

新型正方晶格基横模光子晶体面发射激光器

袁 浚¹, 张正平¹, 解意洋²

(1. 模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060;

2. 北京工业大学 光电子技术省部共建教育部实验室, 北京 100124)

摘要: 高功率基横模垂直腔面发射激光器(VCSEL)在光通信、传感、原子频标和光电混合集成等领域有着重要的应用, 将光子晶体结构引入到 VCSEL 中, 通过设计结构尺寸和分布, 可以有效控制 VCSEL 的横向模式。课题组将正方形排列的光子晶体结构引入到 VCSEL 中, 实现对 VCSEL 的横向模式和基横模出光功率控制, 获得高基横模出光功率器件。通过采用平面波展开法(PWE)和全矢量三维时域有限差分方法(FDTD)对正方晶格结构光子晶体的合理设计, 获得正方形排布光子晶体周期、占空比和刻蚀深度等重要参数。成功地制备出基横模出光功率大于 3 mW, 边模抑制比大于 40 dB 的正方晶格光子晶体 VCSEL。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 基横模; 光子晶体

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0606005

Study of single-fundamental-mode square-lattice photonic crystal vertical cavity surface emitting laser

Yuan Jun¹, Zhang Zhengping¹, Xie Yiyang²

(1. Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, Chongqing 400060, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The high single fundamental mode output power vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) has been attracted many attention due to its important applications in the fields of optical communications, sensing, atomic frequency standard and opto-electronic hybrid integration. With suitable photonic crystal structure and distribution, the lateral modes of VCSEL can be effectively controlled by introducing the photonic crystal structure into the top distribution Bragg reflector (DBR). In this paper, square array photonic crystal structure was introduced into the VCSEL to control the transverse mode and single fundamental mode output power. The plane wave expansion and the full-vector three-dimensional finite difference time domain method (FDTD) method were used to analyze the photonic crystal structure and arrangement. The important parameters such as the period, the duty cycle and the etching depth of the

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61604007, 61376049, 11674016, 61378058, 61575008, 61574011); 北京市自然科学基金(4172009, 4152003); 北京市教委创新能力提升计划(PXM2017_014204_500034, PXM2016_014204_500018)

作者简介: 袁浚(1988-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事光通信与集成光学和光电微系统技术方面的研究。Email: yjwlw@semi.ac.cn

导师简介: 解意洋(1985-), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 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: xieyiyang@bjut.edu.cn

square arrangement photonic crystal were obtained by using these methods. The high output power square lattice photonic crystal single fundamental mode VCSEL was reported. The single fundamental mode output power of the square lattice photonic crystal VCSEL is larger than 3 mW and the side mode suppression ratios (SMSRs) is more than 40 dB.

Key words: VCSEL; single fundamental mode; photonic crystal

0 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)以其低阈值电流、圆形发散角、平面工艺易于集成、动态单纵模、调制速率高等优点,一直以来都是人们研究的热点^[1-2]。普通氧化限制型 VCSEL 工作在多横模状态,影响了器件在光通信、原子频标等领域的应用。普通的氧化限制型 VCSEL 只有在氧化孔径 3~5 μm 时,器件才能工作在基横模状态。如此小的氧化孔直径带来串联电阻较大和热稳定性差等问题^[3-4]。此外,3~5 μm 的氧化孔在实验上也难大批量重复制备。

为了能够控制器件的模式特性,使器件工作在基横模状态,获得更小的远场发散角和更高的光谱质量,人们通常在 VCSEL 中引入表面浅刻蚀、反波导、分布孔、光子晶体等微结构^[5-17]。在 VCSEL 中引入光子晶体结构等微结构,是通过器件激励的模式引入损耗,实现模式控制,不同的空气孔分布可以控制引入损耗的区域,采用带中心带缺陷结构的光子晶体可以使器件高阶模式引入损耗较大,基横模引入损耗小。当高阶模式和基横模之间的模式损耗差足够大的时候,高阶模式无法获得足够的增益,竞争不过基横模而被抑制,器件只有基横模可以激励,工作在基横模状态。此外,光子晶体结构的引入会使器件激励区域变成一个弱波导结构,增大基横模激励区域,提高器件的基横模功率,小的模式损耗也有利于减小器件的阈值电流。光子晶体 VCSEL 作为一种有效模式控制手段,不仅能够控制器件的模式特性,还能改善器件的远场分布,且制备工艺简单、易重复,是目前公认最有潜力控制器件模式的方法^[10-17]。目前,光子晶体 VCSEL 在模式控制、基横模高功率、阈值电流、远场发散角、边模抑制比等各个方面都取得了较好的实验结果。但是当前对光子晶体 VCSEL 的研究主要还是集中在三

角晶格结构中,很少有人对正方晶格光子晶体 VCSEL 进行系统研究。随着近年来光子晶体垂直腔面发射激光器阵列结构器件研究的兴起,正方排列光子晶体结构由于其在阵列结构器件中的优势,成为人们研究关注的热点。文中通过三维时域有限差分方法(FDTD)对正方排列光子晶体结构损耗机理进行分析,合理地分析设计了器件的特性,制备出基横模功率大于 3 mW,边模抑制比大于 40 dB 的正方晶格光子晶体 VCSEL。

1 器件光子晶体结构设计

在光子晶体 VCSEL 器件中,设计光子晶体结构,增大高阶模式的损耗,减小基横模的损耗,增大基横模激励区域对于提高器件性能有着重要的意义。在光子晶体 VCSEL 中,光子晶体结构主要通过缺陷个数、周期、占空比和刻蚀深度影响器件性能。文中分别采用平面波展开法和三维时域有限差分方法对单孔缺陷结构正方晶格光子晶体 VCSEL 的光子晶体结构进行分析,如图 1 所示。

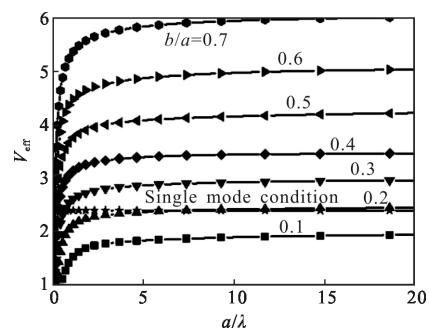


图 1 正方晶格光子晶体归一化参数与光子晶体周期、占空比之间的关系

Fig.1 V_q -parameter of the square lattice photonic crystal with different lattice period, duty ratio of photonic crystal

在光子晶体 VCSEL 中,光子晶体的周期、占空比和缺陷结构决定着器件的出光功率和模式特性,

选择合适的光子晶体结构可以使器件工作在基横模高功率状态。前期研究发现,光子晶体缺陷直径在 6~8 μm 时,易获得最佳的模式和功率值。对于正方排列光子晶体 VCSEL,可以同样采用单模条件进行分析,则当 V 参数小于 2.405 的时候,认为器件可以基横模工作^[9-10],满足方程(1):

$$V_{\text{eff}} = \frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{n^2 - (n - \gamma \Delta n)^2} \quad (1)$$

式中: D 为缺陷孔直径; λ 为激光波长; n 为材料折射率; γ 为刻蚀因子 (在 VCSEL 中对应于刻蚀 DBR 对数); Δn 为折射率差。在单孔缺陷情况下,当周期在 4~5 μm 左右时,光子晶体缺陷孔直径可以达到 6~8 μm。除了周期之外认为,影响光子缺陷孔直径很重要的一个参数是光子晶体占空比 (光子晶体空气孔直径与周期比值)。图 2 给出光子晶体 VCSEL 归

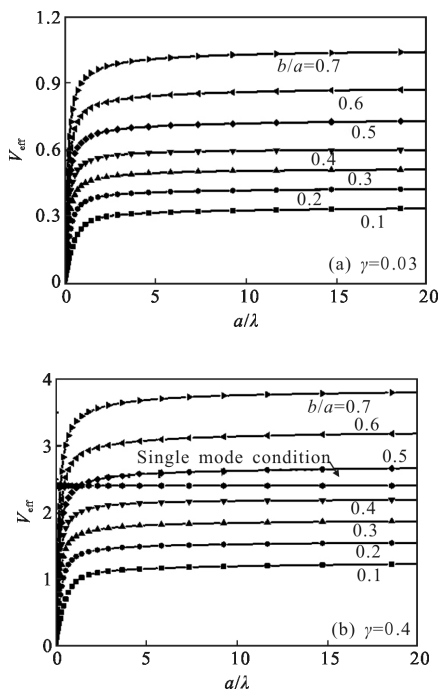


图 2 正方形光子晶体 VCSEL 归一化参数与光子晶体周期、占空比和刻蚀因子之间的关系

Fig.2 V_{eff} -parameter of the square photonic crystal VCSEL with different lattice period, duty ratio and etching factor of photonic crystal

一化参数与周期占空比之间的关系,其中 γ 刻蚀因子取值为 1,表示 VCSEL 结构被完全刻蚀穿。对应于不同周期光子晶体结构 VCSEL 归一化参数 V_{eff} 的变化情况。由图可知,随着晶格周期的增大,光子

晶体结构在占空比小于 0.2 时,满足基横模条件。但是在光子晶体 VCSEL 中,实际刻蚀深度并不是完全刻蚀穿,而是只刻蚀一定深度,刻蚀深度影响是必须考虑的一个参数。

图 3 给出了周期为 5 μm,占空比为 0.5 时,不同刻蚀深度光子晶体 VCSEL 谐振腔内基横模和高阶模的分布情况。由图可知,当刻蚀深度较小时,腔内

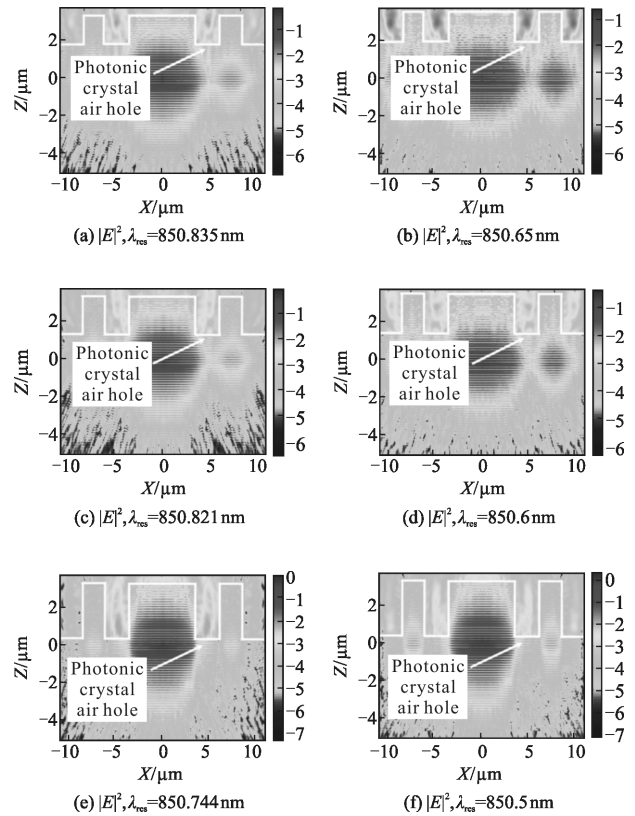


图 3 不同刻蚀深度下正方晶格光子晶体 VCSEL 中光场分布情况,其中(a)(b)为刻蚀深度为 1 μm 时,基横模和高阶模式在谐振腔内光场分布,(c)(d)为刻蚀深度为 2 μm 时,基横模和高阶模式在谐振腔内光场分布,(e)(f)为刻蚀深度为 2.5 μm 时,基横模和高阶模式在谐振腔内光场分布

Fig.3 Light field distribution in a square lattice photonic crystal VCSEL with different etching depths, (a)(b) are the light field distribution of the fundamental transverse mode and high-order mode in the resonant cavity as the etching depth is 1 μm, (c)(d) are the light field distribution of the fundamental transverse mode and the high-order mode in the resonant cavity when the etching depth is 2 μm, and (e)(f) are the light field distribution of the fundamental transverse mode and the high-order mode are in the resonant cavity as the etching depth is 2.5 μm

的模式分布基本上不受到空气孔的影响,基横模和高阶模的损耗都很小。随着光子晶体空气孔刻蚀深度的增加,腔内的模式分布开始受到空气孔的调制,基横模和高阶模式的损耗都开始增加,但是基横模的损耗没有高阶模式损耗变化的大。随着刻蚀深度的进一步增加,器件的高阶模式和基横模的损耗都进一步增加,器件的模式损耗差增大,此时器件易于工作在基横模状态。此时器件虽然能够工作在基横模状态,但是由于器件基横模损耗较大,所以器件的阈值电流会增大以弥补模式损耗的增加。

为了对比各级模式损耗,采用光子晶体微腔模型对器件的 Q 值进行分析,图 4 为正方晶格器件中各级模式 Q 值与刻蚀深度关系。其中光子晶体周期为 $a=5\ \mu\text{m}$,占空比 0.5。由图可知,在刻蚀深度较浅时,基横模(0 阶)和 1 阶的损耗都很小,而 2 阶或者更高阶模式的损耗较大,器件基横模和 1 阶模式之间损耗大,难以让基横模抑制 1 阶模式。随着刻蚀深度的增加,基横模和高阶模式的损耗都在增加,但是基横模变化较小,而 1 阶模式损耗增加较大,所以 Q 值减小得多,当刻蚀深度从 $2\ \mu\text{m}$ 增加到 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,基横模的损耗增加很少,而 1 阶模式的损耗却增加较多,二者模式损耗差相差已足够抑制高阶模式激励。当刻蚀深度继续增加到 $3\ \mu\text{m}$ 左右时,基横模和高阶模式之间的模式损耗差进一步增大,但是此时基横模的损耗相对于原来也减小了,在实际器件中,刻蚀深度达到 $3\ \mu\text{m}$,器件的有源区将被刻蚀,器件的阈值将进一步增加,所以在一般情况下,刻蚀深度控制在 $2.5\ \mu\text{m}$ 左右最佳。

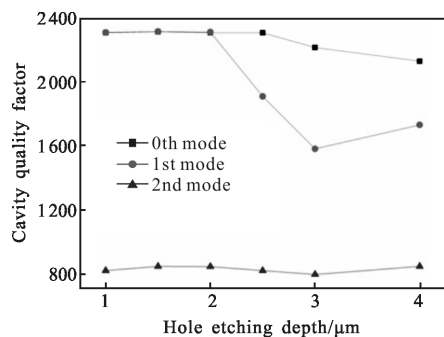


图 4 不同刻蚀深度空气孔光子晶体 VCSEL 各阶模式的 Q 值
Fig.4 Q factor of fundamental mode and high order modes with different air hole etching depth photonic crystal VCSELs

此外,光子晶体空气孔的刻蚀深度在影响器件

的阈值电流的同时,还会对器件的远场发散角产生影响,当刻蚀深度较浅时,器件的远场发散角较小,随着刻蚀深度的增加,器件的远场先变小,随着刻蚀深度的进一步增加,器件的远场发散角后变大,同时光强分布也开始变坏。因此综合上面考虑,笔者发现当光子晶体空气孔刻蚀深度在 $2.5\ \mu\text{m}$ 左右时,器件具有较小的基横模模式损耗和足够的高阶模和基模损耗差,同时器件在此时具有集中的光强分布。

通过以上分析可以发现:光子晶体周期选择在 $5\ \mu\text{m}$ 左右时,器件具有较大的光子晶体缺陷孔直径,此时,器件的基横模出光功率较大。当光子晶体的占空比 $bla=0.5$,刻蚀深度为在 $2.5\ \mu\text{m}$ 左右时,器件的基横模损耗较小,高阶模式损耗较大。此时器件的模式损耗差和远场分布等特性俱佳。

2 器件制备

采用化学汽相淀积(MOCVD)的方法依次在 N 型 GaAs 衬底上生长 34 对 N 型 GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜(下 DBR)、不掺杂的 GaAs 有源区、 $\text{Al}_{0.96}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 高铝氧化层、22 对 P 型 GaAs/AlGaAs 分布布拉格反射镜(上 DBR)的激光波长为 $850\ \text{nm}$ 外延片。

然后,通过常规的光刻、腐蚀、感应耦合离子刻蚀(ICP)、氧化等工艺制作出垂直腔面发射半导体激光器。氧化孔为 $10, 20\ \mu\text{m}$,出光孔为 $40, 50\ \mu\text{m}$ 。

依次用丙酮、乙醇、去离子水清洗制作好的氧化型 VCSEL 芯片,然后用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)设备在器件表面淀积一层 $300\ \text{nm}$ 的 SiO_2 薄膜。再在器件上甩上一层 S9912 光刻胶,胶膜厚度在 $800\ \text{nm}$ 左右。曝光、显影,再用感应耦合离子刻蚀(ICP)设备刻蚀 SiO_2 ,将胶上图形转移到 SiO_2 上。去胶、用 SiO_2 做掩模用 ICP 刻蚀上 DBR 的 GaAs/AlGaAs,获得光子晶体 VCSEL 器件。

3 结果与讨论

实验获得的光子晶体 VCSEL 通过解理、压焊后,在室温直流情况下采用激光器 L-I-V、光谱、远场测试仪器对器件的性能进行了测试。具体结果如图 5 所示。

图 5 给出了周期为 $5\ \mu\text{m}$,占空比为 0.5,刻蚀深

度为 $2.5\ \mu\text{m}$ 正方排列光子晶体 VCSEL L-I-V 特性曲线,由图可知,器件在注入电流 30 mA 时,功率达到最大值 3.7 mW,器件激光的阈值电流在 5.5 mA。当注入电流大于 25 mA 时,器件 L-I 曲线出现拐点,说明器件激光模式可能发生变化。为了进一步了解器件特性,对器件的光谱进行测试,具体结果见图 6。

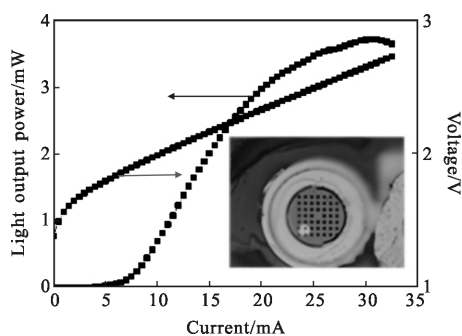


图 5 正方晶格光子晶体 VCSEL 的 L-I-V 特性及显微照片

Fig.5 L-I-V characteristics and photomicro graph of square lattice photonic crystal VCSEL

图 6 给出了器件的光谱特性曲线,在注入电流小于 25 mA 时,正方晶格器件的边模抑制比大于 40 dB,光谱线宽小于 0.1 nm,显示器件具有非常好的模式特性。

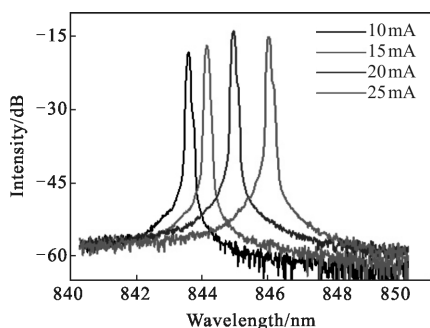


图 6 正方晶格光子晶体 VCSEL 在不同注入电流下的光谱特性

Fig.6 Spectral characteristics of square lattice photonic crystal VCSEL with different injection current

4 结 论

通过采用准三维平面波展开法对正方晶格光子晶体的关键参数进行趋势分析,再利用三维时域有限差分方法,通过 Q 值、光场分布、损耗分析了正方晶格光子晶体 VCSEL 结构参数对器件性能的影响。通过分析发现,单孔缺陷光子晶体周期在 $4\sim 5\ \mu\text{m}$,占空比在 $0.4\sim 0.5$,刻蚀深度在 $2.5\ \mu\text{m}$ 左右时,正方

排列的光子晶体结构,引入的模式损耗可以使器件具有最佳的出光功率和模式特性。基于此,在实验上,通过优化工艺条件,成功制备出基横模出光功率大于 3 mW,阈值电流 5.5 mA,边模抑制比大于 40 dB 高性能正方晶格光子晶体 VCSEL,器件在注入电流小于 25 mA 时,均能满足基横模高性能工作。该研究为高性能基横模 VCSEL 研究提供了一种新的思路,为设计制备光子晶体 VCSEL 提供一种研究方法,推进其作为光源在光通信、传感和模数转换器等领域的应用。

参考文献:

- [1] Iga K, Surface emitting laser-It's birth and generation of new optoelectronics field [J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6: 1201-1215.
- [2] Larsson A. Advances in VCSELs for Communication and Sensing [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2011, 1077-260X: 1-16.
- [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] Tian Kun, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51-64. (in Chinese)
田锟, 邹永刚, 马晓辉, 等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 51-64.
- [7] Hong Kuobin, Yang Chunchieh, Lu Tienchang. Blue-Violet GaN -based photonic crystal surface emitting lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 559-571. (in Chinese)
洪国彬, 杨钧杰, 卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 559-571.
- [8] Liu Di, Ning Yongqiang, Zhang Jinlong, et al. High-power InGaAs/GaAsP strained quantum well vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2147-2153. (in Chinese)

- 刘迪, 宁永强, 张金龙, 等. 高功率 InGaAs/GaAsP 应变量子阱垂直腔面发射激光器阵列 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2147–2153.
- [9] Xie Y Y, Kan Q, Xu C, et al. Single fundamental mode photonic crystal VCSEL with high power and low threshold current optimized by modal loss analysis[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(1): 014203.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Yuan Wei, Zhang Jianqi, Qin Yuwei, et al. Near infrared spectral region photonic crystal band gaps and KTP defect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0104005. (in Chinese)
袁卫, 张建奇, 秦玉伟, 等. 近红外光谱区光子晶体禁带与 KTP 缺陷研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0104005.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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(12): 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(12): 8542–8547.
- [16] 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.
- [17] Jiang Guoqing, Xu Chen, Xie Yiyang, et al. Fabrication of Proton-implanted Photonic Crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1205001. (in Chinese)
蒋国庆, 徐晨, 解意洋, 等. 质子注入型光子晶体垂直腔面发射激光器制备 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1205001.