

# 单模垂直腔面发射激光器的研究动态

郝永芹 晏长岭 马晓辉 刘国军 冯源 李特 魏志鹏 姜会林

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有低阈值电流、圆形光斑、高调制带宽、易于单纵模激射以及高密度二维光集成等优势。在实际应用中,单横模 VCSEL 是光通信、高速局域网、光互连等许多应用领域的理想光源。在分析 VCSEL 的结构特性和模式特性的基础上,详述了单横模 VCSEL 近年来取得的重要进展,分析了各种单横模技术的优势与不足,概述了器件广阔的应用前景及仍待解决的问题。

**关键词** 激光器;半导体激光器;垂直腔面发射激光器;单模

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100003

## Progress on Single Mode Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

Hao Yongqin Yan Changling Ma Xiaohui Liu Guojun Feng Yuan Li Te

Wei Zhipeng Jiang Huilin

(State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** The main advantages of vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) are low threshold current, a circular output-beam profile, high modulation bandwidth, single-longitudinal-mode operation and easy two-dimensional integration with high density. A single transverse mode VCSEL is considered to be a desired light source for optical communication, high-speed local-area networks, and optical interconnect. After analysing structural and modal features of a VCSEL, important progress of single transverse mode VCSELs is presented and discussed. Finally, prospect and problems of future research are presented.

**Key words** lasers; semiconductor laser; vertical cavity surface emitting laser; single mode

**OCIS codes** 140.5960; 140.3290; 140.3295

## 1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是当前光电子技术领域最活跃的研究热点之一<sup>[1-6]</sup>。它具有低阈值电流、圆形光斑、高调制带宽、易于单纵模激射的优点。而且 VCSEL 制作成本低,可实现超小型的高密度二维封装,是光纤通讯等应用领域的理想光源<sup>[2]</sup>。尤其在应用中,几个毫瓦的单横模 VCSEL 是许多应用领域的的首选器件,例如高速光通信、自由空间光互连、激光打印、医疗诊断、机载光探测和测距系统。由于 VCSEL 的固有结构特点,横向宽度较大,器件通常为多横模激射。VCSEL 在多横模工作状态时,混合振荡的多个模式叠加可导致谐振谱线变宽,达到 1 nm 或更宽,激光器的相干性很差。更为严重的是多个横模会出现模式竞争导致输出光谱和光功率的不稳定。因此,开展单模(无特殊说明时文中的单模即为单横模) VCSEL 研究对推动其发展和技术进步,特别是对充分发挥这种小型高效半导体激光光源的应用价值具有重要意义。

本文在分析 VCSEL 的结构特性和模式特性的基础上,详述了近年来单模 VCSEL 取得的重要进展,并分析了各种技术手段的优势与不足之处,最后概述其广阔的应用前景和仍待解决的问题。

**收稿日期**: 2013-04-09; **收到修改稿日期**: 2013-05-29; **网络出版日期**: 2013-09-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(61076038)、吉林省自然科学基金(201215134)

**作者简介**: 郝永芹(1972—),女,博士,副研究员,主要从事半导体材料与器件等方面的研究。

E-mail: hyq720812@yahoo.com.cn

## 2 器件结构与模式特性

VCSEL 是一种新型的半导体激光器,结构中的主要部分是 p 型和 n 型分布布拉格反射镜(DBR)以及中间的有源层,光从表面射出,发射圆形对称的光束,如图 1 所示。VCSEL 的腔长在微米量级,因此器件具有低阈值电流和高的微分量子效率,容易实现动态单纵模工作。例如对于 980 nm 的  $1\lambda$  腔结构 InGaAs/GaAs 的 VCSEL,纵模间距  $\Delta\lambda_m > 100$  nm。但短的谐振腔也带来不利之处,如要求反射镜的反射率很大以提供足够的光反馈,以保障谐振腔中有足够的光能量连续激发。VCSEL 中反射镜采用了 DBR 结构,通常以半导体反射镜为主,实现 99.5% 以上的反射率。为获得高质量的器件,大多数研究者采用了多量子阱结构提高有源区的增益。

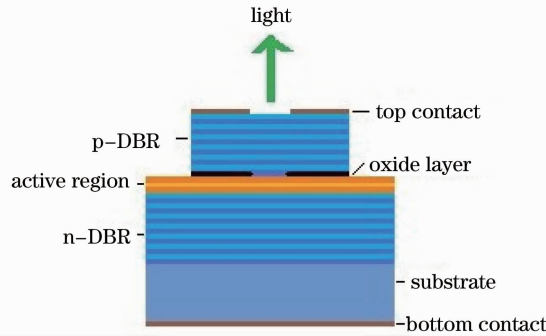


图 1 VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Sketch of VCSEL

通常来说,VCSEL 有源区中潜在的横模是由腔结构和折射率分布决定的。表征器件横向结构参数的归一化频率可表示为

$$\bar{V} = \frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{\bar{n}_c^2 - \bar{n}_s^2}, \quad (1)$$

式中  $D$  为光场被限制区域横向尺寸直径,即有源区的限制孔径, $\bar{n}_c$  和  $\bar{n}_s$  分别代表限制区与周围区域的有效折射率。因此,限制孔及其与周围区域的折射率差值越大,则潜在的横模越多。对于 VCSEL 来说,其横向宽度较大( $D$  通常在  $10 \mu\text{m}$  左右),器件一般工作在多模状态。加之目前较普遍采用的氧化物限制结构 VCSEL,富 Al 的 AlGaAs(Al 粒子数分数通常大于 98%)氧化前后的折射率变化较大,这引起了激光腔与其周围区域的明显折射率差,这种强折射率导引机制亦使器件很难工作在稳定的单模状态。

此外,VCSEL 在电注入引发单模激射以后,其光场随注入载流子的分布发生变化。由于有源区中心区域光场较强,载流子消耗更厉害,从而导致模式增益的严重下降。因此,空间烧孔效应是激光器有源层内载流子与多横模光子相互作用的结果<sup>[7]</sup>。这意味着注入电流在 VCSEL 的多横模行为中扮演着非常重要的角色。哪个模式被激发,哪个更强,还依赖于注入电流的参数,如电流强度、电流扩散及其几何参量。为了抑制空间烧孔,提高 VCSEL 单模输出功率,应使注入电流趋于均匀分布,甚至提高中心区域的电注入。

## 3 单模 VCSEL 取得的重要进展

由(1)式可知,为实现 VCSEL 的单模工作,最直接的方法就是尽量缩小器件的限制孔径。Jung 等<sup>[8]</sup>研制了波长 850 nm 孔径  $3.5 \mu\text{m}$  的 VCSEL,实现了 4.8 mW 的单模输出。美国加州大学圣巴巴拉分校 Chang 等<sup>[9]</sup>报道了激射波长 993 nm 单模 VCSEL,孔径  $3 \mu\text{m}$ ,最大输出功率 3.1 mW,可实现 35 Gb/s 的无误码传输。2009 年美国 Princeton optronics 公司报道了 808 nm 波段  $4 \mu\text{m}$  孔径 VCSEL,单模输出功率达到 4.7 mW<sup>[10]</sup>。器件小的光发射面积不仅产生较高的微分电阻,而且严重限制了其输出功率,同时器件的寿命也因高的电流密度而降低。而且在制作方面,如此小的孔径对精度要求极高,难于制作。

研究人员尝试采用其他的技术手段使较大孔径的 VCSEL 实现单模运转。外腔反馈方法通过外腔镜对输出模式进行控制,实现了 VCSEL 的单模激射。Koch 等<sup>[11]</sup>报道了外腔反馈结构 850 nm 波段 VCSEL 的单模输出功率 4.5 mW。Si-Hyun Park 等<sup>[12]</sup>将在 VCSEL 上集成的微透镜作为外腔镜(图 2),在 850 nm 波

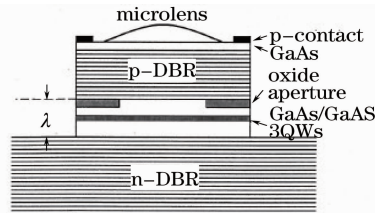


图2 集成微透镜 VCSEL

Fig. 2 Diagram of a VCSEL device integrated with a microlens on top

段得到了超过 3 mW 的稳定单模输出。2008 年 Kardosh 等<sup>[13]</sup>报道了 980 nm 波段单模输出功率 15 mW 的单片集成微透镜 VCSEL。VCSEL 的腔长很短,通常为  $0.5\lambda \sim 2\lambda$ ,适当的延长谐振腔将有利于较大孔径器件的单模输出,同时可降低发散角和热阻。Unold 等<sup>[14]</sup>报道了谐振腔延长  $4 \mu\text{m}$  时,孔径  $7 \mu\text{m}$  的 980 nm 器件的单模输出功率大于 5 mW。Zhou 等<sup>[15]</sup>又报道了 980 nm 反波导结构 VCSEL,单模输出功率达到 7.1 mW。Shi 等<sup>[16]</sup>采用扩锌技术亦实现了 850 nm 环形腔结构 VCSEL(图 3)的单模工作,输出功率 2 mW,发散角约  $5^\circ$ ,微分电阻约  $70 \Omega$ 。Samal 等<sup>[17]</sup>采用双氧化孔结构对电注入进行控制(图 4),通过调整注入区载流子分布以获得单模激励,1025 nm 单模 VCSEL 室温连续最大输出功率 7.5 mW。日本索尼公司曾报道了通过引入三角孔结构,实现了较大孔径 VCSEL 的单模激励,850 nm 波段 VCSEL 单模输出功率 7 mW<sup>[18]</sup>。上述研究方法推动了单模 VCSEL 的发展步伐,但这些结构通常要求精确的设计与对准技术,且有些结构对机械扰动非常敏感,在器件的制备和便于应用等方面需要进一步完善。

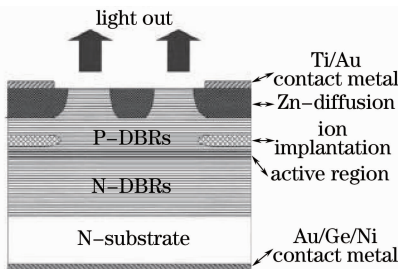


图3 环形腔 VCSEL

Fig. 3 VCSEL with a ring-shaped light-emitting aperture

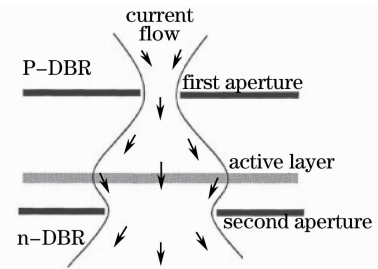


图4 双氧化孔结构

Fig. 4 Schematic cross section of double apertures and current flow

锁相阵列结构在理论上是实现单模高功率 VCSEL 的有效方法,但因该结构对器件尺寸及环境条件的要求比较苛刻,很难实现其稳定的单模工作,实际的器件表现为异相超模或多波瓣的远场分布。表面浮雕法<sup>[15,19]</sup>是制作单模 VCSEL 较有效的方法之一,通过在 VCSEL 表面直接进行浅腐蚀来增加上 DBR 周边区域的损耗,达到选模的目的(图 5)。孔径  $6 \mu\text{m}$  波长 850 nm 的 VCSEL,实现了 6.5 mW 的单模输出<sup>[19]</sup>。它与 VCSEL 的标准制备工艺相比,只需增加一次光刻和腐蚀工艺,制备方法简单。但它最大的缺陷就是高损

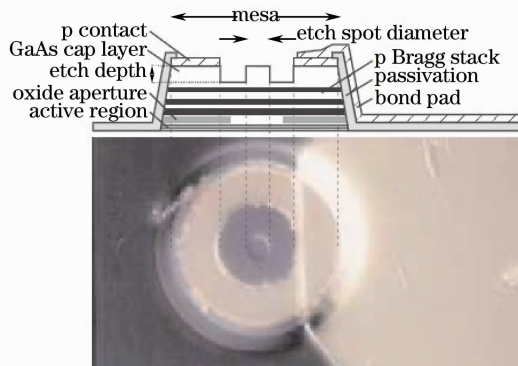


图5 表面浮雕结构 VCSEL

Fig. 5 Top-view photograph and schematic cross section of a surface relief VCSEL

耗区对腐蚀精度的要求非常高,腐蚀深度偏离几个纳米就会引起选模特性的明显劣化。在 DBR 表面增加一反相层可有效解决这一问题,2011 年 Gadallah 等<sup>[20]</sup>报道了利用该方法实现的 850 nm 单高阶模 VCSEL,输出功率达到 12 mW。长春理工大学郝永芹等<sup>[21]</sup>提出一种结合表面浮雕结构的环形腔 VCSEL,旨在进一步提高器件性能。

近年来研究人员关注的光子晶体结构 VCSEL<sup>[22-26]</sup>,被认为有望实现高功率的单模半导体激光器。Choquette 研究组<sup>[22]</sup>报道了 850 nm 光子晶体 VCSEL,单模输出功率 3.1 mW。Yang 等<sup>[23]</sup>报道了量子点光子晶体 VCSEL(图 6),实现 1.3  $\mu\text{m}$  波段单模输出 0.2 mW,990 nm 波段单模输出 3.8 mW。器件因腐蚀孔较高的纵横比使制作起来较费力,同时亦存在引入光衍射损耗、对电注入等带来的不利影响。

在制备长波长 VCSEL 时,研究者通常会引入其他结构改善模式特性。例如,瑞典皇家理工学院的研究人员采用硅层作为模式滤光片,研制出长波长单模 VCSEL,波长 1265 nm,输出功率 1 mW,在 10  $^{\circ}\text{C}$ ~140  $^{\circ}\text{C}$  间可维持稳定输出<sup>[27]</sup>。通过在 VCSEL 上反射镜集成亚波长光栅<sup>[1,28]</sup>,可以大大减少上 DBR 的对数,降低制作难度,而且能够对出射光进行有效的波长和偏振控制(图 7)。Boutami 等<sup>[29]</sup>利用类似结构实现了 InP 基 1.55  $\mu\text{m}$  波段 VCSEL 脉冲条件下的偏振稳定光输出。此外,很多研究者在制备长波长单模 VCSEL 中会引入掩埋隧道结(BTJ),利用其高电导率特性可极大地改善注入电流的均匀性,中国科学院上海微系统与信息技术研究所在这方面取得重要成果<sup>[30]</sup>。德国 Ortsiefer 等<sup>[31]</sup>报道了 InP 基的 1.3  $\mu\text{m}$  单模 BTJ-VCSEL,输出功率大于 3 mW,调制带宽大于 10 GHz,3 km 光纤中无误码数据传输速率达到 12.5 Gb/s。近期,中国科学院半导体研究所郑婉华等<sup>[32]</sup>报道了一种超低阈值横向腔光子晶体面发射激光器,室温下获得了 1553.8 nm 的面发射激光,线宽 0.4 nm,阈值电流密度为 667  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,为电注入面发射激光器的研制提供了新的思路。

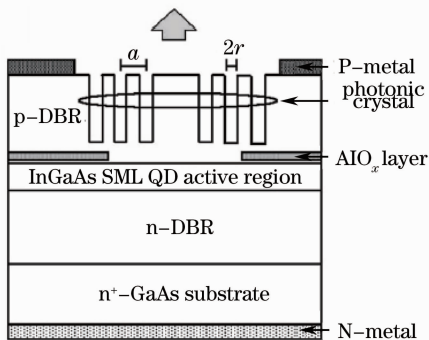


图 6 量子点光子晶体 VCSEL

Fig. 6 Sketch of a quantum dot photonic crystal VCSEL

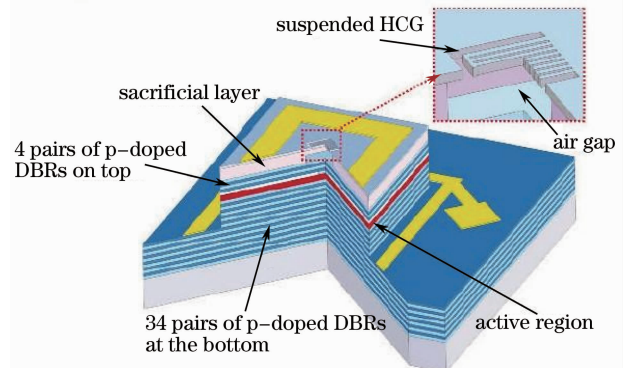


图 7 亚波长光栅结构 VCSEL

Fig. 7 A VCSEL incorporating a subwavelength grating

## 4 结束语

单模 VCSEL 的研究多年来一直是国内外关注的焦点,各种新方法新技术的不断涌现极大地推动其发展进程,器件性能不断改善。单模 VCSEL 发展较快的是 850 nm 和 980 nm 波段,输出功率高达 5 mW 甚至更高的水平。其他波段单模 VCSEL 的输出功率通常小于 3 mW。单模 VCSEL 的快速发展使其在实际应用中发挥了独特优势。例如在高速光通信中,利用单模 VCSEL,使传输速率每秒高达几十吉比特。而且,这种小型低功耗的半导体激光源在改善系统性能的同时,大大降低了系统的复杂性和成本,是光通信、激光打印等应用领域的新一代理想光源。但目前的单模 VCSEL 的功率仍然较低,且很难长期稳定的工作在较宽的注入电流和温度范围内,因此探求一种更有效的技术方法实现其长期稳定的高功率输出仍是单模 VCSEL 发展所面临的一项重要课题。

## 参 考 文 献

- 1 Michael C Y Huang, Y Zhou, Connie J Chang-Hasnain. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 119-122.
- 2 Leonid V Butov. Solid-state physics: a polariton laser[J]. Nature, 2007, 447(7144): 540-541.

- 3 Eli Kapon, Alexei Sirbu. Long-wavelength VCSELs; Power-efficient answer[J]. *Nature Photonics*, 2009,3(1): 27–29.
- 4 Hongxing Jiang, Jingyu Lin. Semiconductor lasers expanding into blue and green[J]. *Nature photonics*, 2011, 5(9): 521–522.
- 5 Li Xiaojian, Wu Zhengmao, Deng Tao, *et al.*. Investigation on the bistability performances of vertical-cavity surface-emitting lasers with time-varying orthogonal optical injection subject to weak optical feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1214001.  
李小坚, 吴正茂, 邓涛, 等. 弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1214001.
- 6 Changling Yan, Yun Deng, Peng Li, *et al.*. Improvement of InGaAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers by post-oxidation annealing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(12): 122501.
- 7 A Valle, J Sarma, K A Shore. Spatial holeburning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, 31(8): 1423–1431.
- 8 C Jung, R Jager, M Grabbher, *et al.*. 4.8 mW singlemode oxide confined top-surface emitting vertical-cavity laser diodes [J]. *Electron Lett*, 1997, 33(21): 1790–1791.
- 9 Y C Chang, C S Wang, L A Coldren. High-efficiency, high-speed VCSELs with 35 Gbit/s error-free operation[J]. *Electron Lett*, 2007, 43(19): 1022–1023.
- 10 J F Seurin, G Y Xu, V Khalfin, *et al.*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays[C]. *SPIE*, 2009,7229: 722903.
- 11 B J Koch, L R Leger, A Gopinath *et al.*. Single-mode vertical cavity surface emitting laser by graded-index lens spatial filtering[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(18): 2359–2361.
- 12 Si-Hyun Park, Yeonsang Park, Hyejin Kim, *et al.*. Microlensed vertical-cavity surface-emitting laser for stable single fundamental mode operation[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(2): 183–185.
- 13 I Kardosh, F Demaria, F Rinaldi, *et al.*. High-power single transverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers with monolithically integrated curved dielectric mirrors[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(24): 2084–2086.
- 14 H J Unold, S W Z Mahmoud, R Jager, *et al.*. Single-mode VCSELs[C]. *SPIE*, 2002, 4649: 218–229.
- 15 D Zhou, L J Mawst. High-power single-mode antiresonant reflecting optical waveguide-type vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(12): 1599–1606.
- 16 J W Shi, C H Jiang, K M Chen, *et al.*. Single-mode vertical-cavity surface-emitting laser with ring-shaped light-emitting aperture[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(3): 031109.
- 17 N Samal, S R Johnson, D Ding, *et al.*. High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(16): 161108.
- 18 Akio Furukawa, Mitsunari Hoshi, Satoshi Sasaki, *et al.*. High-power single-transverse-mode holey VCSELs[C]. *SPIE*, 2005, 5722: 183–190.
- 19 A Haglund, J S Gustavsson, J Vukusic, *et al.*. Single fundamental-mode output power exceeding 6 mW from VCSELs with a shallow surface relief[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(2): 368–370.
- 20 A S Gadallah, R Michalzik. High-output-power single-higher-order transverse mode VCSEL with shallow surface relief[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(15): 1040–1042.
- 21 Hao Yongqin, Wei Zipeng, Yan Changling, *et al.*. A Ring Cavity Surface Emitting Laser Diode with Surface Relief[P]. *P R C Patent*, 2011, 201110138045.1.  
郝永芹, 魏志鹏, 晏长岭, 等. 一种基于表面浮雕结构的环形腔面发射半导体激光器[P]. *中国专利*, 2011, 201110138045.1.
- 22 A J Danner, T S Kim, K D Choquette. Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity laser with improved output power[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(6): 325–326.
- 23 H P D Yang, Y H Chang, L I Lai, *et al.*. Singlemode InAs quantum dot photonic crystal VCSELs[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(20): 1130–1132.
- 24 Xu Xingsheng, Wang Chunxia, Du Wei, *et al.*. Investigation of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers at 850 nm[J]. *Physics*, 2007, 36(1): 17–19.  
许兴胜, 王春霞, 杜伟, 等. 光子晶体垂直腔面发射 850 nm 波长激光器研究[J]. *物理*, 2007, 36(1): 17–19.
- 25 Xie Yiyang, Xu Chen, Kan Qiang, *et al.*. Single-fundamental-mode photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2010, 27(2): 100–102.
- 26 Wang Huayong, Xu Xingsheng. Research progress of photonic crystal vertical cavity surface emitting laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 090003.  
王华勇, 许兴胜. 光子晶体垂直腔面发射激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 090003.
- 27 R Marecks von Würtemberg, P Sundgren, J Berggren, *et al.*. 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers with mode filter for single mode operation[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(21): 4851–4853.
- 28 Li Shuo, Guan Baolu, Shi Guozhu, *et al.*. Polarization stable vertical-cavity surface-emitting laser with surface sub-wavelength gratings[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(18): 184208.

- 李 硕, 关宝璐, 史国柱, 等. 亚波长光栅调制的偏振稳定垂直腔面发射激光器研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 184208.
- 29 S Boutami, B Benbakir, J L Leclercq, *et al.*. Compact and polarization controlled 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting laser using single-layer photonic crystal mirror[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(7): 071105.
- 30 Lao Yanfeng, Cao Chunfang, Wu Huizhen, *et al.*. Submilliampere threshold 1.3  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(3): 1954–1958.  
劳燕锋, 曹春芳, 吴惠楨, 等. 亚毫安阈值的 1.3  $\mu\text{m}$  垂直腔面发射激光器[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1954–1958.
- 31 M Ortsiefer, W Hofmann, E Ronneberg, *et al.*. High speed 1.3  $\mu\text{m}$  VCSELs for 12.5 Gbit/s optical interconnects[J]. Electron Lett, 2008, 44(16): 974–975.
- 32 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.  
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.