

InP 基少模半导体激光器

张莉萌 陆 丹 余力强 潘碧玮 赵玲娟

中国科学院半导体研究所材料重点实验室,北京 100083

摘要 针对少模光通信需求,仿真设计并制作了一种基于压应变量子阱结构的少模激光器。通过调整工作电流,该器件可以实现基模和一阶模工作。利用该器件成功激发了少模光纤的 LP_{01} 模和 LP_{11} 模。这种器件制作方法简单、成本低、易于集成,可作为少模通信系统的光源,为空分复用系统中发射端的集成化提供了可能。

关键词 光通信;半导体激光器;模式;光学器件

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s206001

InP-Based Few Lateral-Modes Semiconductor Laser

Zhang Limeng Lu Dan Yu Liqiang Pan Biwei Zhao Lingjuan

Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract To meet the demand for the few-modes optical communication system, a few-mode semiconductor laser based on the compressive strain quantum well structure in InP/InGaAsP materials is designed and manufactured. The device can work in the fundamental mode and the 1st order lateral mode depending on the injection current level. The LP_{01} or the LP_{11} modes of a few mode fiber is successfully excited by the few-modes laser. The device is easy to be implemented with low production costs, which provides a new light source choice for few-modes optical communication system. Also this device gives a possibility to realize the integrated emitter in the space division multiplex system.

Key words optical communications; semiconductor lasers; modes; optical devices

OCIS codes 060.4510; 140.5960; 030.4070; 230.0230

1 引 言

随着通信业务的不断普及和互联网的迅猛发展,人们对光纤通信网络的数据带宽的需求不断增长。传统的扩展带宽、提高通信容量的方法主要包括波分复用技术、时分复用技术以及高阶调制格式技术。利用这些技术,通信系统的容量已经超过了 100 Tb/s,频谱效率已经达到了 10 b/s/Hz^[1],接近单模光纤估测的 100 THz 极限^[2-3]。为了克服传统通信系统中单模光纤的不足,近年来,越来越多的研究开始关注基于多芯光纤、少模光纤或多芯少模光纤的空分复用系统,空分复用与传统复用方式的结合可以为超大数据时代的到来提供必要的信道准备^[4-10]。

无论基于哪种光纤类型,空分复用系统中高阶模式的产生仍大多是基于空间光学元件的,即利用传统单模激光器和相位板实现有限阶空间模式^[4-8]的强度分布调节。这种方式对于系统的稳定性、可靠性、可集成性都带来了相当的难度。本文提出并设计制作了可直接激发少模光纤中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的少模半导体激光器。该激光器采用宽脊波导结构,可以通过控制注入电流实现对激光器侧模输出状态的调控,从而实现模

收稿日期: 2015-01-20; **收到修改稿日期:** 2015-03-01

基金项目: 国家 973 计划(2014CB340102)、国家自然科学基金(61274045,61321063)

作者简介: 张莉萌(1990—),女,博士研究生,主要从事 InP 基光子集成技术方面的研究。E-mail:lmzhang@semi.ac.cn

导师简介: 赵玲娟(1964—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事光子集成技术,光信息处理技术方面的研究。

E-mail:ljzhao@semi.ac.cn(通信联系人)

式可切换的少模激光器。

2 器件原理与结构

为实现对少模光纤中各阶模式的激发,需要光源能够产生与少模光纤模式相匹配的激光模式。因此,激光器应能实现不同阶次的横向/侧向模式激励,即激光器应能工作在多横模或多侧模状态。这就需要对传统单模激光器波导的横向/侧向光场限制做重新设计,使之能够支持更高阶模式。

首先采用 PICs3D 软件仿真了不同脊波导宽度所支持模式的变化。图 1 为仿真所建立的多量子阱脊型波导激光器模型示意图。由于光场参数关于脊波导对称,所以仅计算二分之一脊波导宽度(W)中的光场分布。仿真所得的不同脊波导宽度下的各阶模式的近场分布如图 2 所示。近场模式分布用等强度线来表示,10 代表最强,1 代表最弱,图中蓝色虚线为脊宽度的边界线。可以看出,当脊宽为 $3\ \mu\text{m}$ 时[图 2(a)],脊波导中仅支持基模。当脊宽增加至 $5\ \mu\text{m}$ 时[图 2(b)],脊波导同时支持基模和一阶模传输,但不支持二阶模的传输。当脊宽增加至 $7\ \mu\text{m}$ 时,基模、一阶模和二阶模均能够在波导中传输。实验中,选择脊宽为 $5\ \mu\text{m}$,使器件支持基模和一阶模式,同时避免二阶或更高阶模式的激励。

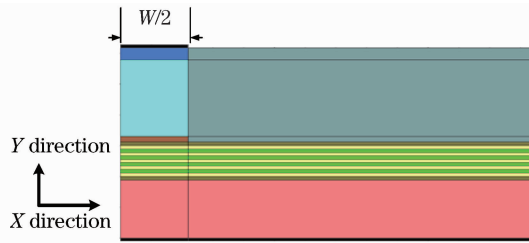


图 1 脊型波导激光器仿真结构

Fig. 1 Simulation schematic of ridge structure laser

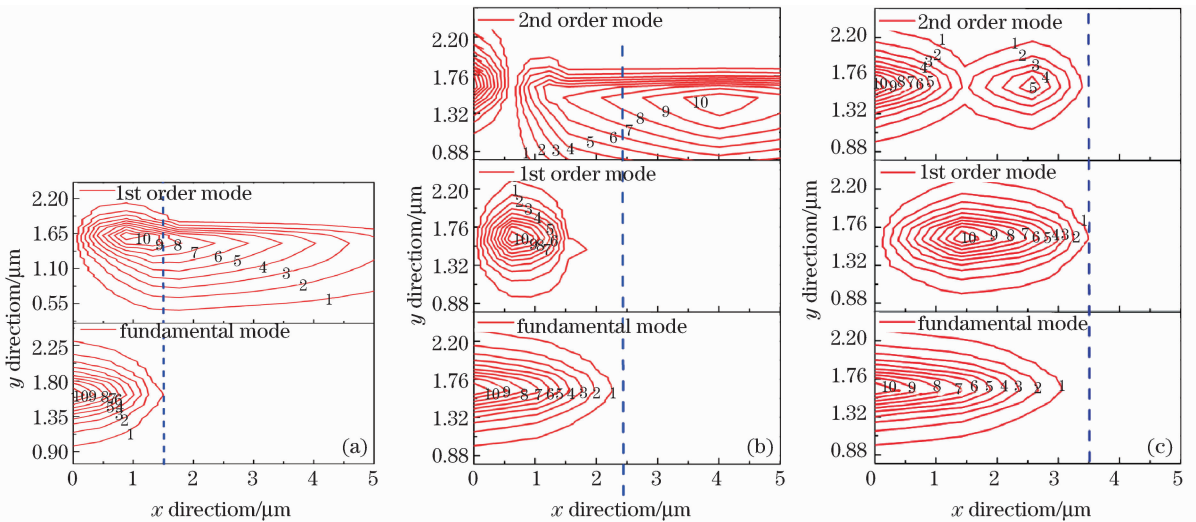


图 2 不同脊宽下各阶模式近场分布图。(a) $3\ \mu\text{m}$; (b) $5\ \mu\text{m}$; (c) $7\ \mu\text{m}$

Fig. 2 Near-field mode distribution of device with different ridge widths. (a) $3\ \mu\text{m}$; (b) $5\ \mu\text{m}$; (c) $7\ \mu\text{m}$

一般来讲,当器件满足激励条件时,基模由于拥有较高的增益和较小的损耗而最先激励。随着注入载流子浓度的增加,波导结构所支持的更高阶侧/横模也将有可能激励。当波导支持一阶侧模运转时,考虑到载流子注入时可能出现的增益竞争、空间烧孔、反波导效应等因素,激光器将存在 3 种工作状态:基模状态、一阶侧模状态以及基模和一阶侧模的混合状态。通过控制激励条件,有可能实现基模和高阶侧/横模的选择性激励。

器件采用脊型波导结构,如图 3(a)所示。通过调节波导的几何形状来控制波导层的有效折射率,设计合理的脊宽 W 和脊高 H 将光场有效地限制在器件有源区的中心位置,降低一阶侧模在谐振腔内的损耗,最终实现激励输出。器件的外延层结构如图 3(b)所示。在传统 InP/InGaAsP 材料体系的脊波导型激光器设

设计方案中,为了抑制高阶侧模和横模,脊宽通常设计为 $3\ \mu\text{m}$ 左右。为产生一阶侧模,在传统设计的基础上,经过仿真验证,通过增加脊宽的方法,将器件的脊宽增加到 $5\ \mu\text{m}$,使之能够支持一阶模运转。

器件的材料结构如图 1(b)所示,各层材料生长在 S 掺杂的 N 型 InP 衬底上。有源区为 InGaAsP/InP 多量子阱结构(MQWs),通过合理的组分控制,使其带隙波长在 $1550\ \text{nm}$ 附件。波导层包含 InGaAsP 分别限制异质结(InGaAsP SCH)和 InP 盖层(InP Cladding),形成光场和载流子的横向限值。InP 盖层上方生长 P^+ -InGaAs 接触层(InGaAs Contact),形成欧姆接触。器件制作中,通过化学腐蚀的办法制作宽度为 $5\ \mu\text{m}$,深度为 $1.8\ \mu\text{m}$ 的浅脊波导。最后利用射频溅射和真空蒸发分别制作 TiAu P-电极和 AuGeNi N-电极。器件测试中,通过自然解理的方法形成谐振腔,两端面反射率均为 0.32 ,器件腔长为 $600\ \mu\text{m}$ 。

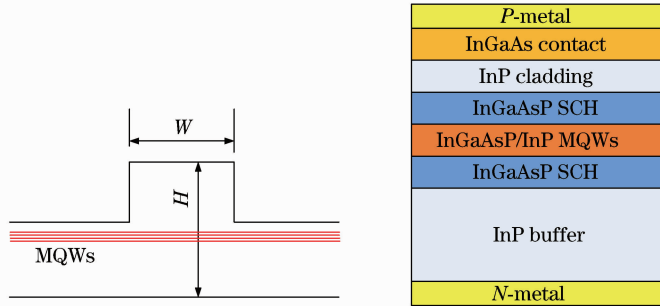


图 3 (a)脊型波导激光器结构;(b)器件外延结构

Fig. 3 (a) Schematic of ridge structure laser; (b) schematic of device epitaxial structure

3 实验结果

首先对解理出的法布里-珀罗(FP)激光器芯片进行基本电学和光学测试,以考察其基本工作特征。图 4 所示为测得少模激光器功率(P)-电流(I)特性及电压-电流特性。可以看出,器件的阈值电流为 $30\ \text{mA}$,斜率效率为 $0.114\ \text{W/A}$ 。在注入电流为 $50\ \text{mA}$ 时, P - I 曲线上出现转折点,这是由于一阶模式的激发所导致的模式跳变点。

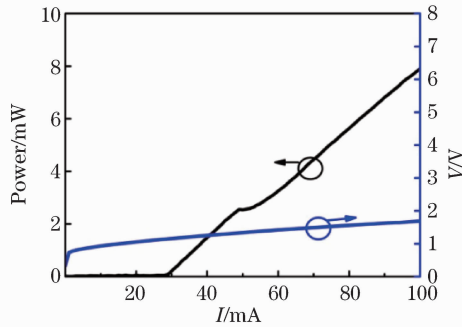


图 4 激光器的 P - I - V 特性曲线

Fig. 4 Schematic of P - I - V characteristic of laser

为确定激光器是否出现了高阶模式激发,通过红外 CCD 对 FP 激光器的近场进行了观测,近场图如图 5 所示。当注入电流在 $50\ \text{mA}$ 以下时,器件工作在基模状态,所测得的近场光斑如图 5(a)所示。当注入电流超过 $50\ \text{mA}$ 时,器件可由基模工作状态转换为一阶模工作状态。图 5(b)为 $80\ \text{mA}$ 注入电流下,所测得的一阶侧模的近场光斑分布图。

以上器件所产生的基模和一阶模式均为波导模式,而实际少模通信系统中,所需要传输的模式为少模光纤所支持的模式。在实验中,将该器件所产生的不同输出模式与少模光纤进行耦合。图 6 为经过少模光纤耦合之后模式的近场光斑测试结果。可以看出,激光器所产生的基模和一阶模能激发出少模光纤中相对应的光纤模式 LP_{01} 和 LP_{11} 模。图 6(a)为器件的基模所激发出的 LP_{01} 模式,图 6(b)为器件的一阶侧模所激发的 LP_{11} 模式。由此,验证了所设计并制作的少模半导体激光器可以应用于实际少模光通信系统。

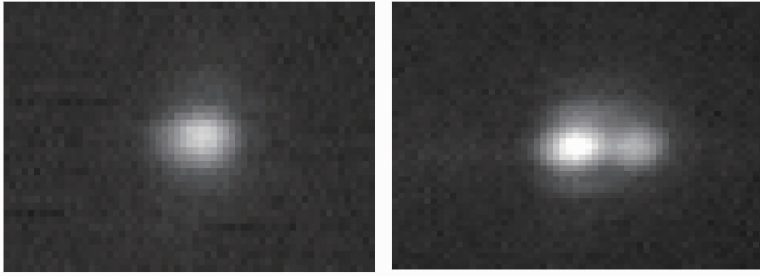


图 5 (a)器件的基模输出近场观测图;(b)器件的一阶侧模输出近场观测图

Fig. 5 (a) Near-field observation of fundamental mode output of device;(b) near-field observation of the 1st order lateral mode output of device

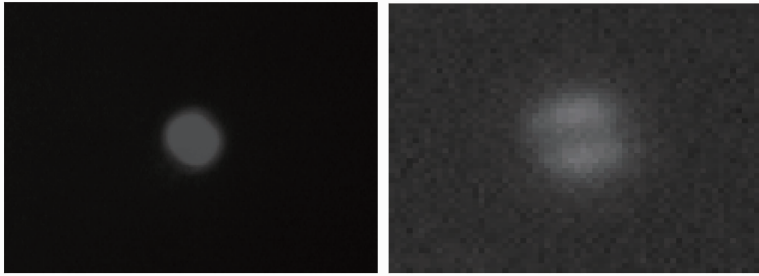


图 6 (a)基模激发出少模光纤 LP_{01} 模式近场观测图;(b)一阶侧模激发出少模光纤 LP_{11} 模式近场观测图

Fig. 6 (a) Near-field observation of LP_{01} mode corresponding to fundamental mode in few-modes fiber; (b) near-field observation of LP_{11} mode corresponding to the 1st order lateral mode in few-modes fiber

4 结 论

仿真设计并制作了一种基于压应变量子阱 FP 结构的少模激光器。通过合理的脊宽设计和腔长控制,该激光器可以在不同的注入电流下实现基模和一阶侧模可转换的激光输出。且该器件所产生的基模和一阶侧模能够激发出少模光纤中的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式。该设计相比于现有空间光学产生少模的方法,具有制作工艺简单、体积小、功耗低、易于集成的特点,为空间复用系统集成化发射端的设计和制作提供了可能。

参 考 文 献

- 1 A Sano, T Kobayashi, S Yamanaka, *et al.*. "102.3-Tb/s (224×548-Gb/s) C- and extended L-band all-raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone[C]. OFC, 2012; PDP5C. 3.
- 2 P P Mitra, J B Stark. Nonlinear limits of the information capacity of optical fiber communication[J]. Nature, 2001, 411: 1027–1030.
- 3 R J Essiambre, G J Foschini, G Karmer, *et al.*. Capacity limits of information transport in fiber-optic networks[J]. Phy Rev Lett, 2008, 101: 163901.
- 4 V A J M Sleiffer, Y Jung, V Veljanovski, *et al.*. 73.7 Tb/s (96×3×256-Gb/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA[J]. Opt Express, 2012, 20(26): B428–B438.
- 5 J Sakaguchi, B J Puttnam, W klaus, *et al.*. 19-core fiber transmission of 19×100×172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s[C]. NFOEC, 2012; PDP5C. 1.
- 6 D Qian, E Ip, M F Huang, *et al.*. 1.05 Pb/s transmission with 109 b/s/Hz spectral efficiency using hybrid single- and few-mode cores[C]. FiO, 2012; FW6C. 3.
- 7 T Mizuno, T Kobayashi, H Takara, *et al.*. 12-core×3-mode dense space division multiplexed transmission over 40 km employing multi-carrier signals with parallel MIMO equalization[C]. OFC, 2014; Th5B. 2.
- 8 T Mizuno, H Takara, A Sano, *et al.*. Multi-core multi-mode dense space division multiplexing for ultra-high spectral efficiency transmission systems[C]. ACPC, 2014; AF1F. 3.
- 9 Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *et al.*. Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 33(9):0906010.
谢意维, 付松年, 张海亮, 等. 少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J]. 中国激光, 2013, 33(9):0906010.
- 10 Chang Yuxin, Hu Guijun, Bai song, *et al.*. Research of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12):1205004.
常玉鑫, 胡贵军, 柏松, 等. 非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12):1205004.