

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^{*}

刘安金 邢名欣 渠红伟 陈 微 周文君 郑婉华[†]

(中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083)

(2009 年 4 月 18 日收到; 2009 年 5 月 22 日收到修改稿)

研究了光子晶体波导对垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 光束远场形貌的调控. 采用三层对称平板波导模型分析了影响光子晶体 VCSEL (PC-VCSEL) 远场发散角的参数. 研究表明, PC-VCSEL 中光子晶体的填充比 (空气孔直径和光子晶体周期的比值) 以及空气孔的刻蚀深度控制了光束的发散角, 低填充比和浅刻蚀的 PC-VCSEL 有利于获得低发散角的光束. 设计并制作了两种不同结构参数的 PC-VCSEL, 这两种器件中光子晶体的填充比和空气孔的刻蚀深度不同. 实验结果表明, 低填充比和浅刻蚀的 PC-VCSEL 的发散角更低, 与理论分析符合得很好.

关键词: 光子晶体波导, 垂直腔面发射激光器, 发散角

PACC: 4260F, 4255P

1. 引 言

垂直腔面发射激光器^[1,2] (VCSEL) 具有极低阈值激射、输出光束圆形对称、易于二维阵列集成等优点, 广泛应用于光互联、光通信、传感定位、光存储、激光打印等领域. 然而, 这些应用通常要求 VCSEL 单模工作. 由于氧化孔径比纵向的等效腔长大, 传统氧化限制型 VCSEL 通常多模工作. 目前, 实现 VCSEL 单模工作的方法有多种, 如缩小氧化孔径^[3]、表面刻蚀结构^[4]、楔形孔结构^[5]、反波导结构^[6]和光子晶体波导结构^[7,8]等. 对于 850 nm GaAs 基 VCSEL, 氧化孔径只有缩小到 3 μm 时才能实现单横模输出^[3]. 但是, 氧化孔径减小, 串联电阻增大, 降低了器件的调制速度^[9]. 表面刻蚀结构和楔形孔结构需要精确地控制结构参数, 可重复性差. 反波导结构需要二次外延工序, 制作工艺复杂. 而光子晶体波导结构, 也称作光子晶体 VCSEL (PC-VCSEL), 在上布拉格反射镜 (DBR) 引入三角晶格 (或者四方晶格) 排列的单孔缺陷 (或 7 孔缺陷) 光子晶体波导结构实现单模工作^[10-14]. 由于单模 PC-

VCSEL 的设计容差大^[15,16], 可重复性很高, 所以在过去几年中, PC-VCSEL 受到人们的广泛关注并得到深入的研究.

在实际应用中, VCSEL 光束的远场形貌至关重要, 如在光通信、光存储和传感定位中, 光束的远场形貌影响了耦合效率、存储密度以及定位精度等性能. 在之前的 PC-VCSEL 研究中, 人们更多地关注它们的横模特性, 而对 PC-VCSEL 的远场特性讨论较少. 本文研究了 VCSEL 中引入光子晶体波导对光束远场形貌的影响, 首先采用三层对称平板波导模型分析了 PC-VCSEL 中决定光束远场形貌的结构参数, 发现低填充比和浅刻蚀的 PC-VCSEL 有利于输出低发散角的光束, 然后设计并制作了两种不同结构参数的 PC-VCSEL, 证实了理论预测.

2. 理论分析和设计

在普通氧化限制型 VCSEL 中, 氧化孔径起了电流限制和光场限制的双重作用. 对于 850 nm GaAs 基单模 VCSEL, 由氧化引入的氧化区和非氧化区之间的折射率差 Δn 高达 0.03, 远场发散角 (半高宽

^{*} 国家重点基础研究发展计划特别基金 (批准号: 2006CB921700)、国家自然科学基金 (批准号: 10634080, 60677046, 60838003) 和国家高新技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03Z403) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: whzheng@semi.ac.cn

度)超过了 20° ^[17]. 然而在氧化限制型 PC-VCSEL 中,氧化孔径比缺陷出光孔径大,光子晶体波导解放了氧化孔径对光场的限制作用,氧化孔径只限制电流,光场由光子晶体空气孔限制.

在 PC-VCSEL 中,光子晶体波导的引入调整了上 DBR 的折射率分布,在空气孔区和缺陷区之间引入了折射率差 Δn . Δn_{eff} 是在 VCSEL 外延片上引入无限刻蚀深度的光子晶体而产生的有效折射率的变化(材料折射率 $n = 3.5$)^[18],我们采用平面波展开(PWE)方法进行了模拟分析,结果如图 1 所示, Δn_{eff} 随着填充比 d/a (空气孔直径和光子晶体周期的比值)的增大而增加. 然而,在实际器件中,刻蚀深度却是有限的,因此 Yokouchi 等^[18]引入刻蚀深度依赖因子 γ 来表征 PC-VCSEL 中有限刻蚀深度对横模特性的影响. 本文所用的 850 nm GaAs 基 VCSEL 外延片结构由 3 个 GaAs 量子阱有源区、20.5 对 p 型和 34.5 对 n 型 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 的上下 DBR、一层 30 nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化层组成, γ 随刻蚀深度的变化曲线如图 2 所示. 在 PC-VCSEL 中, Δn 为 Δn_{eff} 和 γ 的乘积.

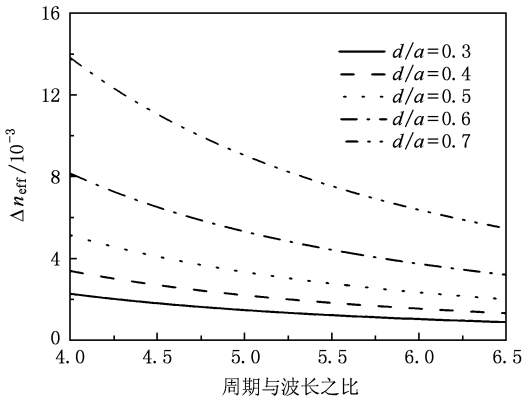


图 1 无限刻蚀深度下,不同 d/a 时,引入光子晶体而产生的 Δn_{eff} 和周期与波长之比的关系 材料折射率 $n = 3.5$,光子晶体的周期为 $5\text{ }\mu\text{m}$

本文研究了三角晶格排列的单缺陷 PC-VCSEL,光子晶体的周期 a 为 $5\text{ }\mu\text{m}$,填充比分别为 0.6 和 0.3,刻蚀深度分别为 10 对和 8 对 DBR,等效出光孔径分别为 7 和 $8.5\text{ }\mu\text{m}$,分别以器件 A 和 B 命名以示区别. 它们中由光子晶体波导引入的 Δn 为 10^{-4} 量级,且 V_{eff} 值介于 0.6—2.405 之间,满足稳定的单模工作条件^[19]. 由于 PC-VCSEL 结构的高对称性,输出光束几乎呈圆形对称,可以把缺陷出光孔区域视为芯层,把光子晶体空气孔区域视为包层,

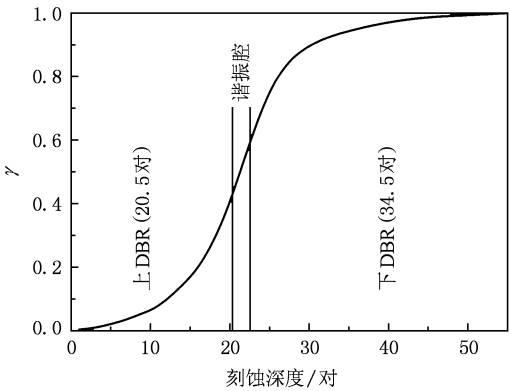


图 2 本文所用 VCSEL 外延片结构的刻蚀深度依赖因子与刻蚀深度的关系

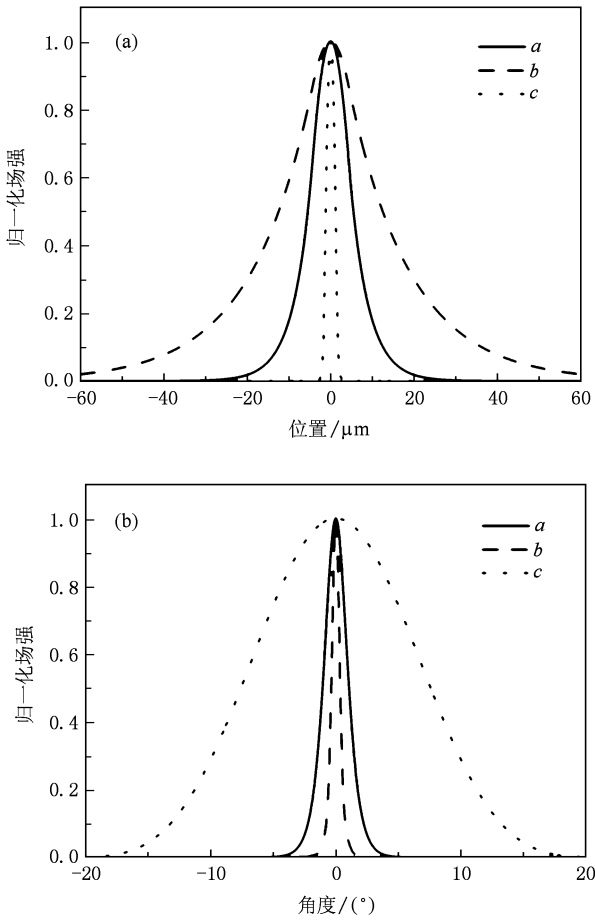


图 3 PC-VCSEL 的近场分布和远场分布图 曲线 a 表示填充比为 0.6,刻蚀深度为 10 对 DBR 的 PC-VCSEL;曲线 b 表示填充比为 0.3,刻蚀深度为 8 对 DBR 的 PC-VCSEL;曲线 c 表示氧化孔径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的普通氧化限制型单模 VCSEL. (a) 基于三层对称平板波导模型计算得到的近场的空间分布,(b) 基于图 (a) 采用傍轴近似的夫琅和费衍射理论得到的远场分布

采用三层对称平板波导模型分析 PC-VCSEL 的近场

分布,然后基于傍轴近似的夫琅和费衍射理论,得到了其远场分布. 此外,为了将普通单模 VCSEL 和 PC-VCSEL 远场分布进行比较,我们计算了氧化限制型单模 VCSEL 光束的远场分布. 图 3(a)为基于三层对称平板波导模型计算得到的近场分布图,对于普通氧化限制型单模 VCSEL,芯区和包层的 Δn 高达 0.03,光场被强烈限制在芯层,光强变化急剧. 由于 PC-VCSEL 中 Δn 为 10^{-4} 量级,光强变化平缓,而且 Δn 越小,光场强度变化越平缓. 图 3(b)为基于图 3(a)中的近场分布利用傍轴近似的夫琅和费衍射理论得到的远场分布,很明显,光子晶体波导能极大地减小面发射激光输出的发散角,而且出光孔区和光子晶体空气孔区之间的 Δn 越小,发散角也越小. 这是因为 PC-VCSEL 中 Δn 为 10^{-4} 量级,光子晶体波导是弱折射率导引的波导,其近场光场强度变化平缓,这减小了激光输出光束的发散角. 在 PC-VCSEL 中, Δn 由填充比和刻蚀深度决定,在稳定的单模工作条件下,填充比越小,刻蚀深度越浅,引入的 Δn 越小,器件的发散角也越小.

3. 制作和测量

为了证实前面的理论分析,我们采用上述外延片进行器件制备. 通过光学曝光和湿法腐蚀,首先制备出台面结构,露出氧化层,台面尺寸为 $86-90\text{ }\mu\text{m}$,然后在高温水汽中氧化形成氧化孔径,该氧化孔径的功能是限制电流,氧化孔径为 $20-24\text{ }\mu\text{m}$,再采用电子束曝光 (EBL) 技术在上 DBR 制作三角晶格排列的单缺陷光子晶体波导图形. 最后利用感应耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术将图形转移到上 DBR. 在相同的刻蚀时间下,填充比为 0.6 的光子

晶体图形的刻蚀深度为 10 对 DBR,而填充比为 0.3 的刻蚀深度为 8 对 DBR. 制作的 PC-VCSEL 表面形貌的扫描电子显微镜图如图 4 所示. 为了比较,我们在相同的外延片上制作了没有光子晶体图形的普通氧化限制型 VCSEL.

在室温、连续电流注入下,我们测试了器件的功率-电流性能,结果如图 5 所示,由于器件 B 的输出孔径比 A 要大,所以输出功率较高. 器件 B 在 35 mA 下输出光束的远场分布如图 6 所示,远场发散角为 6.6° ,在整个工作电流范围内,其远场发散角在 $6.6^\circ-7.2^\circ$ 之间. 器件 A 表现了类似的性能结果,在整个工作电流范围内,其远场发散角在 $6.9^\circ-7.4^\circ$ 之间. 由于器件 A 中光子晶体的填充比以及刻蚀深度比器件 B 中的大,引入的 Δn 比 B 中的大,测量得到的远场发散角也较大,和前面的理

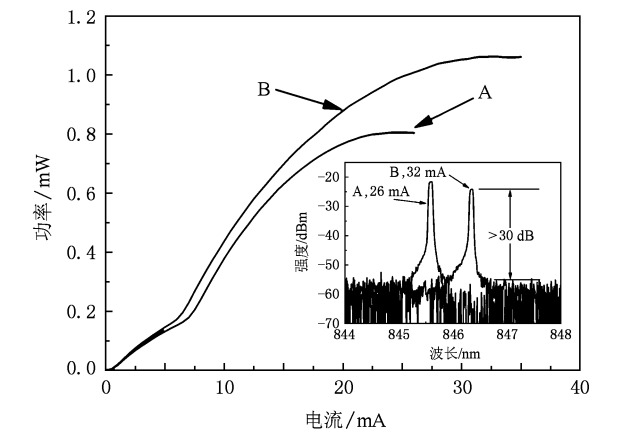


图5 器件 A 和 B 在室温连续电流注入下的功率-电流曲线 内插图是器件 A 和 B 分别在电流 26 和 32 mA 下激射光谱,边模抑制比超过 30 dB

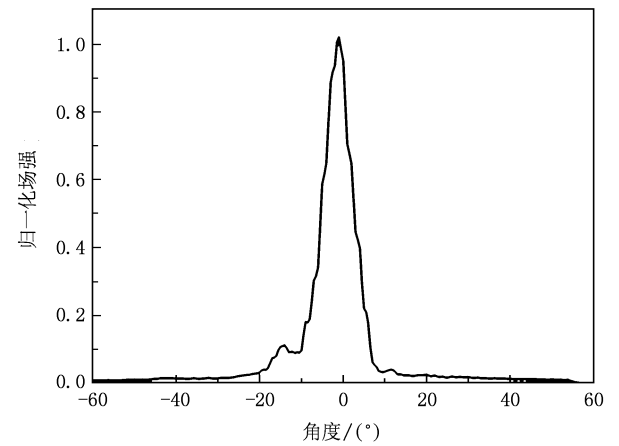


图6 器件 B 在电流 35 mA 下的远场分布

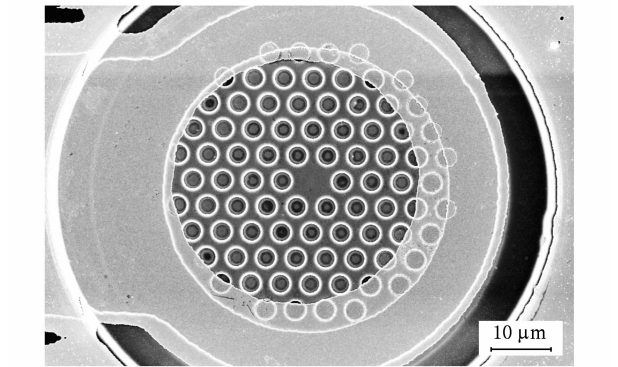


图4 器件 A 的扫描电子显微镜图 光子晶体的周期 a 为 $5\text{ }\mu\text{m}$,空气孔的直径 d 为 $3\text{ }\mu\text{m}$

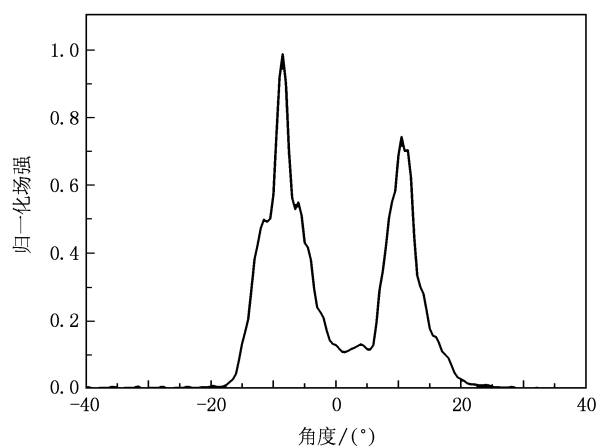


图7 普通氧化限制型 VCSEL 在电流 20 mA 下的远场分布

论分析符合得很好. 相同氧化孔径的普通 VCSEL 光束的远场形貌如图 7 所示. 比较图 6 和图 7 我们可以看到, 在 VCSEL 上 DBR 引入光子晶体波导, 极大地改善了 VCSEL 光束的远场形貌. 前面提到的采用缩小氧化孔径结构、表面刻蚀和反波导结构, 都实现了 VCSEL 的单模激励, 但是器件的激光输出光束发散角都超过了 10° ^[4,6,17]. 在我们的工作中, 从理论上和实验上都证明了 PC-VCSEL 不但实现了

单模工作, 同时将光束的远场发散角减小到 7.5° 以下, 而且引入的折射率差越小, 远场发散角也越小.

4. 结 论

本文采用三层对称平板波导模型分析了 PC-VCSEL 远场特性, 我们的理论分析和实验表明, 填充比和刻蚀深度决定了 PC-VCSEL 远场发散角. 在稳定单模工作条件下, 低填充比和浅刻蚀有利于减小光束的发散角. 我们设计并制作了两种不同参数的 PC-VCSEL, 测量结果表明, 光子晶体波导的引入极大地改善了 VCSEL 输出光束的远场形貌, 引入的折射率差越小, 发散角越小, 和理论分析符合得很好. 由于光子晶体对 VCSEL 上 DBR 折射率的微弱调整, 使得它能灵活有效地调控光束的远场分布, 氧化孔径为 $20\text{--}24\text{ }\mu\text{m}$ 时, 普通 VCSEL 远场发散角大于 30° , 而 PC-VCSEL 远场发散角降低到 7.5° 以下. 因此, 在 VCSEL 的上 DBR 引入光子晶体波导结构是一种调控 VCSEL 远场分布、获得低发散角光束的有效方法.

- [1] Iga K, Koyama F, Kinoshit S 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 1845
- [2] Lao Y F, Cao C F, Wu H Z, Cao M, Gong Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1954 (in Chinese) [劳燕萍、曹春芳、吴惠祯、曹萌、龚 谦 2009 物理学报 **58** 1954]
- [3] Weigl B, Michalzic M G R, Reiner G, Ebeling K J 1996 *IEEE Photonics Technol.* **8** 971
- [4] Martinsson H, Vukušić J A, Grabherr M, Michalzic R, Jäger R, Ebeling K J, Larsson A 1999 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **11** 1536
- [5] Furukawa A, Sasaki S, Hoshi M, Matsuzono A, Moritoh K, Baba T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5161
- [6] Zhou D, Mawst J L 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1599
- [7] Song D S, Kim S H, Park H G, Kim C K, Lee Y H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3901
- [8] Liu A J, Xing M X, Qu H W, Chen W, Zhou W J, Zheng W H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 191105
- [9] Al-Omari A N, Carey G P, Hallstein S, Watson J P, Dang G, Lear K L 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 1225
- [10] Yang H P D, Hsu I C, Chang Y H, Lai F I, Yu H C, Lin G, Hsiao R S, Maleev N A, Blokhin S A, Kuo H C, Chi J Y 2008 *J. Lightw. Technol.* **26** 1387

- [11] Romstad F, Bischoff S, Juhl M, Jacobsen S, Birkedal D 2008 *SPIE* **6908** 69080C1
- [12] Stevens R, Gilet P, Larrue A, Grenouillet L, Olivier N, Grosse P, Gilbert K, Hladys B, Bakir B B, Berggren J, Hammar M, Chelnokov A 2008 *Proc. SPIE* **6997** 69970X1
- [13] Kasten A M, Sulkin J D, Leisher P O, McElfresh D K, Vacar D, Choquette K D 2008 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **14** 1123
- [14] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3608
- [15] Baek J H, Song D S, Hwang I K, Lee K H, Lee Y H, Ju Y G, Kondo T, Miyamoto T, Koyama F 2004 *Opt. Express* **12** 859
- [16] Czynszanowski T, Dems M, Thienpont H, Panajotov K 2007 *Opt. Express* **15** 1301
- [17] Jr Raftery J J 2005 (Ph. D. Dissertation) (Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign)
- [18] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1344
- [19] Danner A J, Raftery Jr J J, Yokouchi N, Choquette K D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1031

Control of the photonic crystal waveguide over the beam profile of vertical-cavity surface-emitting lasers^{*}

Liu An-Jin Xing Ming-Xin Qu Hong-Wei Chen Wei Zhou Wen-Jun Zheng Wan-Hua[†]

(*Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 18 April 2009; revised manuscript received 22 May 2009)

Abstract

The control of the photonic crystal waveguide over the beam profile of vertical-cavity surface-emitting lasers is investigated. The symmetric slab waveguide model is adopted to analyze the control parameters of the beam profile in the photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting laser (PC-VCSEL). The filling factor (the ratio of the hole diameter to the lattice constant) and the etching depth control the divergence angle of the PC-VCSEL, and the low filling factor and the shallow etching depth are beneficial to achieve the low-divergence-angle beam. Two types of PC-VCSELs with different filling factors and etching depths are designed and fabricated. The experimental results show that the device with a lower filling factor and a shallower etching depth has a lower divergence angle, which agrees well with the theoretical predictions.

Keywords: photonic crystal waveguide, vertical-cavity surface-emitting lasers, divergence angle

PACC: 4260F, 4255P

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB921700), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10634080, 60677046, 60838003), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA03Z403).

[†] Corresponding author. E-mail: whzheng@semi.ac.cn