

光子晶体垂直腔面发射激光器的研究进展

王华勇 许兴胜

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 单模垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有低功耗、小发散角、高调制带宽和易于二维集成等优点,在光互连、光存储、高速激光打印和长波通讯等方向有着很好的应用前景。调节 VCSEL 顶部和底部反射层的结构可以很容易地实现单纵模条件,然而要实现横向单模输出,就要同时对出射光加以横向限制。在 VCSEL 的顶部反射层刻蚀出二维光子晶体结构构成的光子晶体 VCSEL 实现了稳定的单横模激光输出。介绍了光子晶体 VCSEL 的基本结构、工作原理、研究进展和应用领域,并探讨了如何使光子晶体 VCSEL 获得更高的出光功率、控制激光偏振特性和减小发散角等问题。最后评述了光子晶体 VCSEL 的国内研究现状,并对未来的研究做了展望。

关键词 激光器;光子晶体;垂直腔面发射激光器;单模;光子集成电路

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090003

Research Progress of Photonic Crystal Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Wang Huayong Xu Xingsheng

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Single-mode vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) has shown great potential ability in optoelectronic applications such as optical interconnection, optical storage, high-speed laser printing and long-wave communication as a result of its advantages in low-power consumption, small divergence angle, high modulation bandwidth and easy two-dimensional (2D) integration. The top and bottom reflective layers can control its vertical mode excellently, but if we want to obtain a single fundamental transverse mode, we must limit the emergent light in the transverse direction. Recently, with the technique of etching 2D photonic crystal holes into the top distributed Bragg reflector, single fundamental mode photonic crystal VCSEL is made successfully. In this review, we focus on the structure, operating principle, researching progress and application fields, and discuss how to improve the output energy, control the polarization and reduce divergence angle. At last, we present the domestic research situation and prospect of future research.

Key words lasers; photonic crystal; vertical cavity surface emitting laser; single mode; photonic integrated circuit

OCIS codes 140.2020; 140.3510; 140.3570; 140.5960

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种激光出射方向与半导体衬底方向垂直的激光器。与边发射激光器不同的是,它不采用晶体解理面作为谐振腔反射面,因而其有源区直径和微腔腔长就不受解理面长度限制,可以小到微米量级,具有单纵模、低阈值、低功耗、小发散角、高调制带宽和易于二维集成等优点。正是由于以上优点,单模 VCSEL 在光互连、光存储、高速激光打印和长波通讯等方面有着很好的应用前景。VCSEL 的发展离不开全世界科研人员长年累月的不懈努力。1977 年日本东京工业大学的研究小组首次提

收稿日期: 2012-03-28; **收到修改稿日期**: 2012-04-23; **网络出版日期**: 2012-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(60877030,91121019)和国家 863 计划(2009AA03Z406)资助课题。

作者简介: 王华勇(1987—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体激光器和量子点等方面的研究。

E-mail: wanghuayong@semi.ac.cn

导师简介: 许兴胜(1970—),男,博士,研究员,主要从事光子晶体和光子微结构器件、单分子与单量子点的调控、探测及其应用等方面的研究。E-mail: xsxu@semi.ac.cn

出垂直腔面发射激光器的概念,1979年该小组在低温条件下首次制成了 InGaAsP/InP 材料、波长为 1180 nm 的 VCSEL^[1],之后在 1985 年实现在室温下 874 nm VCSEL 激光^[2],1987 年实现低阈值工作^[3],1991 年成功制备连续工作的波长为 980 nm 的 GaAs/InGaAs VCSEL^[4]。此后 1310 nm^[5]和 1550 nm^[6]波长的 VCSEL 相继被发明。VCSEL 顶部和底部的分布布拉格反射层(DBR)对纵向模式的控制十分有效,但是要实现横向单模输出,就必须同时对出射光加以横向限制,一般引入氧化层使得透光直径小于 3 μm 来实现电流限制和光限制。然而透光直径很小使得其电阻很大,带来了调制带宽减小和速度降低的弊端^[7]。光子晶体(PC) VCSEL 的发明解决了这一问题,在 VCSEL 顶部反射区域中引入光子晶体缺陷,光子晶体的中心缺陷区的折射率比其环绕孔区的有效折射率大,产生了全内反射,出射光只能沿垂直面方向传播。改变光子晶体结构的晶格类型、晶格常数、孔径数量、孔径尺寸等条件,可以使 PC-VCSEL 达到单横模条件^[8]。本文综述了 PC-VCSEL 的原理和研究进展,在此基础上对 PC-VCSEL 今后的研究提出了建议。

2 PC-VCSEL 原理

PC-VCSEL 是在传统 VCSEL 的顶部或底部 DBR 反射层中刻蚀出光子晶体,在垂直方向引入类似于光子晶体光纤的结构限制出光。根据对光的引导传输原理的不同,光子晶体光纤可分为两种:1)折射率引导型光子晶体光纤^[9],缺陷外层引入折射率小于中心缺陷处的折射率的材料,与传统光纤类似,利用全内反射导光;2)带隙引导型光子晶体光纤,光子晶体结构中包含光子禁带,光不能在包层中传播,只能在中心缺陷处传播。由于折射率引导型光子晶体光纤对工艺要求相对简单,因而常采用折射率引导型光子晶体光纤结构(下文提到的光子晶体结构均为折射率引导型)。光子晶体光纤结构可以采用立方、三角和六方晶格等,缺陷方式有单缺陷、七缺陷和十九缺陷等。

类似于普通光纤,光子晶体光纤的等效归一化频率可以写成

$$V_{\text{eq}} = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_{\text{eq}}^2}, \quad (1)$$

式中 Δ 为晶格常数, n_0 为光子晶体平板折射率, n_{eq} 为光子晶体的等效折射率。当满足 $V_{\text{eq}} < 2.405$ 时,光子晶体光纤可以传播单模光^[10],光子晶体光纤具有“无截止单模”特性,可以在极宽的频率范围内实现单模工作。

在理论分析中光子晶体光纤是无限长的,而运用在 VCSEL 里的光子晶体如果穿透整个 VCSEL,那么部分光子在有源区会直接通过光子晶体光纤结构泄漏出去,这将使激光器的阈值增大,因此一般只是在 VCSEL 的顶部 DBR 反射层引入有限深度的光子晶体,光子晶体的深度会影响到结构的等效折射率。深度等参数的改变对 VCSEL 的性能影响可以用有限元法(FEM)^[11]和时域有限差分法(FDTD)^[12,13]来计算。Yokouchi 等^[14]提出刻蚀深度对有效归一化频率的修正:

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

式中 n_{eff} 为 DBR 层的有效折射率, Δn 为光子晶体引起的有效折射率微扰, γ 为刻蚀深度系数,取值范围为 0~1。图 1 为不同晶格常数、不同刻蚀深度、不同缺陷个数下的有效归一化频率值。可以看出较小的晶格常数、较浅的刻蚀深度、较少的缺陷个数可以降低归一化频率值。

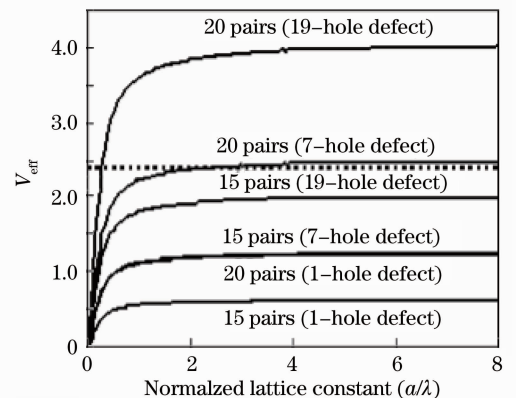


图 1 不同晶格常数、不同刻蚀深度、不同缺陷个数下的有效归一化频率值 V_{eff} ^[15]

Fig. 1 Effective normalized frequency V_{eff} with different lattice constants, etching depths and defect hole amounts^[15]

3 PC-VCSEL 的研究进展

3.1 不同结构的 PC-VCSEL 研究历程

2001 年 Unold 等^[16]在世界上首次研制成功了 PC-VCSEL。该 PC-VCSEL 是在传统选择氧化的 VCSEL 顶部 DBR 结构经过制作掩模、光刻和化学辅助离子束刻蚀等方法制备出光子晶体光纤结构,做出的

样品扫描电镜(SEM)图如图 2(a)所示。测试 4 种不同样品 S9,L9,S12,L12(S,L 分别代表较小和较大的空气孔径和占空比,9 和 12 代表氧化层直径分别为 $9 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$)的光强-电流-电压(L-I-V)曲线如图 2(b)所示,标定小圆圈以左为单模范围。比较发现较小的空气孔径和占空比可以扩大单模范围,但是带来的弊端是更大的阈值电流和更小的输出功率。测试的 4 个样品输出功率都很低,最高单模功率不到 0.5 mW 。

在研究了 DBR 中光子晶体刻蚀深度对单模条件的影响^[14]后,Yukouchi 等^[17]设计了 7 孔缺陷的 PC-VCSEL,如图 3(a)所示,与单缺陷的 VCSEL 相比,7 孔缺陷的 PC-VCSEL 的缺陷直径和 V_{eff} 值约是其他条件相同的单缺陷 PC-VCSEL 的 2 倍,具有更好的增强限制效果。图 3(b)为该 PC-VCSEL 的频谱图和出射激光图样,可以看出 7 孔缺陷的 PC-VCSEL 扩大了激光的出光面。

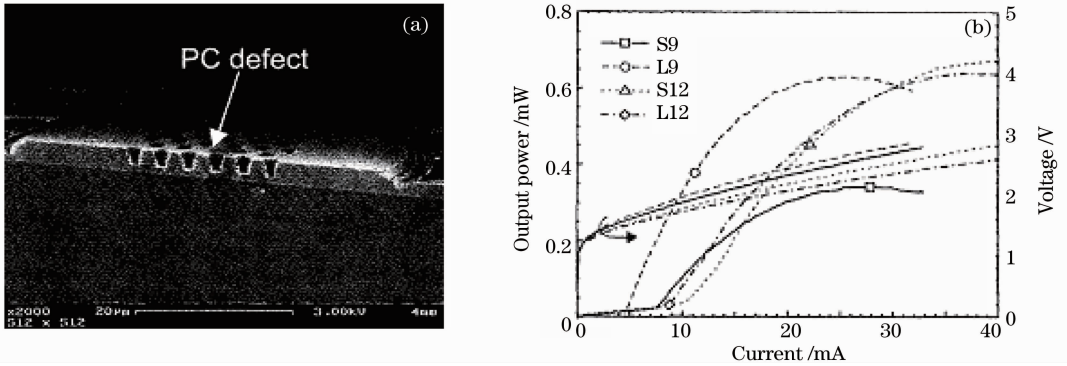


图 2 (a)光子晶体结构 SEM 图; (b) PC-VCSEL 的 L-I-V 图^[16]

Fig. 2 (a) SEM image of PC-VCSEL; (b) L-I-V curves of PC-VCSEL^[16]

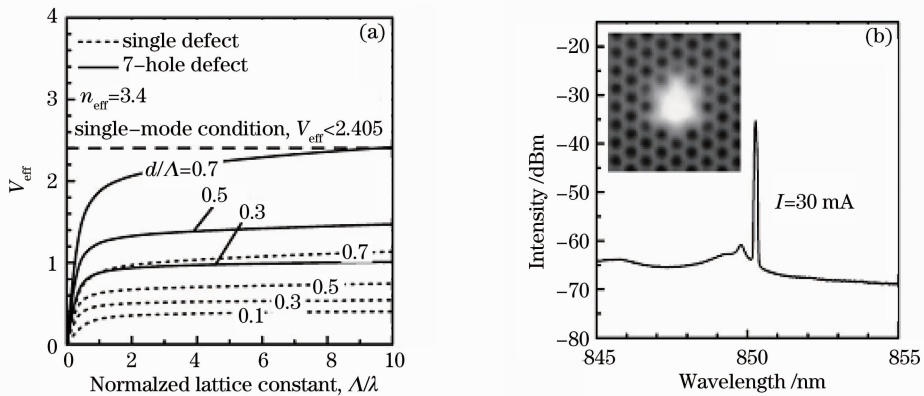


图 3 (a) 7 孔缺陷 PC-VCSEL 与单缺陷的 V_{eff} 值比较; (b) 占空比为 0.5 的频谱图和出射激光图样^[17]

Fig. 3 (a) Comparison of V_{eff} between 7-hole defect PC-VCSEL and single defect; (b) lasing spectrum and near-field pattern of the emergent laser with duty cycle of 0.5^[17]

除了光子晶体结构常用的三角晶格外, Lee 等^[18]提出了采用正方晶格的 PC-VCSEL。图 4(a)为正方晶格光子晶体结构的上视图。在几种不同晶格常数、不同空气孔径大小和不同电流孔径下都实现了单模输出。图 4(b)中缺陷左右两边空气孔径比其他空气孔小一些,激光在两个方向受到的限制大小不同。图 4(c)为晶格常数为 $4.0 \mu\text{m}$, x 方向刻蚀较小直径圆孔的 PC-VCSEL 的 L-I 曲线,从中可以看出 x 方向能量明显高于 y 方向能量,实现了激光偏振输出。

在一系列实验之后,Danner 等^[19]构建了 PC-VCSEL 的理论模型,该理论通过高精度的等效折射率变化来预测一个给定的 VCSEL 是否工作在单横模模式,该理论与测试的几百个 PC-VCSEL 样品出射模式符合得很好。理论和测试比较中还发现 $V_{\text{eff}} < 0.6$ 属于不稳定态,光子晶体结构对光的限制能力不足,光会从光子晶体缺陷区域之外泄漏。

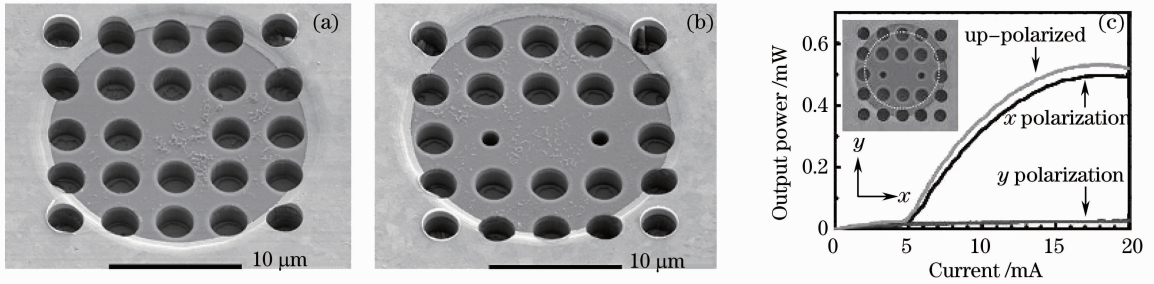


图 4 (a) 正方晶格光子晶体结构的 SEM 图; (b) 缺陷左右两边刻蚀较小孔径的空气孔; (c) 分解极化方向后的 $L-I$ 曲线^[18]

Fig. 4 (a) SEM image of square-lattice PC-VCSSEL; (b) modified PC-VCSSEL with smaller holes in the left and right srdes; (c) polarization-resolved $L-I$ characteristics^[18]

3.2 提高 PC-VCSSEL 的单模输出功率

在获得单模光的同时如何获得较大的输出功率是 PC-VCSSEL 面向应用的重要要求。刻蚀光子晶体结构使得通过 VCSEL 的电流减小,同时 PC-VCSSEL 的原理在于光子晶体光纤结构抑制了高阶模输出、获得单模输出,从而 PC-VCSSEL 的功率比同样结构的普通 VCSEL 要低一些,一般不超过 3 mW。另外,在 VCSEL 上刻蚀光子晶体孔后,GaAs 材料较大的表面复合损耗也是导致 PC-VCSSEL 功率降低的原因之一^[20]。为了提高 PC-VCSSEL 的单模输出功率,Danner 等^[21]测试了单模功率与氧化孔径宽度和光子晶体出光孔直径的关系。光子晶体结构为圆柱空气孔的三角阵列,中心有一个孔缺陷。图 5(a)的 3 种测试结果表明,随着氧化孔径的减小,最大单模功率增大,在保证单模条件下,光子晶体出光孔直径越大,单模功率就越大。最后,他们制备了氧化孔径为 9 μm ,光子晶体出光孔直径为 6.7 μm ,光子晶体深度为 16 对 DBR 的 PC-VCSSEL,图 5(b) $L-I-V$ 测试表明最大单模功率达到 3.1 mW。

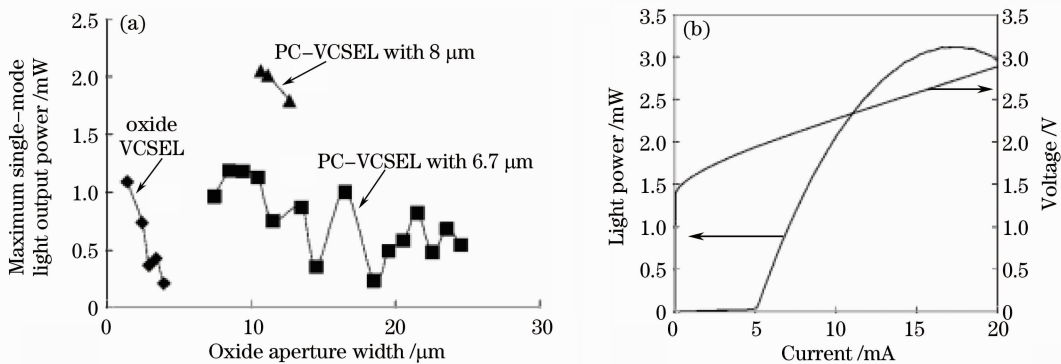


图 5 (a) 三种 VCSEL 最大单模输出功率比较; (b) 制备的 PC-VCSSEL $L-I-V$ 曲线^[21]

Fig. 5 (a) Dependence of the maximum single mode output power on oxide aperture diameter; (b) $L-I-V$ curve of fabricated PC-VCSSEL^[21]

量子点与量子阱相比具有更高的增益、更低的阈值电流密度和更高的特征温度等优越特性,因此采用量子点作为有源区的 PC-VCSSEL,可以使激光器获得更高的输出功率。已报道的亚单层量子点 PC-VCSSEL 单模输出功率达到 3.8 mW^[22],为当时的最高水平。最近又提出了如图 6(a)所示的混合采用点缺陷和环缺陷的 PC-VCSSEL,出光孔径的变大起到了提高输出功率的作用^[23],最大输出功率可达到 4.3 mW,如图 6(a)所示。但是现在的出射功率还是不够,距应用要求还有不小的距离,需要科研工作者不断优化光子晶体的工艺和结构。

3.3 控制 VCSEL 激光的偏振、减小发散角、相干耦合等

对于光开关、光全息、光存储和光双稳等对光偏振敏感的器件来说,控制光源的偏振特性非常重要。普通的 VCSEL 由于固有的对称性、模式竞争和双稳态等原因,其偏振态不容易预测和控制。而在 PC-VCSSEL 中,改变光子晶体的结构使其不对称,如孔为矩形^[24]、三角形和椭圆形,改变缺陷附近某些孔的大小,同时采用非对称电流输入可以获得不同偏振的激光输出,例如上面提到的正方晶格 PC-VCSSEL 改变缺陷周围圆形

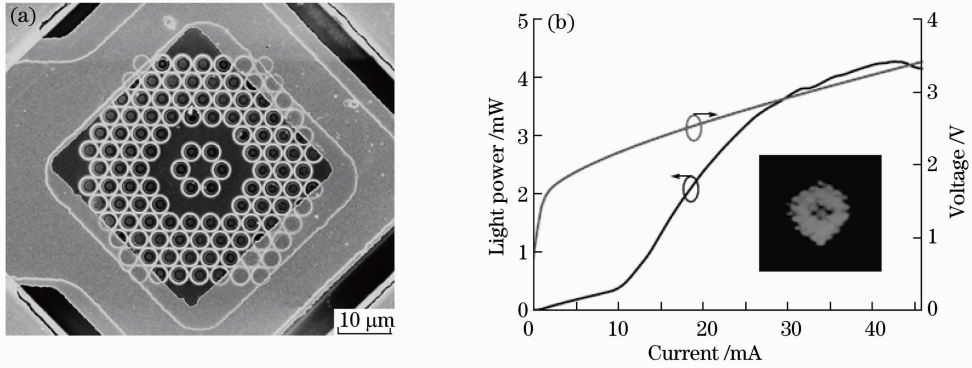


图 6 (a)混合采用点缺陷和环缺陷的 PC-VCSEL; (b) L-I-V 曲线和电流为 20 mA 时的出射激光图样^[23]

Fig. 6 (a) SEM image of hybrid point/ring defect PC-VCSEL; (b) L-I-V curve and the emergent lasing spot at 20 mA^[23]
孔直径就成功获得了 x 偏振激光。

在 VCSEL 上引入有限刻蚀深度的光子晶体,根据有效折射率计算其缺陷出光孔区和空气孔区之间的折射率差为未刻蚀光子晶体的 γ 倍^[25,26] (γ 是上文提到的刻蚀深度系数),折射率差的降低可以减小 VCSEL 的发散角。传统氧化层限制型 VCSEL 的发射角在 20° 左右,Liu 等^[27] 在理论和实验上证明了光子晶体结构对发射角减小的贡献,运用三维 FDTD 方法计算的平均发散角为 5.2° 。用湿法腐蚀、湿法氧化、电子束曝光和感应耦合等离子体刻蚀等技术制作的 VCSEL 在整个工作电流范围内发散角在 $5.1^\circ \sim 5.5^\circ$ 之间。

Danner 等^[28] 提出了利用 PC-VCSEL 阵列进行相干耦合的方法。图 7(a)为双缺陷单模出光的 PC-VCSEL 构成的 1×2 阵列,图 7(b)的远场测试结果表明,控制 PC-VCSEL 缺陷间的直径大小可以获得双缺陷出光的面内耦合,提高输出功率。同时 PC-VCSEL 阵列还可以使激光方向性更好,输出特殊要求的图形等。

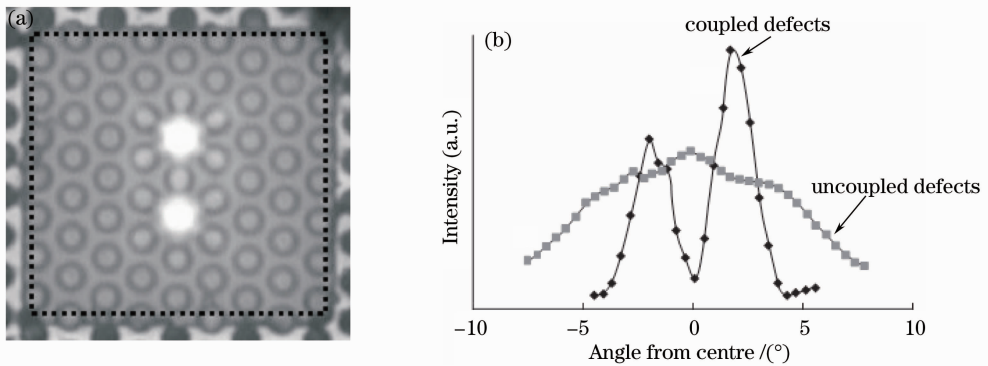


图 7 (a) 1×2 阵列 PC-VCSEL 近场单模出光图像; (b) 垂直方向不同角度下远场张度图像^[28]

Fig. 7 (a) Near-field image of PC-VCSEL with two defects lasing in their fundamental modes; (b) far-field intensity profiles in vertical direction at the different angle^[28]

3.4 国内研究现状

由于条件的限制,国内的研究单位开展 PC-VCSEL 的研究比国外晚了 5 年左右。中国科学院半导体研究所的集成光电子国家重点实验室 2005 年底研制成功了 850 nm 波长 PC-VCSEL,实现了连续电注入激光,相关文章发表在 2007 年初^[29];其他研究组也研制了激光波长 854 nm,边模抑制比大于 25 dB 的 PC-VCSEL 器件,并重点研究了光子晶体结构对 VCSEL 光束远场形貌的调控^[27]。北京工业大学的光电子技术实验室则建立了 PC-VCSEL 三维电流分布模型,并利用此模型分析了不同光子晶体结构对电流密度分布和串联电阻的影响^[30],近几年又与本课题组合作制成了阈值电流 2.5 mA,输出功率 1.7 mW,远场发散角小于 10° ,边模抑制比大于 35 dB 的 850 nm 单模 PC-VCSEL^[31]。总的来说,尽管国内比国外开展该项研究晚了几年,但国内科研人员充分利用现有条件,也做出了很多不错的成果。

3.5 PC-VCSEL 的应用

目前 850 nm 和 980 nm 的 VCSEL 技术已比较成熟,可用在短距离数据传输、无线光通信系统等方面。

由于光纤最低耗散和低色散波长位于 1550 nm,因而 1550 nm 波段 VCSEL 比常规的短波长 VCSEL 更适合长距离光纤传输。1550 nm VCSEL 中构成 DBR 反射层的 InGaAsP/InP 不容易被氧化,因而引入光子晶体结构就基本成为获得单模条件的唯一解决办法。随着信息容量逐渐增大和对数据传输速率的要求越来越高,传统的电互连暴露出了能量消耗高、发热量大、带宽小和时间延迟长等缺点。而光互连具有的高速无延迟、宽带宽、低功耗和无电磁干扰等优点使其成为电互连潜在的替代方案。PC-VCSEL 具有单模低成本高性能的特点,适合作为光互连中的光源。

除了在通信领域发挥作用外,PC-VCSEL 也可以应用到生物传感等方面。有学者提出在 PC-VCSEL 上通过湿法刻蚀把氧化层刻蚀掉,形成一个光子晶体结构到水平方向的通道^[32],实验中在通道内注入去离子水时频谱蓝移了 0.26 nm,而注入丙酮时频谱蓝移了 2 nm,同时在不同折射率流体腔时输出能量也不同^[33],根据这种机理可以制成生物传感器。PC-VCSEL 其他潜在应用还包括光存储、白光照明、图像显示以及并行激光打印机等。

4 结束语

本文对 PC-VCSEL 的工作原理、研究进展和应用前景等方向做了综述。在 VCSEL 的顶部 DBR 反射层刻蚀光子晶体结构达到了基横模激光输出的目的。然而在基横模输出的同时带来了激光输出功率下降的不足,本文综述了几种提高单模输出功率的方法,并探讨了如何控制 PC-VCSEL 激光偏振特性、减小发散角等问题。为了进一步提高 PC-VCSEL 的性能,使其具有可调谐、低阈值、稳定单模、高输出功率、高光电转换效率的优点,我们建议 PC-VCSEL 的工作从以下方面开展:

- 1) 探索更多结构和不同参数的光子晶体结构,使 VCSEL 获得单横模的同时达到工业上不同的需求。
- 2) 使用量子点作为有源区材料。量子点的态密度分离,发出的光具有极窄的发射谱。采用量子点作为有源区,具有更高的增益、更低的阈值电流密度和更高的特征温度等优越特性。
- 3) 平衡光子晶体结构和氧化层对电流和光的限制。氧化层起着电流限制和光限制两方面的作用,光子晶体光纤结构起着光限制的作用。如何平衡光子晶体光纤结构和氧化层对电流和光的限制,需要不断通过实验慢慢摸索。
- 4) 提高刻蚀打孔精度,提高光子晶体结构的稳定性。目前一般采用刻蚀打孔生产光子晶体结构,刻蚀时使得孔径边缘不光滑。建议不断摸索电子束曝光和干法刻蚀制作光子晶体的工艺方法,在孔的质量和深度方面多做探索,提高光子晶体光纤结构的稳定性。

另外,对 VCSEL 外围电路的改进、散热考虑、模块化封装以及提高出光孔与外界的耦合效率等都是 PC-VCSEL 走向实用化必须考虑的问题。相信在工艺的进步和科研工作者的努力下,这些问题都会慢慢解决,把 VCSEL 的性能提高到令人满意的程度。

参 考 文 献

- 1 H. Soda, K. Iga, C. Kitahara *et al.*. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**(12): 2329~2330
- 2 K. Iga, I. Shin, S. Ohkouchi *et al.*. Room temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting junction laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **21**(6): 663~668
- 3 K. Iga, S. Kinoshita, F. Koyama. Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th}=6$ mA[J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(2): 134~136
- 4 R. S. Geels, S. W. Corzine, L. A. Coldren. InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1359~1367
- 5 T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki *et al.*. Near room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP surface emitting laser[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(10): 913~914
- 6 K. Uomi, S. J. B. Yoo, A. Scherer *et al.*. Low threshold, room temperature pulsed operation of 1.5 μm vertical-cavity surface-emitting lasers with an optimized multi-quantum well active layer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(3): 317~319

- 7 B. M. Hawkins, R. A. III. Hawthorne, J. K. Guenter *et al.*. Reliability of various size oxide aperture VCSELs[C]. Proceedings of 52nd Electronic Components and Technology Conference, 2002, 540~550
- 8 Song Qian, Xu Xingsheng, Zhao Zhimin *et al.*. The properties of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(1): 5~7
宋倩, 许兴胜, 赵致民等. 光子晶体垂直腔面发射激光器特性研究[J]. 激光杂志, 2007, **28**(1): 5~7
- 9 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 10 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 11 P. Nyakas. Full-vectorial three-dimensional finite element optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2427~2434
- 12 K. Morito, D. Mori, E. Mizuta *et al.*. Full 3D FDTD analysis of modal characteristics in VCSELs with holey structure [C]. *SPIE*, 2005, **5722**: 191~200
- 13 F. Liu, C. Xu, Y. Y. Xie *et al.*. Full 3D FDTD analysis of electromagnetic field in photonic crystal VCSEL[J]. *J. Phys.: Conference Series*, 2011, **276**(1): 012071
- 14 N. Yokouchi, A. J. Danner, K. D. Choquette. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, **9**(5): 1439~1447
- 15 A. J. Danner, J. J. Raftery, T. Kim *et al.*. Progress in photonic crystal vertical cavity lasers[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2005, **88**(5): 944~950
- 16 H. J. Unold, M. Golling, R. Michalzik *et al.*. Photonic crystal surface-emitting lasers: tailoring waveguiding for single-mode emission[C]. Proceedings of the 27th European Conference on Optical Communication, 2001, **4**: 520~521
- 17 N. Yokouchi, A. J. Danner, K. D. Choquette. Vertical-cavity surface-emitting laser operating with photonic crystal seven-point defect structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(21): 3608~3609
- 18 K. H. Lee, J. H. Baek, I. K. Hwang *et al.*. Square-lattice photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4136~4143
- 19 A. J. Danner, J. J. Raftery, N. Yokouchi *et al.*. Transverse modes of photonic crystal vertical-cavity lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **84**(7): 1031~1033
- 20 X. S. Xu, T. Yamada, A. Otomo. Surface recombination in GaAs thin films with two-dimensional photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, **92**(9): 091911
- 21 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
- 22 F. I. Lai, H. P. D. Yang, G. Lin *et al.*. High-power single-mode submonolayer quantum-dot photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1318~1323
- 23 A. J. Liu, W. Chen, H. W. Qu *et al.*. Hybrid point/ring-defect photonic crystal VCSEL with high spectral purity and high output power[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(5): 379~382
- 24 J. H. Baek, D. S. Song, I. K. Hwang *et al.*. Transverse mode control by etch-depth tuning in 1120-nm GaInAs/GaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 859~867
- 25 G. R. Hadley. Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(13): 1483~1485
- 26 Liu Anjin, Xing Mingxin, Qu Hongwei *et al.*. Control of the photonic crystal waveguide over the beam profile of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1035~1039
刘安金, 邢名欣, 渠红伟等. 光子晶体波导对垂直腔面发射激光器光束远场形貌的调控[J]. 物理学报, 2010, **59**(2): 1035~1039
- 27 A. J. Liu, M. X. Xing, H. W. Qu *et al.*. Reduced divergence angle of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(19): 191105~191108
- 28 A. J. Danner, J. C. Lee, J. J. Raftery *et al.*. Coupled-defect photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 1323~1324
- 29 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
- 30 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

- 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
- 31 Xie Yi-yang, Xu Chen, Kan Qiang *et al.*. A single-fundamental-mode photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(2): 024206
- 32 K. Samakkulam, J. Sulkin, A. Giannopoulos *et al.*. Micro-fluidic photonic crystal vertical cavity surface emitting laser[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(14): 809~811
- 33 D. Kumar, H. Shao, K. L. Lear. Microfluidic cavity surface emitting laser based biosensor[C]. Proceedings of LEOS Annual Meeting, 2005, 118~119