

## 单片集成的低暗电流 1.3 $\mu\text{m}$ 激光二极管和探测器芯片

丘文夫<sup>1,2</sup>, 林中晔<sup>1</sup>, 苏 辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了在单片上实现半导体激光二极管与探测器的集成, 开展了外延材料生长及结构工艺的设计研究。通过刻蚀工艺引入隔离区的方法制备了集成背光探测器的 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 半导体激光二极管芯片。管芯的光电性能测试显示, 激光二极管具有较低的阈值电流 17.62 mA, 较高的斜率效率 0.13 mW/mA, 输出功率可达 11 mW; 在 -0.7 V 的反向偏压下, 探测器区域对光信号具有良好的线性响应, MPD 的光电流超过 0.3 mA, 在 -1.7 V 的反向偏压下, 暗电流可低至 25 nA。

**关键词:** 半导体激光二极管; 背光探测器; 隔离区; 低暗电流

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1220003

## Monolithically integrated low dark current 1.3 $\mu\text{m}$ laser diode and detector chip

Qiu Wenfu<sup>1,2</sup>, Lin Zhongxi<sup>1</sup>, Su Hui<sup>1</sup>

(1. Fujian Institute of Research on the Structure, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350000;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** In order to realize the integration of semiconductor laser diodes and detectors on a single chip, the research on the epitaxial material growth and structural process was carried out. A 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP semiconductor laser diode chip with integrated monitoring photo diode (MPD) was fabricated by introducing an isolation region using an etching process. The photoelectric performance test of the chip shows that the laser diode has a low threshold current (17.62 mA) and high slope efficiency (0.13 mW/mA); the output power can reach 11 mW. In addition, under a reverse bias of -0.7 V, the detector region has a good linear response to the optical signal and the photocurrent of the MPD exceeds 0.3 mA, and the dark current can be as low as 25 nA with a reverse bias of -1.7 V.

**Key words:** semiconductor laser diode; monitoring photo diode; isolation region; low dark current

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014202)

作者简介: 丘文夫(1992-), 硕士生, 主要从事半导体光电子集成方面的研究。Email: qiuwenfu15@mailsucas.ac.cn

导师简介: 苏辉(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事半导体量子点激光器方面的研究。Email: huisu@fjirsm.ac.cn

## 0 引言

半导体激光二极管由于其体积小,效率高,简单的泵浦方式,使得其在激光通信,光存储,光陀螺,激光打印方面有重要的应用<sup>[1-3]</sup>。在 1978 年,半导体激光二极管就开始应用于光纤通讯<sup>[4]</sup>系统(OFCs),此后,许多半导体器件,包括:波分复用器,时分复用器等都用于此。为了适应更高要求,半导体激光二极管已经可与探测器,FET,HBT,EAM,SOA 等集成<sup>[2-10]</sup>。在大容量通信中,单片光电集成电路和光子集成已经成为研究热点,激光二极管的特性由背光探测器(Monitoring Photo-diode, MPD)监测,并通过反馈电路对其进行调控。在过去三十年中,国内外都在半导体激光二极管与探测器的集成方面开展了相关研究<sup>[1-15]</sup>。国内 Chiyi-DaYang<sup>[11]</sup>等人,采用的结构,将 MPD 集成在激光二极管侧方,并在器件间用 SiN 填充,光电流达到 0.3 mA。国外研究主要应用于干法刻蚀,并采用 Cl<sub>2</sub> 或 XCl<sub>x</sub> 做刻蚀气体将器件集成一块,但由于其刻蚀面难以保持激光二极管谐振腔的垂直,因此其器件特性不佳,光电流较难达到 0.3 mA。值得注意的是,国内外的研究均未对集成器件探测器暗电流进行测试,而在激光通信中,探测器做为检测激光器性能的重要元件,除了需要具有较高的灵敏度、线性响应特性外,低暗电流也是一个重要评价指标。在半导体光电探测器中,暗电流<sup>[9]</sup>是样品在外延生长中引入的晶格缺陷(体表以及体内)以及器件制备工艺中引入的晶格损伤(如刻蚀)导致的局部击穿漏电效应。暗电流,更确切的说漏电流会产生噪声,降低探测器的信噪比,通常商用探测器的暗电流在 0.3~1 nA 量级<sup>[13]</sup>。对于集成芯片,暗电流过大,会影响探测芯片对激光二极管的监测效果,此外,激光二极管在工作时,其光电信号也会经由漏电流对探测器产生影响,所以低暗电流(nA 量级)在集成芯片中也是一个重要参数。因此开展半导体激光二极管与背光探测器的集成研究,在保持激光二极管正常激射特性的同时通过集成高性能探测器监测激光二极管性能,对满足高质量通信需求具有十分重要的意义。

文中在现有的半导体激光二极管与背光探测器集成工艺基础上,设计并制备了 1 310 nm 波段激光

二极管与背光探测器的集成芯片,其具有低暗电流、高斜率效率、低阈值电流及高响应度的特点。器件采用量子阱外延结构,采用 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 做刻蚀气体,通过调整芯片上激射部分与探测部分比例,结合隔离<sup>[15]</sup>区的设计来研究集成芯片的光电特性。

## 1 器件设计与工艺

文中设计的器件有源区采用量子阱结构,通过 MOCVD 在 InP (100) 方向依次生长 n-InP 衬底,n-InP 缓冲层,SCH-InGaAsP 下势垒层,InGaAsP 有源层,SCH-InGaAsP 上势垒层,p-InP 腐蚀停止层,p-InGaAsP 接触层,和最后一层 p-InP 盖层。外延结构如图 1 所示。在上述外延结构中,采用湿法,干法刻蚀分别对器件进行工艺的制作。其中干法刻蚀采用 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 代替传统的 Cl<sub>2</sub> 或 XCl<sub>x</sub> 对器件的隔离区进行刻蚀,以保证隔离区中激光器的垂直刻蚀,从而不破坏激光二极管谐振腔面,进而使激光二极管正常激射。

p-InP cap layer
p-InP contact layer
p-InGaAsP etching stop layer
SCH-InGaAsP
Active layer
SCH-InGaAsP
n-InP buffer layer
n-InP substrate

图 1 1.3 μm InGaAsP/InP 半导体集成芯片外延结构示意图

Fig.1 Epitaxial structure of 1.3 μm InGaAsP/InP semiconductor integrated chip

器件结构和波导结构如图 2、3 所示。器件采用脊型波导结构,其中脊宽 3.2 μm,脊高 1.7 μm,器件总腔长 770 μm,其中上端放大区为 600 μm,隔离区有效长度 10 μm,下端探测区 120 μm。为保证刻蚀面激光二极管谐振腔面不受破坏,先采用湿法腐蚀到腐蚀停止层,然后采用氢气和甲烷干法刻蚀。器件结构制作完后,采用电子束蒸发在 P 面蒸镀 Ti/Pt/Au 作为 P 面金属,N 面先减薄至 110 μm,然后同样采用电子束蒸发 GeAu/Ni/Au 作为 N 面金属。最后解条后通过金属镀膜机在出光面镀 HR 高透膜,背光面镀 AR 抗反膜。

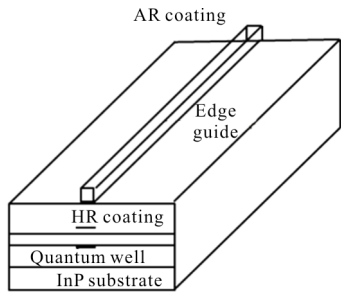


图 2 多量子阱激光二极管集成探测器结构示意图

Fig.2 Schematic structure of MQW LD integrated MPD

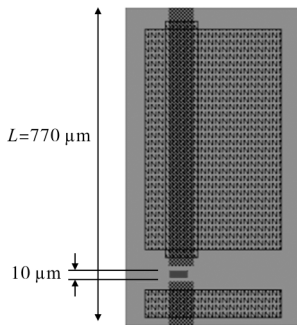


图 3 多量子阱激光二极管集成探测器隔离区波导示意图

Fig.3 Schematic structure of MQW LD integrated MPD

waveguide with isolation

## 2 实验结果与讨论

在室温条件下(25 ℃),采用自动测试平台对激光器和探测器的性能进行测试并分析。

### 2.1 激光二极管性能测试

器件的输出功率特性曲线、斜率效率特性曲线如图 4(a)所示。随着注入电流的不断增加,在17.62 mA时,激光器开始激射。从图中可以看出,在工作电流100 mA时,激光二极管的输出功率可达11 mW,并且呈上升趋势,斜率效率达0.13。测试结果说明激光二极管正常并且稳定输出,采用干法刻蚀并未破坏激光二极管谐振腔面,使得激光二极管的谐振腔面正常谐振并工作。

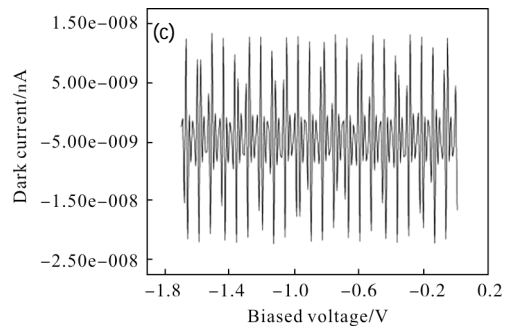
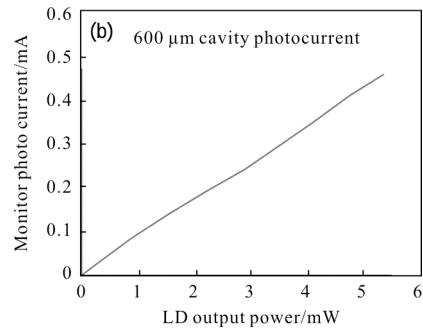
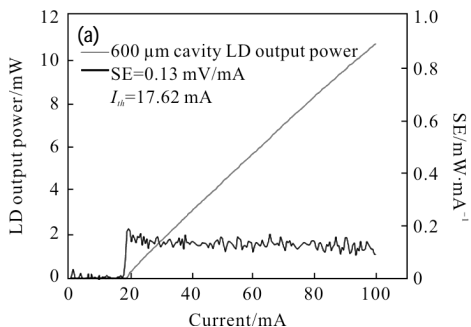


图 4 室温(25 ℃)下(a)LD 的 LIV 曲线;(b)MPD 光电流随光功率变化曲线;(c)MPD 暗电流随反偏压变化曲线

Fig.4 (a) LIV curve of LD; (b) Curve of MPD photocurrent with optical power; (c) Curve of MPD dark current with reverse bias, at room temperature(25 ℃)

### 2.2 探测器性能测试

利用 Keithly、探针平台、探测器等搭建测试平台,测试 MPD 性能随光功率(注入电流)变化及暗电流的测试。测量系统如图 5 所示。由 Keithly 2 注入

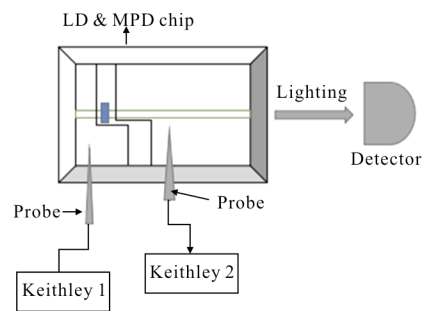


图 5 光电流及暗电流测试实验装置图

Fig.5 Schematic of testing photo-current and dark current

不同的电流,探测器探测其出光功率,当探测器检测到由光功率时,Keithly 1 测试 MPD 光电流随光功率(注入电流)的变化,如图 4(b)所示。当激光二极管出光后,调节注入电流为 20、25、30、35、40、45、50、55、60 mA,从图中可以看出,MPD 的光电流随光功率(注入电流)线性增加,在光功率达 4 mW 左右时,光

电流已达 0.3 mA,并随着注入电流的增加线性增加,其响应度可达 0.1 mA/mW。关闭 Keithley 2 对激光二极管的电流注入时,激光二极管停止激射,此时通过 Keithley 1 对 MPD 加反向偏压,从 0~-1.7 V(每隔 0.01 V),用 Keithley 2 探测激光二极管 MPD 器件区间的暗电流如图 4(c)所示。从图中可以看出,在 -0.2~-1.7V 的偏压下,暗电流在  $-2.5 \times 10^{-8}$ ~ $1.5 \times 10^{-8}$  A 的区间变化,最小可达 25 nA。由此可以说明隔离区采用 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 刻蚀,保证了很好的隔离效果,使得该器件都有很好的性能特性,暗电流较低,不会影响 MPD 光电流对激光二极管的检测。

由此说明,首先器件的有源区采用量子阱结构,使得激光二极管能有很好的激射性能。器件将 MPD 激光二极管集成到一块,通过采用 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 对隔离区进行刻蚀可在不破坏激光二极管的谐振腔面,使得激光二极管正常输出,并且保持低阈值(17.62 mA),高的斜率效率(0.13),输出功率可达 11 mW,并且探测器也能对激光二极管较好地响应,其光电流随光功率呈线性响应,在光功率 4 mW 左右,光电流达 0.3 mA。干法刻蚀将隔离区的引入,使得激光二极管与 MPD 较好地隔离,暗电流仅 25 nA,相对于光电流和激光二极管阈值电流下,可忽略其对探测性能的影响,保证激光二极管与探测器工作的独立性。

### 3 结 论

文中采用有源区量子阱结构,通过设计激光器腔长(600 μm)与 MPD(120 μm)为 5:1 的结构,利用干法刻蚀引入隔离区将中心波长为 1 310 nm 激光二极管与背光探测器集成一体,并测试其器件性能。结果表明,采用干法刻蚀引入的隔离区能较好地将两个器件隔离开,并保持刻蚀面激光二极管腔面的垂直,使得激光二极管正常谐振并激射出激光。显示出激光二极管阈值电流低,斜率效率高,出光功率高;MPD 对激光二极管激光的线性响应,光功率 4 mW 左右时,便达 0.3 mA;并且在 -1.7 V 的反向偏压下,暗电流低至 25 nA。目前,MPD 的响应度不是很高,下一步需要继续优化设计和工艺,改善隔离区,增加响应度,提高 MPD 的监测能力。

### 参考文献:

- [1] Kim D C, Kown O K, Kim H S, et al. Experimental comparison between front-side and rear-side signal-monitoring in RSOA transistor outline can modules with monitor-photo diode and thermo electric cooler [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(20): 1527-1529.
- [2] Wang De, Li Xueqian. Latest development and applications of semiconductor lasers [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283. (in Chinese)
- [3] Hai Yina, Zou Yonggang, Tian Kun, et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers[J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)
- [4] Wu Guiying. The development of optical communication [J]. Optics and Precision Engineering, 1978(2): 65-67. (in Chinese)
- [5] Kobayashi W, Arai M, Yamanaka T, et al. Design and fabrication of 10 -/40 -Gb/s, uncooled electroabsorption modulator integrated DFB laser with butt-joint structure[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(1): 164-171.
- [6] Shinoda K, Makino S, Kitatani T, et al. InGaAlAs-InGaAsP heteromaterial monolithic integration for advanced long-wavelength optoelectronic devices [J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 2009, 45(9): 1201-1209.
- [7] Takahashi H, Shimamura T, Sugiyama T, et al. High-power 25 Gb/s electroabsorption modulator integrated with a laser diode[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(10): 633-635.
- [8] Yang J, Bhattacharya P, Wu Z. Monolithic integration of InGaAs-GaAs quantum-dot laser and quantum-well electroabsorption modulator on silicon [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(10): 747.
- [9] Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Su Bin, et al. Impact of dark current on SWIR polarimetry accuracy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2375-2381. (in Chinese)
- [10] Gong Haime, Liu Dafu. Developments and trend in spaceborne infrared detectors. [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 19-24. (in Chinese)
- [11] Matsui T, Sugimoto H, Ohtsuka K, et al. GaInAsP/InP mass transport laser monolithically integrated with photo-detector using reactive ion etching [J]. Electron Lett, 1989, 25(15): 955-956.
- [12] Dutta N K, Cella T, Zilko J L, et al. Monolithically integrated laser/photo-diode [J]. Electron Lett, 1988, 24(6):

- 355-356.
- [13] Yang Chyida, Lei Pohsun. Lateral power -monitoring photodiode monolithically integrated into 1.3  $\mu\text{m}$  GaInAsP laser[J]. Solid-State Electronics, 2012, 67(1): 63-69.
- [14] LUXNET corporation. 1 310/1 550 nm Power-Monitor PIN. [EB/OL]. [2017 -12 -09]. [http://www.luxnetcorp.com.tw/datasheet\\_files/D10A-7025%20\\_version3.1\\_%5B3%5D.pdf](http://www.luxnetcorp.com.tw/datasheet_files/D10A-7025%20_version3.1_%5B3%5D.pdf)
- [15] Xu Lefei, Liu Dafu, Gong Haimei, et al. Low temperature spectroscopy quantification of integrated dual band chip package[J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 744-751. (in Chinese)