

# 光子晶体垂直腔型表面发射和接收光电子器件\*

宋 倩<sup>1,2,†</sup> 许兴胜<sup>2</sup> 胡海洋<sup>2</sup> 鲁 琳<sup>2</sup> 王春霞<sup>2</sup> 杜 伟<sup>2</sup> 刘发民<sup>1</sup> 陈弘达<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学理学院, 北京 100083)

(2 中国科学院半导体研究所 光电子研发中心, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了制作光子晶体垂直腔面发射激光器实验研究的主要内容, 包括材料的光谱测试分析、氧化工艺以及制作光子晶体等, 成功制作了波长在 980nm 附近的光子晶体垂直腔面发射激光器. 在此基础上, 采用高精度湿法腐蚀和感应耦合等离子体干法刻蚀技术, 研究制作了基于垂直腔面发射激光器外延材料的光子晶体谐振腔增强型探测器.

**关键词:** 光子晶体; 垂直腔面发射激光器; 光子面阵集成; 谐振腔增强型光电探测器

**PACC:** 4270Q

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0509-04

## 1 前言

光子晶体垂直腔面发射激光器 (photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers, PC-VCSEL) 和光子晶体谐振腔增强型探测器 (photonic crystal resonant cavity enhanced photodiode, PC-RCEPD) 都属于垂直腔型光电子器件, 基本结构都是在谐振腔中插入较薄的有源区或吸收区, 在顶部的分布布拉格反射镜上制作二维光子晶体, 并利用谐振腔的高品质因子改善光电子器件性能. 垂直腔型光电子器件具有易于制备二维阵列, 实现发射、接收一体化以及高密度光电子集成的特点, 因此近年来备受关注, 研究进展十分迅速.

光子晶体垂直腔面发射激光器是一种新型激光器<sup>[1]</sup>. 其结构除了在顶部反射区域中采用光子晶体限制出光孔之外, 其他都与标准的垂直腔面发射激光器一样, 如图 1 所示. 光子晶体垂直腔面发射激光器中的光子晶体起到横向模式控制的作用, 是一种基于光子晶体光纤的结构, 其作用是使模式杂乱的垂直腔面发射激光器工作在单横模; 通过增大光子晶体的出光孔径不仅可以提高出光功率, 还能降低热电阻, 从而改善激光器的热特性和高速调谐特性; 且易于实现阵列集成, 光纤的耦合效率高, 是并行光互连和光通信的理想光源.

选择与 PC-VCSEL 相适合的光子晶体谐振腔增强型探测器是其应用于光互连技术中的一个重要

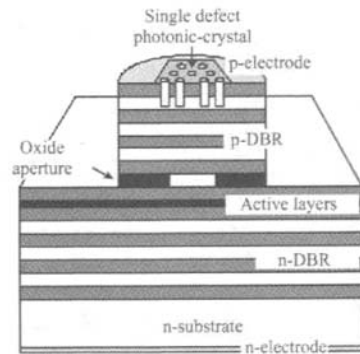


图 1 光子晶体垂直腔面发射激光器结构图  
Fig. 1 Diagram of PC-VCSEL structure

问题. 基于 PC-VCSEL 结构研制出 PC-RCE 探测器, 可与 PC-VCSEL 器件单片集成, 使光互连技术中光发射与光接收器件的集成化更为简单易行. 光子晶体谐振腔增强型探测器具有波长选择性、高量子效率和高响应速度等优点, 如图 2 所示. 与光子晶体垂直腔面发射激光器中光子晶体的作用相同, 光子晶体 RCE 探测器中的光子晶体也起到了限制光和电流的作用.

本文主要研究光子晶体垂直腔面发射激光器和光子晶体谐振腔增强型探测器的制备工艺, 包括光谱测试、氧化和光子晶体制作等工艺, 并对测试结果进行了分析.

\* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60345008, 60377011, 60537010)

† 通信作者. Email: michael@red.semi.ac.cn

2006-11-20 收到, 2006-12-11 定稿

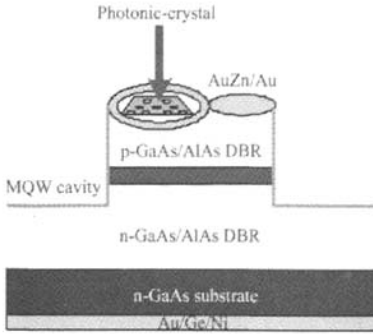


图 2 光子晶体谐振腔增强型探测器结构图  
Fig.2 Diagram of PC-RCEPD structure

## 2 实验

我们制备了具有 InGaAs/GaAs 量子阱吸收区的 GaAs 基光子晶体垂直腔面发射激光器和谐振腔增强型光电探测器,工作波段在 980nm.在成功制备 PC-VCSEL 的基础上,还进一步研究制作了基于 PC-VCSEL 结构的 PC-RCE,分别采用高精度湿法腐蚀技术和 ICP 干法刻蚀技术结合 CCD 检测系统来制备光子晶体探测器<sup>[2]</sup>.

### 2.1 光谱测试

图 3 是制作光子晶体垂直腔面发射激光器材料的 DBR 反射谱、谐振腔腔模和光致发光谱.图中的虚线是测量的有源区量子阱的增益谱,PL 谱的中心波长在 971nm.由于很难直接从外延片的反射谱中测量到腔模,因此通过腐蚀顶部 DBR 而测量的谐振腔腔模在 1000nm.谐振腔的腔模与 PL 谱的中心波长有偏差,原因可能是由于 DBR 生长的不均匀性,使得材料底部 DBR 与顶部 DBR 反射相位匹配偏离所致.通过调整结构参数,使得激光器的谐振腔腔模在 DBR 高反射带中心左右并与量子阱增益谱峰值相一致.

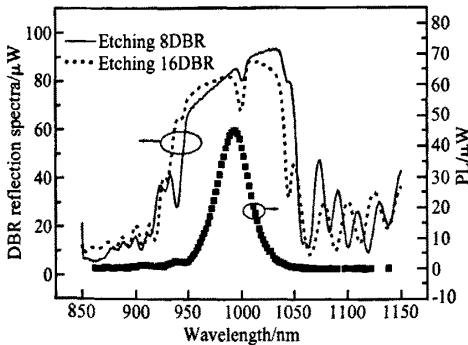


图 3 材料谐振腔模式和光致发光谱  
Fig.3 Cavity mode and PL spectrum of GaAs materials

### 2.2 氧化工艺

对 AlGaAs 的氧化是制备垂直腔面发射激光器的关键工艺,图 4 是氧化温度在 460℃ 时,氧化速率与氧化深度的关系曲线,这种变化关系可以有效控制氧化孔的直径.图中的插图是氧化深度随氧化时间的变化关系.曲线明显呈线性关系,即随着氧化时间的延长,侧向氧化深度会越来越深.

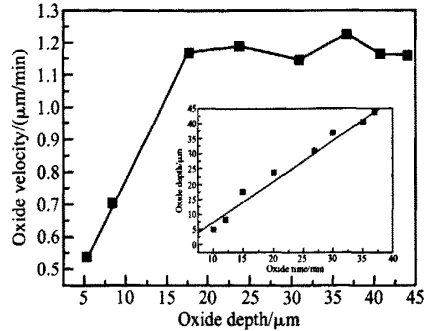


图 4 460℃ 氧化速率与氧化深度的变化关系 插图是氧化深度随时间的变化.

Fig.4 Characteristic of oxidized velocity versus oxidized depth at 460℃ The inset is the characteristic of oxidized depth versus oxidized time.

### 2.3 光子晶体制作

采用电子束曝光和感应耦合等离子体干法刻蚀技术制作光子晶体,研究发现<sup>[3]</sup>在相同的条件下,孔的直径影响刻蚀深度,孔径越大,刻蚀的孔越深.如果孔刻蚀得很浅,那么就没有足够的折射率差,光也不能限制在中心区域,氧化孔还会产生高阶模式.如果孔刚好刻蚀到有源层,则在中心缺陷区域形成单模.实验中氧化孔的尺寸保留较大(21μm×21μm),是为了避免小尺寸的氧化孔起到电流限制作用而影响光子晶体限制模式.当氧化孔足够小时,光子晶体的限制作用没有氧化孔限制的作用强,此时激光模式由氧化孔决定而不是由光子晶体的微腔决定.

## 3 测试结果

图 5 是 980nm PC-VCSEL 的 P-I 特性曲线.晶格常数分别是 5,3 和 2.5μm,具有相同的光子晶体孔径 0.75μm.相比传统的 VCSEL,PC-VCSEL 的输出功率随着占空比的减小而增大,而阈值电流随着占空比的减小而减小,可见不同的光子晶体参数对 PC-VCSEL 特性的影响很大.图 6 是 980nm 波长 PC-VCSEL 的光谱特性,其峰值波长为 973nm,光谱谱线半高宽为 2~3nm.

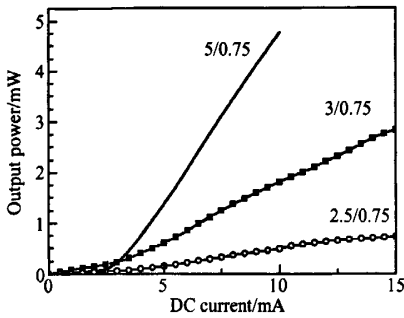


图5 980nm PC-VCSEL 的 P-I 特性

Fig.5 Characteristic of power versus current of PC-VCSEL at about 980nm wavelength

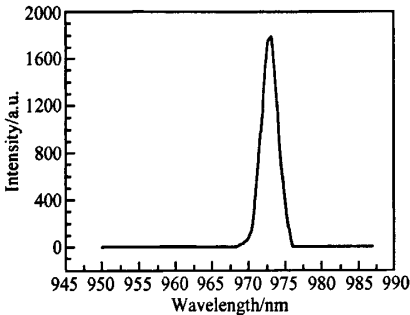


图6 980nm PC-VCSEL 光谱

Fig. 6 Optical spectrum of PC-VCSEL at about 980nm wavelength

在适于制备 PC-VCSEL 外延结构的基础上,我们尝试用高精度湿法腐蚀技术和 ICP 干法刻蚀技术改变入射 DBR 的反射率来得到量子效率峰值和半宽优化兼容的 PC-RCE 探测器. 测量了利用该外延结构,直接制成 PC-RCE 探测器的光电流谱,以及通过精确腐蚀改变顶部 DBR 对数以后,所制成 PC-RCE 探测器的光电流谱.与直接用 PC-VCSEL

外延片制成的探测器相比,通过去掉12对顶部DBR优化得到的基于 PC-VCSEL 的 PC-RCE 探测器,光电流谱的响应并没有明显增强,原因是在选定波长处没有获得极大增强的量子效率,还需要对顶部 DBR 进一步优化,才能得到文献[4]的结果.

## 4 结论

我们实现了基于 GaAs 量子阱有源材料的光子晶体垂直腔面发射激光器的室温连续激励,工作波长在 980nm 左右,采用电注入的泵浦方式.在此基础上还进一步探索了基于光子晶体垂直腔面发射激光器结构的光子晶体谐振腔增强型光电探测器的研究工作.由于光子晶体垂直腔面发射激光器可以实现大出光孔径、较高的出光功率、稳定的单模、多芯传输,而且由于氧化孔的直径较大,可以降低热电阻,从而改善激光器的热特性和高速调谐特性,从而为我国实现拥有自主知识产权的二维光信息处理的性能优良的激光器光源、光子面阵集成以及单片集成而作出贡献.

## 参考文献

- [1] Song D S, Kim S H, Park H G, et al. Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers. *Appl Phys Lett*, 2002, 80:3901
- [2] Liang Kun, Yang Xiaohong, Wu Ronghan. GaAs based RCE photodetectors. *Acta Photonic Sinica*, 2002, 31 (Z2): 345 (in Chinese)[梁琨, 杨晓红, 吴荣汉. GaAs 基谐振腔增强型光电探测器. *光子学报*, 2002, 31 (Z2): 345]
- [3] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 9:1439
- [4] Liang Kun, Chen Hongda, Du Yun, et al. Performance analysis of RCE photodetectors with VCSEL structure. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13 (9): 877 (in Chinese)[梁琨, 陈弘达, 杜云, 等. 基于 VCSEL 的 RCE 探测器光电响应特性. *光电子·激光*, 2002, 13 (9): 877]

## Photonic Crystal Vertical Cavity Surface Emitting and Detecting Photodiodes\*

Song Qian<sup>1,2,†</sup>, Xu Xingsheng<sup>2</sup>, Hu Haiyang<sup>2</sup>, Lu Lin<sup>2</sup>, Wang Chunxia<sup>2</sup>, Du Wei<sup>2</sup>,  
Liu Famin<sup>1</sup>, and Chen Hongda<sup>2</sup>

(1 *School of Science, Beihang University, Beijing 100083, China*)

(2 *Optoelectronics R&D Center, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers was obtained under continuous operate at about 980nm wavelength. The experiments research, such as the spectrum analysis of GaAs materials, the oxidized processing and the photonic crystal fabrication, are detailed presented. A photonic crystal resonant cavity enhanced photodiode, which was based on the same materials of PC-VCSEL, was fabricated by wet-chemical etching and ICP etching techniques.

**Key words:** photonic-crystal; VCSEL; photon surface-integrating; RCE photodiode

**PACC:** 4270Q

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0509-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60345008, 60377011, 60537010)

† Corresponding author. Email: michael@red.semi.ac.cn

Received 20 November 2006, revised manuscript received 11 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics