optical amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):53~56
殷景志,刘素萍,刘宗顺等. 适用于 InGaAsP 光放大器偏振不灵敏的增益介质[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):53~56
- 5 N. Yoshimoto, T. Ito, K. Magari *et al.*. Four-channel polarization-insensitive SOA gate array integrated with butt-jointed spot-size converters [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(24):2045~2046
- 6 T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):942~947
- 7 Xiaofeng Xu, June Wei, Zhihui Kang *et al.*. Ultrabroad-band wavelength converter with high flattening conversion efficiency in a semiconductor optical amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):168~170
- 8 K. Kudo, K. Yashiki, T. Sasaki *et al.*. 1.55- μm wavelength-selectable microarray DFB-LD's with monolithically integrated MMI combiner, SOA, and EA-modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3):242~244
- 9 S. Cole, D. M. Cooper, W. J. Devlin *et al.*. Polarization-insensitive, near travelling-wave semiconductor laser amplifiers at 1.5 μm [J]. *Electron Lett.*, 1989, **25**(5):314~315
- 10 P. Doussiere, P. Garabedian, C. Graver *et al.*. 1.55 μm polarization independent semiconductor optical amplifier with 25 dB fiber to fiber gain [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2):170~172
- 11 S. Kitamura, K. Komatsu, M. S. Kitamura. Polarization-insensitive semiconductor optical amplifier array grown by selective MOVPE [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2):173~175
- 12 Zhang Ruiying, Dong Jie, Feng Zhiwei *et al.*. Graded strain bulk-like polarization-insensitive semiconductor optical with large bandwidth [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2002, **23**(10):1102~1105
张瑞英,董杰,冯志伟等. 渐变应变偏振不灵敏半导体光学放大器[J]. *半导体学报*, 2002, **23**(10):1102~1105
- 13 M. Bachmann, P. Doussière, J. Y. Emery *et al.*. Polarisation-insensitive clamped-gain SOA with integrated spot-size convertor and DBR grating for WDM applications at 1.55 μm wavelength [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(22):2076~2077
- 14 M. Itoh, Y. Shibata, T. Kakisuka *et al.*. Polarization-insensitive SOA with a strained bulk active layer for network device application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6):765~767