

单片集成 10 信道多波长光源

张 灿 朱洪亮 梁 松 韩良顺 王 圩

(中国科学院半导体研究所半导体材料重点实验室, 北京 100083)

摘要 采用选择区域外延生长技术和对接再生长技术,设计并制作了 10 信道分布反馈激光器阵列与多模干涉耦合器的单片集成器件。器件中采用了新的技术,集成了钛薄膜热电阻用于波长调谐。集成器件烧结到热沉上后,在 25 °C 温控条件下测试,激光器阵列的平均信道间隔为 1.29 nm,阈值电流为 22~30 mA;当激光器注入电流为 200 mA,各信道的平均出光功率为 0.5 mW。集成热电阻的调谐效率约为 5 nm/W,通过施加合适的热电流调谐,该集成器件可以覆盖 34 路信道间隔为 50 GHz 的波长范围。集成器件可单波长选择输出,也可 10 信道同时运作合波输出。

关键词 集成光学; 分布反馈激光器阵列; 选择区域外延生长; 多模干涉耦合器; 光通信

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1202001

Monolithically Integrated 10-Channel Multi-Wavelength Light Sources

Zhang Can Zhu Hongliang Liang Song Han Liangshun Wang Wei

(Key Laboratory of Semiconductors Materials, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, China)

Abstract A monolithic integration of ten distributed feedback lasers with a 10×1 multimode-interference optical combiner using the selective area growth technology is proposed and demonstrated. In the device, Titanium film thermal resistance for wavelength tuning are integrated with a novel procedure. The device is mounted on heat sink and tested at 20 °C. The average channel spacing of the device is 1.29 nm. The average output power of lasers is 0.5 mW with a current of 200 mA and threshold currents of 25~30 mA. The tuning efficiency of integrated thermal resistance is about 5 nm/W. The integrated device can cover 34 channels on the 50 GHz ITU (international telecommunication union) grid with a suitable heating power, which can operate separately or simultaneously.

Key words integrated optics; distributed feedback laser array; selective area growth; multimode-interference coupler; optical communications

OCIS codes 140.2010; 140.3290; 130.3120; 140.3600; 140.6810

1 引 言

光通信系统与网络已成为国家信息基础设施中重要的信息承载平台,其中光子集成(PIC)技术,尤其大规模光子集成技术是未来实现大容量、低功耗光网络的一项解决方案,多波长光子集成芯片将成

为高速率数据传输的重要组成部分^[1-3]。目前国际上已经报道了几种类型的多波长光源,例如多段式分布布拉格(DBR)激光器^[4],阵列波导光栅激光器^[5],分布反馈(DFB)激光器阵列^[6-7]和合波耦合器(MMI)^[8]以及半导体光放大器的集成器件^[9-12]

收稿日期: 2013-07-22; **收到修改稿日期**: 2013-08-22

基金项目: 国家 863 计划(2011AA010303, 2012AA012203)、国家自然科学基金(61021003, 61090392)、国家 973 计划(2011CB301702)

作者简介: 张 灿(1986—),男,博士研究生,主要从事 InP 基光子集成器件方面的研究。

E-mail: zhangcan537@semi.ac.cn

导师简介: 朱洪亮(1957—),男,博士生导师,研究员,主要从事半导体光电子功能集成材料和光子集成器件、电吸收调制激光器、新型光伏材料和太阳能电池等方面的研究。E-mail: zhuhl@semi.ac.cn

等。其中单片集成的 DFB 激光器阵列由于其一系列优点而被广泛应用于现代光波分复用系统。

国外开展的对多波长 DFB 激光器阵列与 MMI 耦合器集成器件的研究时间较早,其制作的 DFB 激光器阵列都是基于最直接的改变布拉格激光波长的方式,即通过电子束曝光直写技术制作不同周期的光栅^[13]和脊倾斜或改变脊宽^[14]。前者费用昂贵且效率较低,不利于大规模生产;后者的制作精度较差,不利于激光波长的精确控制。通过电子束曝光技术制作的多波长 DFB 激光器和 MMI 集成器件的信道间隔一般控制到 200 GHz,信道间隔难以进一步减小。目前国内研究大规模光子集成多波长光源的很少,Zhang 等^[6]已经开展相关研究几年,制作出 4 路 DFB、MMI 和半导体光放大器(SOA)的集成器件。现在采用选区生长技术已经实现信道间隔为 25、50、100 GHz 以及 200 GHz 的 DFB 激光器阵列,其可以实现例如 25 GHz 信道间隔的精确控制,且控制精度高于电子束曝光技术。此外还有几种技术可用以实现多波长激光器阵列,如倾斜或弯曲脊波导^[15],多次曝光技术^[16]以及取样光栅^[17]等。这些技术或者因为工艺容差小,难于实现精确控制;或者因为制作工艺复杂而不利于高集成度、工艺制备复杂的器件制备。

对于大规模激光器阵列集成器件,单模成品率是关键;其次是信道间隔的均匀性。因此需要一种简单且可以精确控制的技术来同时解决这两个问题。基于此,提出了采用选区生长外延(SAG)技术来制备多波长 DFB 激光器阵列的方案。选择区域外延生长是在图形化的衬底上进行材料外延,由于材料只能在没有掩膜图形区域沉积,从而造成一对掩膜图形之间的材料生长速度快于大面积无图形部分,这会导致两个结果:一是量子阱含量的增加改变量子能级,使荧光增益峰值波长红移;二是外延材料厚度的增加使相应脊波导的有效折射率增加。而且掩膜图形(掩膜宽度和生长窗口宽度等)的尺寸决定了材料的生长速率,即可以通过设计制作不同的掩膜图形获得不同有效折射率的波导,然后只需采用常规的全息曝光技术制作均匀光栅即可获得不同的激光波长。由于选区生长外延可以精确控制外延参数,其工艺精度高于后工艺的技术手段,有利于获得均匀信道间隔的激光器阵列,而且其并不增加工艺复杂度,只是在一次外延有源区时在衬底制作图形化的掩膜即可。

采用选择 SAG 技术和对接再生长(BJR)技术

设计并制作了单片集成 10 信道 DFB 激光器阵列和 MMI 耦合器的集成器件。

2 设计和制作

图 1 所示为 10 信道激光器阵列和 MMI 耦合器集成器件的结构图。器件尺寸为 $4000\ \mu\text{m} \times 2750\ \mu\text{m}$,其中 DFB 激光器的长度为 $500\ \mu\text{m}$,相邻激光器之间的间隔为 $250\ \mu\text{m}$,弯曲波导的长度为 $2350\ \mu\text{m}$ 。MMI 耦合器的宽度为 $60\ \mu\text{m}$,长度为 $786\ \mu\text{m}$ 。为了减少光反射增加耦合效率,在输入/输出端引入了宽度渐变的脊波导结构。

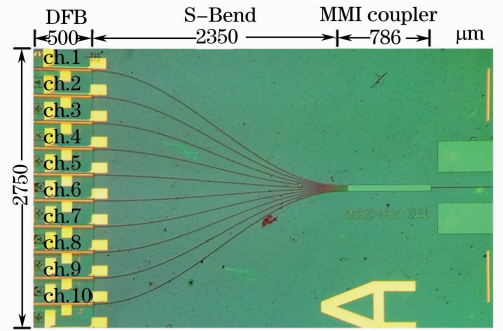


图 1 单片集成器件光学显微镜照片

Fig. 1 Optical microscope picture of the integrated device

制作该集成器件时共需要 3 次金属有机化学气相外延(MOVPE),分别为 SAG 技术、对接再生长技术和盖层、P 接触层的外延。其中 SAG 技术是为了制作多波长的 DFB 激光器阵列,对接再生长技术是为了获得无源区的芯层材料。在 SAG 外延过程中,首先采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)生长一层厚度为 200 nm 的二氧化硅,然后采用光刻技术定义出一组不同掩膜条宽的图形 M ,其中掩膜生长窗口的宽度固定为 $20\ \mu\text{m}$,掩膜条宽 W 以 $1.74\ \mu\text{m}$ 的间隔从 $4.35\ \mu\text{m}$ 增加到 $20\ \mu\text{m}$,构成图形化的衬底,如图 2 所示。图中 C 表示信道, t 表示选区生长的有源区厚度。外延的多量子

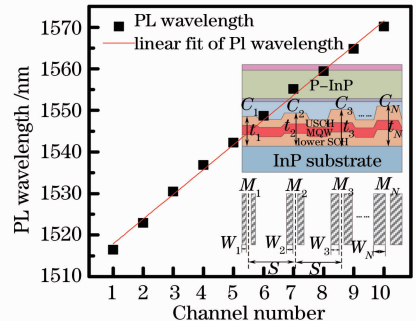


图 2 各信道 PL 谱增益峰值波长分布

Fig. 2 Distribution of PL wavelength for each channel

阱有源区由 80 nm 厚的下分别限制层、6 对压应变的量子阱和 80 nm 的上分别限制层构成。其中大面积区的阱和垒的厚度分别为 5 nm 和 10 nm。在选区外延过程中,生长温度固定为 640 °C,反应室压力为 100 mBar(即 10 Pa)。通过微区光荧光(PL)设备来表征各个选区生长区域的量子阱特性。PL 谱增益峰值波长从 1516 nm 增加到 1570 nm,总的红移量为 54 nm,平均的红移速率为每信道 5.96 nm。

在完成一次 SAG 外延生长后,采用对接再生长技术生长无源的芯层材料。首先,同样生长一层厚度为 200 nm 的二氧化硅层,采用光刻方法定义出有源和无源区,再采用反应离子刻蚀(RIE)工艺选择刻蚀掉无源区域的多量子阱有源区。实验中采用的是 CH_4/H_2 混合气源的低损伤刻蚀工艺,并采用溴基腐蚀液腐蚀界面去除损伤层。然后进行二次外延,生长一层厚度为 300 nm 的体材料($\lambda_{\text{PL}} = 1.2 \mu\text{m}$),构成无源区芯层材料。清洗后,在激光器区上波导层表面采用全息二次曝光技术制备均匀光栅,再进行磷化钨盖层和 P 型接触层外延。DFB 激光器和无源区的脊波导分别采用湿法腐蚀和干法

RIE 刻蚀相结合的方式获得的。DFB 激光器区为湿法腐蚀得到的浅脊波导,而 MMI 及 S 波导为采用 RIE 干法刻蚀获得的深脊波导。最后进行 P 电极和 N 电极制作,完成整个器件工艺。

3 器件性能分析

器件芯片解理后烧结在铜热沉上,利用 TEC 将器件控温在 25 °C 并进行性能测试。用单模透镜光纤耦合进行功率-电流特性以及光谱特性测试。图 3(a)、(b)分别为 DFB 激光器后端和 MMI 前端的光功率特性。激光器的阈值电流在 20~30 mA 之间。DFB 激光器出光端的光功率斜率效率约为 0.13 W/A; MMI 端各信道的平均出光功率为 0.5 mW,斜率效率为 0.0031 W/A。两者的斜率效率差别是由光波导传输过程的功率损失造成的,分别包括对接生长界面的耦合损耗、弯曲波导的损耗以及 MMI 耦合器 10 dB 固有损耗。利用前后的功率差别计算可知,各个信道的总损耗在 15.1~18.4 dB 之间。

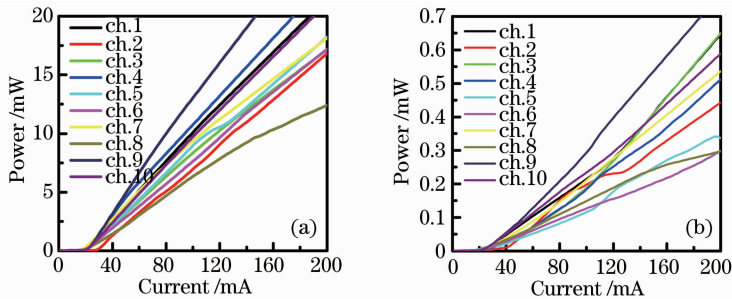


图 3 器件的功率-电流曲线。(a) DFB 激光器出光端;(b) MMI 出光端

Fig. 3 L-I characteristics of the device. (a) DFB facets; (b) MMI output port

利用光纤将出光耦合到光谱仪进行光谱测试,10 个信道的典型叠加输出光谱如图 4(a)所示。从图中可知,所有信道激射光谱的边模抑制比均高于

35 dB,表现出良好的单模特性。为了更好地说明信道间隔的均匀性,计算了各个信道的激射波长分布和线性拟合偏离曲线,如图 4(b)所示。其中,各信

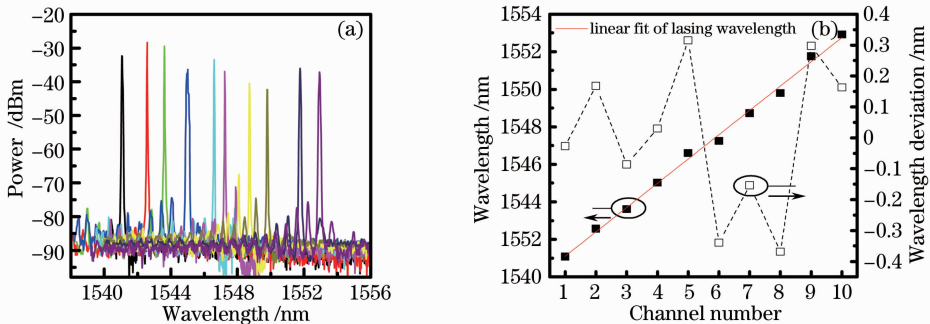


图 4 (a) 器件叠加输出光谱曲线;(b)各信道激射波长分布及偏离线性拟合值

Fig. 4 (a) Superimposed output spectra of the integrated device; (b) wavelength deviation from the fitted value of each channel

道平均间隔为 1.29 nm,各信道激光波长与线性拟合偏离值之差小于 0.4 nm,信道间隔均匀。表明采用选区生长技术制备的激光器阵列,不仅工艺简单、器件成品率高,而且信道间隔十分均匀,对于制作多波长光源具有一定的潜在应用价值。

为了实现匹配到国际电信联盟(ITU)波长的精确调谐,为每一个激光器集成钛薄膜热电阻条。该集成热电阻条技术并不增加器件制作的复杂度,而是在制作 P 面电极时同时形成的。电阻条长为

400 μm ,宽为 12 μm ,距离脊波导距离为 20 μm ,电阻值约为 800 Ω 。经过测试,热电阻条的调谐效率约为 5 nm/W。图 5(a)为热功率调谐下各信道的波长调谐特性。由于各信道的平均间隔只有 1.29 nm,只需要很小的热功率(约 258 mW)即可覆盖所有波长范围。图 5(b)为在合适热功率调谐下,器件能够覆盖 34 信道 50 GHz 间隔的 ITU 波长,具有很宽的波长连续调谐范围。

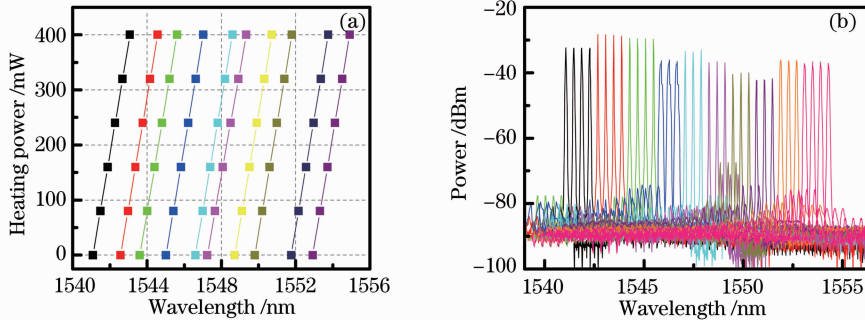


图 5 (a) 各信道波长调谐特性;(b) 热调谐覆盖 34 信道 50 GHz 波长范围

Fig. 5 (a) Tunability of lasing wavelength for each channel; (b) 34 channels on the 50 GHz ITU grid with a suitable heating power

4 结 论

采用选择区域外延生长技术和对接再生长技术,设计并制作了 10 信道分布反馈激光器阵列与多模干涉耦合器的单片集成器件。采用新的技术,集成了钛薄膜热电阻用于波长调谐,可覆盖 34 路信道间隔为 50 GHz 的波长范围。集成器件可以单信道输出,也可 10 信道同时运作合波输出。提出的采用选择区域外延生长技术制作多波长 DFB 激光器阵列的方法,只需要大面积全息制作均匀光栅,从而显著降低工艺制作复杂度和制作成本,并且可以精确控制外延生长参数,有利于批量制作集成器件。集成器件采用后工艺手段集成了钛薄膜热电阻,制作工艺简单且热功率调谐效率高,可用于大范围波长精确调谐。该光子集成器件可作为多路 10 Gb/s 并行直调发射器应用于波分复用光网络系统。

参 考 文 献

- 1 R Nagarajan, M Kato, J Pleumeekers, *et al.*. Large-scale photonic integrated circuits for long-haul transmission and switching [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2007, 6(2): 102–111.
- 2 Wang Qin, Xu Hongchun, Hu Guangwen. Planar lightwave circuit opto-electronic integrated devices for passive optical network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 112301.

汪 钦,徐红春,胡广文.用于无源光网络的平面光波回路光电集成器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 112301.

- 3 Liu Xi, Xue Yuan, Xu Hongchun, *et al.*. Optoelectronic integrated CSFP intelligent transceiver in data communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110602.
- 刘 希,薛 原,徐红春,等.数据通信用光电集成智能化 CSFP 光模块[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110602.
- 4 W Jia, Y Matsui, D Mahgerefteh, *et al.*. Generation and transmission of 10-Gbaud optical 3/4-RZ-DQPSK signals using a chirp-managed DBR laser[J]. *J Lightw Technol*, 2013, 30(21): 3299–3305.
- 5 Y Suzuki, H Yasaka, H Mawatari, *et al.*. Monolithically integrated eight-channel WDM modulator with narrow channel spacing and high throughput [J]. *IEEE J Sel Top in Quant Electron*, 2005, 11(1): 43–49.
- 6 C Zhang, S Liang, L Ma, *et al.*. A modified SAG technique for the fabrication of DWDM DFB laser arrays with highly uniform wavelength spacings [J]. *Opt Express*, 2012, 20 (28): 29620–29625.
- 7 Xie Hongyun, Huo Wenjuan, Jiang Zhiyun, *et al.*. Wavelength selectable DFB laser based on non-uniform multiple quantum wells[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1002002.
- 谢红云,霍文娟,江之韵,等.非统一多量子阱波长可选 DFB 激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1002002.
- 8 Pan Yuzhai, Liu Xiaoli, Su Xiaohui, *et al.*. Tunable large-mode-area fiber lasers based on multimode interference effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402003.
- 潘玉寨,刘晓莉,苏晓慧,等.基于多模干涉效应的可调谐大模场光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402003.
- 9 K Yashiki, K Sato, T Morimoto, *et al.*. Wavelength-selectable light sources fabricated using advanced microarray-selective epitaxy[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(7): 1619–1621.

- 10 L Ma, H L Zhu, S Liang, *et al.*. 1.55- μm InGaAsP/InP laser array monolithically integrated with multimode-interference combiner and SOA using varied width ridge[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(5): 054211.
- 11 H L Zhu, L Ma, S Liang, *et al.*. Four distributed feedback laser array integrated with multimode-interference and semiconductor optical amplifier[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 56(3): 573–578.
- 12 L P Hou, M Haji, J Akbar, *et al.*. CWDM source based on AlGaInAs/InP monolithically integrated DFB laser array[J]. Opt Lett, 2011, 36(21): 4188–4190.
- 13 K Kudo, T Morimoto, K Yashiki, *et al.*. Wavelength-selectable microarray light sources of multiple ranges simultaneously fabricated on single wafer[J]. Electron Lett, 2000, 36(8): 745–747.
- 14 G P Li, T Makino, A Sarangan, *et al.*. 16-wavelength gain-coupled DFB laser array with fine tunability[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(1): 22–24.
- 15 A M Sarangan, W P Huang, G P Li, *et al.*. Selection of transverse oscillation modes in tilted ridge DFB lasers[J]. J Lightw Technol, 1996, 14(8): 1853–1858.
- 16 C E Zah, F J Favire, B Pathak, *et al.*. Monolithic integration of multiwavelength compressive-strained multi-quantum-well distributed-feedback laser array with star coupler and optical amplifiers[J]. Electron Lett, 1992, 28(25): 2361–2362.
- 17 H L Zhu, X D Xu, H Wang, *et al.*. The fabrication of eight-channel DFB laser array using sampled gratings[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(4): 353–355.

栏目编辑:张 腾