

## 质子注入型光子晶体垂直腔面发射激光器制备

蒋国庆<sup>1</sup>, 徐 晨<sup>1</sup>, 解意洋<sup>1,2</sup>, 荀 孟<sup>1</sup>, 曹亚鹏<sup>2</sup>, 陈弘达<sup>2</sup>

- (1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124;
2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘 要:** 在光子晶体垂直腔面发射激光器中采用质子注入工艺, 使台面工艺变成纯平面工艺, 降低了光子晶体结构制备难度, 简化了器件制备, 提高了器件的均匀性。质子注入型光子晶体垂直腔面发射激光器中的光子晶体结构, 在电流限制孔小于光子晶体缺陷孔时, 仍能控制器件光束及模式特性, 该结果可用于优化器件阈值电流, 制备高性能低阈值电流基横模器件。实验所设计制备的器件, 在注入电流小于 12.5 mA 时, 阈值电流 2.1 mA, 出光功率大于 1 mW, 远场发射角小于 7°, 有效验证了光子晶体结构在质子注入型面发射激光器中的光束改善及模式控制作用。

**关键词:** 质子注入; 光子晶体; 垂直腔面发射激光器

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1205001

## Fabrication of proton-implanted photonic crystal vertical cavity surface emitting laser

Jiang Guoqing<sup>1</sup>, Xu Chen<sup>1</sup>, Xie Yiyang<sup>1,2</sup>, Xun Meng<sup>1</sup>, Cao Yapeng<sup>2</sup>, Chen Hongda<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Semiconductors, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By introducing the proton implantation(PI) process in the photonic crystal(PhC) vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) fabrication to confine the injection current in the devices can make the mesa process become pure plane technology. It reduced the fabrication difficult of the photonic crystal structure, simplified the fabrication processes, and improved the  $L-I-V$  characteristics uniformity of the devices. In the PI-PhC-VCSEL, the photonic crystal structure can control light beam and mode characteristics of the devices, when the current injection hole diameter is less than the center defect diameter of the photonic crystal. This effect in the PI-PhC-VCSEL can be used to optimize the threshold current and enhance the performance of the devices; it also can be used to realize high output power low threshold current single fundamental mode PI-PhC-VCSELs. A device with threshold current of 2.1 mA, output power larger than 1 mW, the divergence angle less than 7° was designed and

收稿日期: 2016-04-21; 修订日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61376049, 61076044, 61107026, 61204011); 北京市自然科学基金(4132006, 4102003, 4112006); 高等学校博士学科点专项科研基金(20121103110018); 北京市教委创新能力提升计划(PXM2013\_014204\_000029)

作者简介: 蒋国庆(1989-), 男, 硕士生, 主要从事半导体垂直腔面发射激光器阵列光束操控方面的研究。Email: W252314026@126.com

导师简介: 徐晨(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体垂直腔面发射激光器和石墨烯材料在光子电子器件中的应用方面的研究。Email: xuchen58@bjut.edu.cn

produced. The device can operate with single fundamental mode with the injection current less than 12.5 mA and the effect of the photonic crystal in the PI-VCSEL has been demonstrated.

**Key words:** proton-implanted; photonic crystal; VCSEL

## 0 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 以其动态单纵模、低阈值电流、高光束质量(圆形光斑)、易于二维阵列集成等优点,在短距离光通信<sup>[1]</sup>、光互连<sup>[2]</sup>、光存储等领域有着广泛的应用。然而普通 VCSEL 由于横向尺寸较大,横模限制较弱,其中存在多个横向模式,彼此之间交叠,竞争强烈,严重影响器件工作特性,因此改善 VCSELs 横向模式,实现激光器高功率基横模工作<sup>[3-4]</sup>,成为 VCSELs 领域研究的关键。光子晶体<sup>[5-9]</sup>作为一种新型微纳光学结构,将其引入到 VCSEL 中,可有效控制器件的模式特性,是目前公认最具有潜力的基横模高功率 VCSEL 制备方法之一。

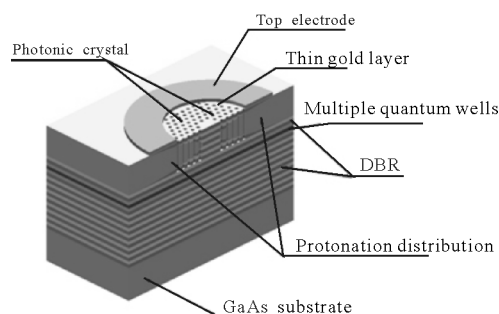
常用的光子晶体 VCSEL 主要采用氧化限制结构<sup>[10-11]</sup>(氧化孔)来控制器件的注入电流和出射光模式,氧化限制层通常位于上分布布拉格反射镜(DBR)与有源区之间,需要先利用光刻、感应耦合离子刻蚀等工艺将其裸露出来,才可以通过选择性湿法氧化制备氧化孔,达到对器件的电流和模式控制。由于湿法氧化工艺易受氧化炉温度、气体流量和水温等外界因素影响,氧化型 VCSEL 具有制备工艺复杂、均匀性差、成品率低等特点<sup>[12-16]</sup>。质子注入相对于湿法氧化工艺除了具有平面工艺、均匀性好、工艺简单,且制备出的 VCSEL 具有易于制备光子晶体结构等优势<sup>[12-13]</sup>。

文中通过将质子注入工艺引入到光子晶体 VCSEL 制备中,实现了器件的纯平面制备,降低了 VCSEL 端面制备光子晶体结构难度,简化了器件制备工艺,保证了器件的均匀性。实验中成功制备出功率大于 1 mW,阈值 2.1 mA,光谱线宽小于 0.2 nm,远场发散角小于 7°质子注入型光子晶体 VCSEL。在质子注入型光子晶体 VCSEL 中,还发现光子晶体缺陷大于限制孔缺陷时,光子晶体结构依然能够实现器件的模式控制,该结果为下一步优化器件阈值

电流,制备高性能基横模质子注入光子晶体 VCSEL 提供研究基础。

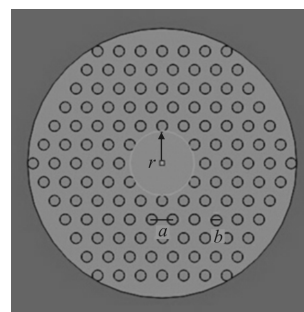
## 1 质子注入光子晶体 VCSEL 光学微腔模型

实验中设计的质子注入型光子晶体 VCSEL 结构如图 1 所示,器件通过在质子注入型 VCSEL 引入七孔缺陷光子晶体结构构成,其光子晶体采用七孔缺陷结构是因为该结构具有更好的模式控制特性,且成品率高。为了分析光子晶体引入到质子注入型 VCSEL 中,器件光谱、远场等特性变化,在 FDTD-Solution 软件<sup>[17]</sup>中,根据实际器件尺寸,建立了该激光器的微腔模型,在该模型中,器件采用的光泵浦模式,利用点光源激发出微腔中各阶模式分布。



(a) 剖面结构示意图

(a) Cross section view



(b) 顶部光子晶体结构图

(b) Top view of the photonic crystal

图 1 质子注入型光子晶体 VCSEL

Fig.1 Proton-implantation photonic crystal VCSEL

通过对器件中光子晶体结构进行分析,发现光子晶体结构在周期  $a=2\ \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $b=1\ \mu\text{m}$ ,刻蚀深度  $d=1.8\ \mu\text{m}$  时,器件的基横模具有较小的模式损耗,高阶模式具有更大的模式损耗,基横模可以抑制高阶模式激射,具体结果如图 2 所示。此外,由于光学外腔模型具有可分析器件远场特性的功能笔者等对器件的远场特性也进行了模拟,通过模拟发现,器件的光主要集中在远场发散角小于  $10^\circ$  范围内的区域,如图 3 所示。

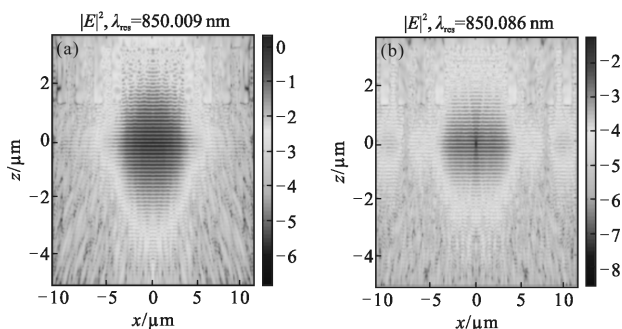


图 2 质子注入型光子晶体 VCSEL 腔内各阶模式分布  
Fig.2 Cavity modes distribution of the proton-implanted PhC-VCSELs

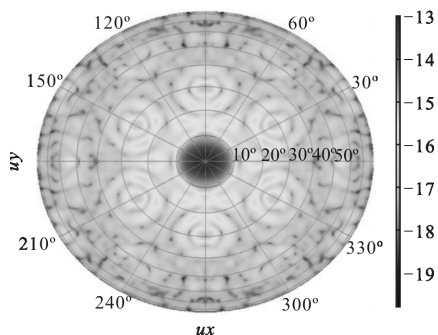


图 3 质子注入型光子晶体垂直腔面发射激光器远场分布  
Fig.3 Far-field distribution of the proton-implanted PhC-VCSELs

## 2 器件制备

设计制备如图 1 所示的质子注入型光子晶体 VCSEL,主要分为以下 3 个步骤:首先,采用金属有机化学气相沉积法(MOCVD)的方法依次在 N 型 GaAs 衬底上生长 34 对 N 型 GaAs/AlGaAs 下 DBR、不掺杂的 GaAs 有源区、22 对 P 型 GaAs/AlGaAs 分上 DBR 的激射波长为 850 nm 外延片。再通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)沉积厚度为  $3\ \mu\text{m}$  的二氧

化硅( $\text{SiO}_2$ )用于保护器件发光区域,利用光刻和感应耦合离子刻蚀(ICP),完成质子注入的掩膜制作(制备激光器电流限制孔直径为  $6\ \mu\text{m}$ )。接着将制备完成的芯片放入高能离子注入机中,进行  $\text{H}^+$ 离子注入。质子注入时注入方向与外延片垂直方向成  $7^\circ$ 角<sup>[13]</sup>,注入能量为 315 keV,剂量  $1\times 10^{15}/\text{cm}^2$ 。注入完成后,去除质子注入掩膜,光刻、溅射生长正面 Ti/Au 电极,完成质子注入器件制备。再通过电子束曝光和反应离子刻蚀制七孔缺陷光子晶体结构,首先在制备完成的质子注入 VCSEL 上,PECVD 沉积生长一层 300 nm 厚的  $\text{SiO}_2$ ,通过电子束曝光将七孔缺陷光子晶体结构图形转移到器件端面,再通过使用反应离子刻蚀(RIE)将图形传递到  $\text{SiO}_2$  层,完成掩膜制作,最后,利用 ICP 刻蚀光子晶体,通过刻蚀时间控制刻蚀深度(约为  $1.8\ \mu\text{m}$ )。最后,对制备样品进行样品减薄、溅射背面电极(AuGeNi/Au)、合金( $430\ ^\circ\text{C}$ , 35 s),解理、压焊,进行光强、光谱以及远场测试。

由质子注入型光子晶体 VCSEL 制备流程,可以发现质子注入器件无需刻蚀台面,表面被  $\text{H}^+$ 绝缘,无需再生长氧化层进行钝化,这些都简化了器件制备工艺,降低了器件制备难度,进一步降低了器件成本。此外,电流限制孔由光刻掩膜尺寸决定,大大减小了器件制备中由于氧化孔带来的不一致性。在光子晶体结构制备中,由于都在平面上进行制备,解决了普通氧化限制结构台面上难以旋涂电子束胶(普通 Zep 胶厚度 200~300 nm)的难题。

## 3 结果与讨论

图 4 所示为质子注入光子晶体 VCSEL 室温  $L-I-V$  特性曲线,在室温连续电流注入条件下,器件

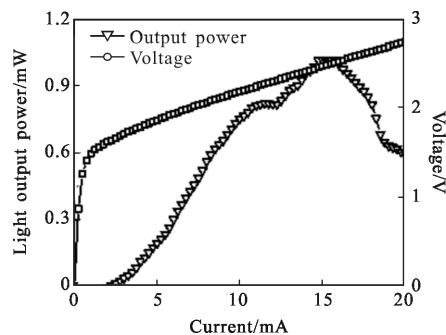


图 4 质子注入型光子晶体 VCSEL 的  $L-I-V$  特性曲线  
Fig.4 Light output power and voltage versus injection current

的阈值电流为 2.1 mA, 出光功率大于 1 mW, 电阻为 59 Ω。器件随着注入电流增加, 保持很好的光强稳定性, 当注入电流大于 12.5 mA 时, 器件出现 Kink 效应, 激光模式发生跳变, 对比以往实验结果<sup>[15]</sup>, 可以发现, 光子晶体结构的引入可以很好地改善器件模式特性, 稳定器件的光输出。

质子注入光子晶体 VCSEL 在室温注入电流为 11mA 时光谱如图 5 所示, 器件光谱只有一个峰值, 中心波长为 846.5 nm, 半线宽小于 0.2 nm, 边模抑制比(SMSR)大于 25 dB。光子晶体结构的引入, 基横模的模式损耗小于高阶模式, 使得其他高阶模式被有效抑制, 对应于光谱特性的有效改善。

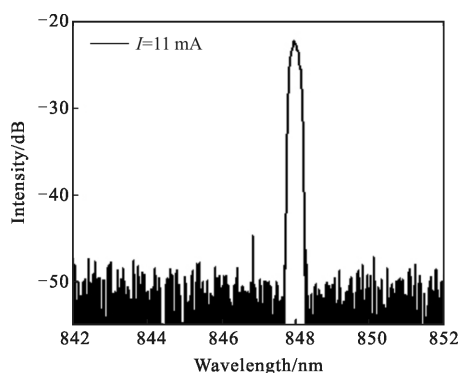


图 5 质子注入型光子晶体 VCSEL 光谱

Fig.5 Lasing spectrum of the fabricated proton-implanted PhC-VCSEL

图 6 为质子注入光子晶体 VCSEL 在注入电流为 11 mA 时的远场分布情况。由器件三维远场分布(如插图), 器件的光强主要集中于空间角度小于 10° 范围内, 通过对其数据分析, 发现引入光子晶体结构

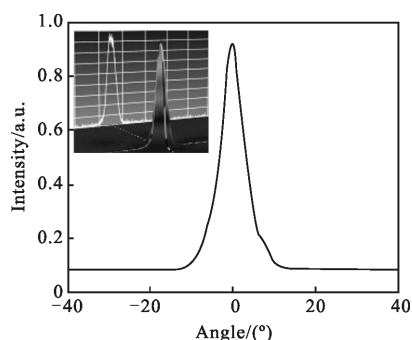


图 6 质子注入型光子晶体 VCSEL 的远场光斑分布

Fig.6 Far field distribution of the produced proton-implanted PhC-VCSEL

后, 器件的远场发散角小于 7°。由器件远场分布, 可以发现器件在 11 mA 时, 器件工作在基横模状态, 具有很好的模式特性, 让笔者在质子注入光子晶体 VCSEL 中观察到, 光子晶体缺陷孔大于电流限制孔时, 光子晶体结构仍可以很好地控制器件的模式特性。实验中, 器件在注入电流大于 12.5 mA 时, 无法工作在基横模状态主要是受工艺条件影响, 随着工艺条件优化, 器件将具有更好的模式和阈值特性。

## 4 结论

利用质子注入工艺制备光子晶体 VCSEL, 可将氧化限制型光子晶体 VCSEL 的台面工艺简化为纯平面工艺, 降低了光子晶体等微结构的制备难度, 提高了器件的均匀性, 在基横模高性能 VCSEL 设计制备中有着重要的应用前景。通过对质子注入光子晶体 VCSEL 测试发现器件在注入电流小于 12.5 mA 时, 器件具有稳定的模式和功率输出, 远场发散角小于 7°, 边模抑制比大于 25 dB, 有效验证了光子晶体结构在质子注入 VCSEL 的模式和光束控制作用。

## 参考文献:

- [1] Pan J S, Lin Y S, Li C F, et al. 850 nm implanted and oxide VCSELs in multi-gigabit data communication application[C]//SPIE: Optoelectron, Mater, Devices Commun, 2001, 4580: 46-51.
- [2] Kasten A M, Giannopoulos A V, Long C, et al. Fabrication and characterization of individually addressable vertical cavity surface-emitting laser arrays and integrated VCSEL/PIN detector arrays [C]//SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2007, 6484: 64840 C.
- [3] Weigl B, Grabherr M, Michalzik R, et al. High power single-mode selectively oxidized vertical-cavity surface emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(8): 971-973.
- [4] Morgan R A, Guth G D, Focht M W, et al. Transverse mode control of vertical-cavity top-surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 4(4): 374-377.
- [5] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2003, 9 (5): 1439-1445.
- [6] Danner A J, Raftery J J, Kim T, et al, Progress in photonic

- crystal vertical cavity lasers [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, May, 2005, E88-C(5): 944-950.
- [7] Kasten A M, Tan M P, Sulkin J D, et al. Photonic crystal vertical cavity lasers with wavelength-independent single-mode behavior [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(23): 2010-2012.
- [8] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9: 1439-1445.
- [9] Xie Y Y, Xu C, Kan Q, et al. A Single-fundamental-mode photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27: 024206.
- [10] Grabherr M, Jager R, Michalzik R, et al. Efficient single-mode oxide-confined GaAs VCSEL's emitting in the 850-nm wavelength regime [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 10(10): 1304-1306.
- [11] Liu Hairong, Liu Deming, Ke Changjian, et al. Single transverse mode VCSELs with nano-structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 120-123. (in Chinese)  
刘海荣, 刘德明, 柯昌剑, 等. 微结构垂直腔面发射激光器的设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 120-123.
- [12] Leisher P O, Danner A J, Raftery J J, et al. Proton implanted single mode holey vertical-cavity surface emitting lasers[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(18): 1010-1011.
- [13] Mao Mingming, Xu Chen, Wei Simin, et al, The effects of proton implant energy on threshold and output power of vertical cavity surface emitting laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(21): 214207. (in Chinese)  
毛明明, 徐晨, 魏思民, 等. 质子注入能量对垂直腔面发射激光器的阈值和功率的影响 [J]. 物理学报, 2012, 61(21): 214207.
- [14] Wang Baoqiang, Xu Chen, Liu Yingming, et al, Study on current spreading of photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59: 8542-8547. (in Chinese)  
王宝强, 徐晨, 刘英明, 等. 光子晶体垂直腔面发射激光器的电流分布研究[J]. 物理学报, 2010, 59: 8542-8547.
- [15] Xie Yiyang, Xu Chen, Kan Qiang, et al. VCSEL transverses mode control by 2D photonic crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 460-463. (in Chinese)  
解意洋, 徐晨, 阚强, 等. 二维光子晶体对面发射激光器横模控制研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 460-463.
- [16] Zheng Wanhua, Wang Yufei, Zhou Wenjun, et al. Ultralow threshold lateral cavity photonic crystal surface-emitting laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (12): 3198-3201. (in Chinese)  
郑婉华, 王宇飞, 周文君, 等. 超低阈值横向腔光子晶体面发射激光器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3198-3201.
- [17] Hu Chunhai, Guo Shiliang, Li Xin. Study of micro-laser with photonic crystal waveguide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1752-1756. (in Chinese)  
胡春海, 郭士亮, 李欣. 带有光子晶体波导的微型随机激光器研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1752-1756.