

氧化孔形状对光子晶体垂直腔面发射激光器模式的影响*

刘发 徐晨[†] 赵振波 周康 解意洋 毛明明 魏思民 曹田 沈光地

(光电子技术省部共建教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

(2011年5月5日收到; 2011年6月16日收到修改稿)

用时域有限差分方法对氧化孔限制型外腔式光子晶体垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在小氧化孔下氧化孔形状对激光器模式特性的影响进行了模拟计算. 建立了三维光子晶体面发射激光器光场计算模型, 分析了氧化孔形状变化对器件远场特性与频率特性的影响. 研究发现, 氧化孔形状可影响光子晶体 VCSEL 的模式特性, 尤其是频谱特性. 从模场分布的角度可解释为菱形氧化孔的对称性与高阶模的不一致. 但随着光子晶体刻蚀深度的增加和氧化孔的增大, 这种影响逐渐减小, 分析解释了其原因. 研究结果为提高光子晶体面发射激光器的性能提供了参考.

关键词: 光子晶体, 垂直腔面发射激光器, 氧化孔, 时域有限差分

PACS: 42.25.Bs, 42.55.Tv

1 引言

光子晶体垂直腔面发射激光器 (PhC-VCSEL) 是实现单基模大功率的有效的途径, 具有广阔的应用前景. 光子晶体 VCSEL 器件可由在氧化限制型 VCSEL 的上分布式 Bragg 反射镜 (DBR) 区刻蚀光子晶体结构来实现^[1]. VCSEL^[2] 由于腔长较短, 一般具有较好的纵向模式, 而横向模式较差. 因此, 我们需要用光子晶体来改善其横向模式, 实现器件的单基模出射^[3,4]. 根据有效折射率理论, 光子晶体光纤要实现单基模必须满足条件: 波导归一化频率 V 小于 2.405^[4-6]. 单基模光子晶体 VCSEL 的结构就是根据这一理论进行设计. 此时, 器件中的氧化孔被认为只起到对电流的限制作用, 其在常规 VCSEL 中对光的限制作用现在由光子晶体来完成, 而不考虑氧化孔对模式特性的影响.

然而, 光子晶体 VCSEL 结构中, 氧化孔对激光器模式特性仍有影响, 特别是当为了减小阈值电流, 氧化孔径必须减小, 与光子晶体缺陷孔接近时影响更大. 氧化限制型 VCSEL 的台面结构

一般被设计成圆柱, 氧化孔相应也是圆形. 但氧化孔比较小时, 一般规律是呈菱形 (由于高铝层的氧化速度的各向异性^[7]). 图 1 为不同氧化时间时氧化孔的形状. 已有对 VCSEL 中的氧化限制层的专门研究. 例如, Ivanov 和 Sukhoivanor 研究了氧化限制型 VCSEL 的温度特性^[8], Bienstman 和 Baets 分析了常规 VCSEL 中氧化孔对模式特性的影响^[9], Sharizal 和 Leisher 研究了氧化孔大小对 VCSEL 的功率、阈值电流、电阻等器件特性的影响^[10]; Czyszanowski 和 Tomasz 比较了 650 nm GaInP VCSELs 中氧化限制层与光子晶体的模式限制作用^[11]. 但这些报道中都没有考虑氧化孔形状带来的影响, 特别是光子晶体 VCSEL 中氧化孔形状对激光器模式特性影响的研究尚未见报道.

传统的分析光子晶体 VCSEL 方法是利用光子晶体光纤模型, 并通过引入刻蚀因子进行仿真^[4-6,12]. 而本文则是从光学微腔角度出发, 用电磁场时域有限差分方法 (FDTD) 进行模拟, 将整个激光器的谐振腔一起分析. 计算得到了器件内部的光场分布, 并以此为基础, 用频谱分析方法与近-远

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2008AA03Z402)、北京市自然科学基金 (批准号: 4092007) 和国家自然科学基金 (批准号: 61076044) 资助的课题.

[†] E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn

场外推公式, 计算出了器件的频谱特性与远场分布图. 通过比较不同器件的频谱特性与远场分布图, 分析了氧化孔形状对激光器模式特性的影响. 这种分析方法不仅可以分析同一模型下不同氧化孔对模式特性的影响, 还可以拓展到不同光子晶体结构下进行研究. 为了更易于进行研究, 本文忽略了电流分布^[13,14]与热特性等对器件的影响.

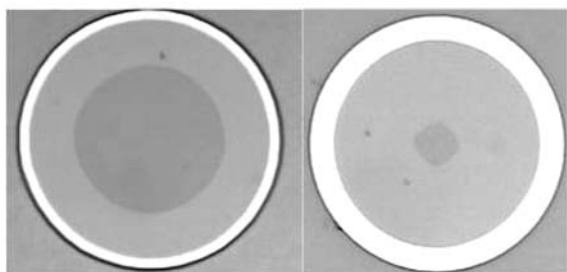


图1 氧化孔在不同尺寸下的实际形状

2 理论分析与模型设计

谐振腔是激光产生的基本条件之一, 谐振腔的质量对激光器的功率、模式特性等性能有着直接影响. 在光子晶体 VCSEL 中, 器件的上下 DBR 构成了激光器的谐振腔^[15,16]. 用 FDTD 方法进行模拟, 将一定频率范围的 Gauss 脉冲加入谐振腔中, 光场就会在腔内进行反复振荡. 满足谐振条件、损耗相对较小的模式分布, 会随着模拟时间的延长而逐渐凸显出来. 这种分析方法具有以下几个主要特点: 将整个谐振腔纳入了模拟区域, 模型与实际器件的接近程度很高; 可以直接得到谐振腔的共振波长、品质因子与模场分布等重要特性; 通过近-远场外推公式, 可得到激光的远场分布图; 方法简单, 通用性强. 不足之处是对计算机资源与模拟时间需求较大.

品质因子 Q 是微腔的重要参数^[17]. 由于 FDTD 方法直接计算得到的是电磁场分量随着时间变化的时域信号, 还需要将其转化为频域才能计算 Q 值, 目前广泛使用的是 Fourier 变换. 计算步数越多, 得到的分辨率越高. 本文通过频谱分析来计算 Q 值, 计算公式为: $Q = \frac{\omega_0}{\delta\omega}$, 其中 ω_0 和 $\delta\omega$ 分别是谐振频率和半高线宽^[18].

因 FDTD 方法只能计算有限空间内的电磁场, 要获得远区的散射或辐射场必须用等效原理^[19]. 结合近-远场外推的要求, 等效原理简述如下: 在

散射体周围引入虚拟界面 A, 设 A 面外为真空; 如果保持界面 A 处场 E, H 的切向分量不变, 而令 A 面内的场为零, 则根据唯一性定理, 这两种情况在面 A 外的场 E, H 有相同的分布.

具体的氧化限制型外腔式光子晶体 VCSEL 器件结构见图 2(a)^[13], 其中包括上 DBR 22.5 对, 下 DBR 34 对, 下面是衬底. 不同组分的 DBR 折射率不同, 折射率数值取 3.0—3.5 之间, 而氧化层折射率取 1.6. 器件的光子晶体结构如图 2(b) 所示, 刻蚀孔直径为 $1 \mu\text{m}$, 周期 $2 \mu\text{m}$, 中心缺陷孔半径约为 $7 \mu\text{m}$, 刻蚀深度取 $1.5 \mu\text{m}$. 根据 V 参数公式^[4-6], 这样的光子晶体结构满足单基模条件. 由于只需要考虑腔内的情况, 所以我们模拟的总厚度包括整个上下 DBR, 约 $8 \mu\text{m}$. 但受到计算机容量限制, 同时考虑到在器件的边缘区域光强很弱, 可以忽略不计, 所以我们计算的横向区域只有围绕缺陷孔的大约四圈光子晶体. 另外, 采用对称技术, 只取其中的四分之一作为模拟区域, 再用镜像法得到整个区域的计算结果. 最终参与计算的区域为 $11 \mu\text{m} \times 9.5 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$.

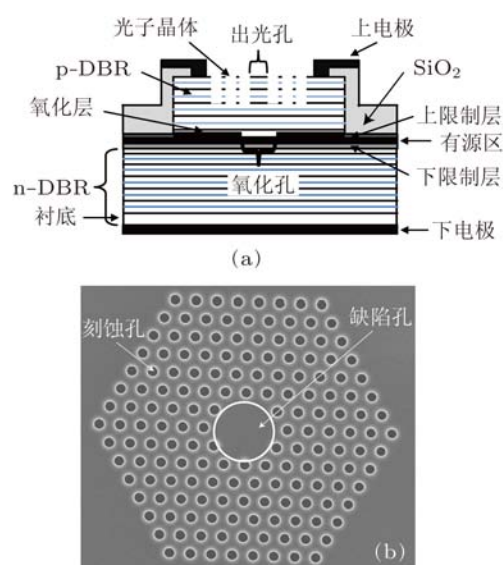


图2 (a) 光子晶体 VCSEL 结构示意图; (b) 光子晶体结构图

为了能够区分由于氧化孔的面积和氧化孔的边缘到中心的最短距离所带来的影响, 本文选取了一个圆形氧化孔、两个相似的菱形氧化孔进行模拟, 如图 3 所示. 一个菱形氧化孔的面积与圆形氧化孔的相当 (菱形氧化孔 1), 而另一个菱形孔则与圆外切 (菱形氧化孔 2), 这样就拥有与圆形氧化孔相同的最短距离. 圆形氧化孔直径为 $10 \mu\text{m}$, 面

积为 $78.5 \mu\text{m}^2$. 另外参照实验结果, 其中一个菱形孔对角线长度分别为 $10 \mu\text{m}$ 与 $14 \mu\text{m}$, 中心到边长距离为 $4.069 \mu\text{m}$, 面积为 $70 \mu\text{m}^2$; 另一个菱形孔与第一个相似, 中心到边长距离为 $5 \mu\text{m}$, 面积为 $105.7 \mu\text{m}^2$. 光子晶体刻蚀深度取实验中经常采用的常规刻蚀深度 $1.5 \mu\text{m}$.

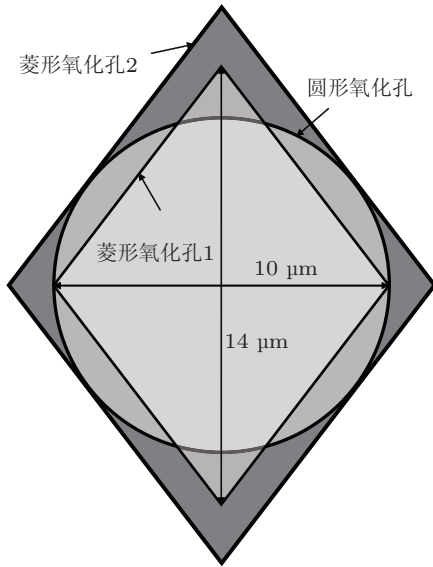


图3 三种氧化孔形状大小示意图

用上述模型, 使用 FDTD solution 软件模拟, 研究了不同刻蚀深度与不同氧化孔结构下的激光器光场分布与模式特性.

3 计算结果与讨论

判断实际激光器件是否为单基模器件的主要依据一般是看频谱特性与远场发散角. 在我们的研究中, 将谱线宽带小于 0.1 nm , 边模抑制比大于 30 dB , 远场发散角小于 10° 的器件, 认为是单基模器件 [12,20,21]. 在本文中, 根据这样的判断条件, 采用了两种主要的方式来分析模式特性: 一是分析频谱特性图, 如果谱线在 850 nm 附近的峰值相对越高, 而其他谱线的增益抑制得越好, 则认为频率特性越优越; 二是分析由远场光斑所得到的发散角, 如果远场发散角越小, 场强分布越集中, 则认为器件远场特性越佳.

图 4(a) 是三种氧化孔的器件频谱特性比较图, 其中光子晶体刻蚀深度为 $1.5 \mu\text{m}$; 横坐标表示频率 (850 nm 对应为 352.9 THz 处), 纵坐标代表相对强度, 三种线条分别代表圆形孔、菱形孔 1 和菱形

孔 2. 可以看出, 菱形孔的频谱特性要明显优于圆形孔, 而菱形孔 2 的频谱要优于菱形孔 1. 这说明菱形氧化孔对其他频率的模式有着更高的抑制作用, 因而更容易获得单基模. 因此可得出结论, 菱形孔有助于器件频率特性的改善, 菱形孔面积越大, 效果越好.

考虑到氧化孔对器件模式特性的影响还与刻蚀深度有关, 所以与图 4(a) 类似, 图 4(b), (c) 给出了 $2.0 \mu\text{m}$ 与 $2.5 \mu\text{m}$ 下三种氧化孔器件的光谱特性比较. 从这两幅图片中可以看出, 从刻蚀深度 $1.5 \mu\text{m}$ 下得出的结论依旧适用, 只是这种效果随着深度的增加而逐渐减弱. 这可解释为, 刻蚀越深, 光子晶体对光的控制作用越强, 对模式的限制作用越大, 而氧化孔的作用就相对减弱. 但实际器件很少刻蚀到超过 $2 \mu\text{m}$, 所以氧化孔对频谱特性的影响是较大的.

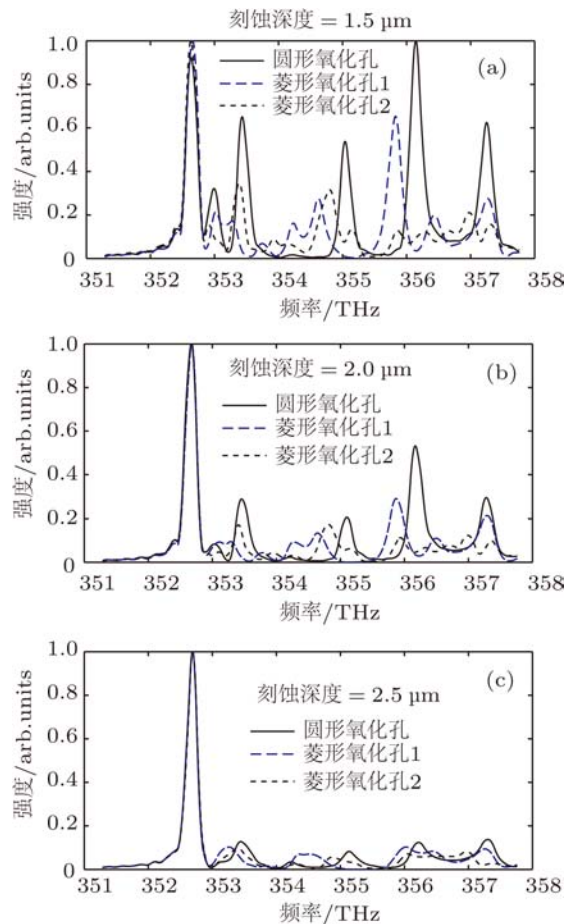


图4 (a) 刻蚀深度为 $1.5 \mu\text{m}$ 下的频谱比较; (b) 刻蚀深度为 $2.0 \mu\text{m}$ 下的频谱比较; (c) 刻蚀深度为 $2.5 \mu\text{m}$ 下的频谱比较

图 5 给出的是刻蚀深度为 $1.5 \mu\text{m}$ 下的远场水

平方向与垂直方向远场发散角的比较, 其中横坐标表示发散角, 纵坐标表示相对强度, 线条代表含义与图 4 类似. 可以看出, 三种氧化孔下的器件远场发散角比较接近, 这里的发散角定义为相对强度是最大值的半高宽^[21]. 圆形氧化孔器件的水平发散角要小于菱形氧化孔, 而垂直发散角大小处于两种菱形氧化孔之间, 平均而言要稍小一些. 所以可以说菱形氧化孔对器件的远场特性有着并不明显的负作用. 模拟结果表明, 当刻蚀深度增加时, 这种作用就更小了.

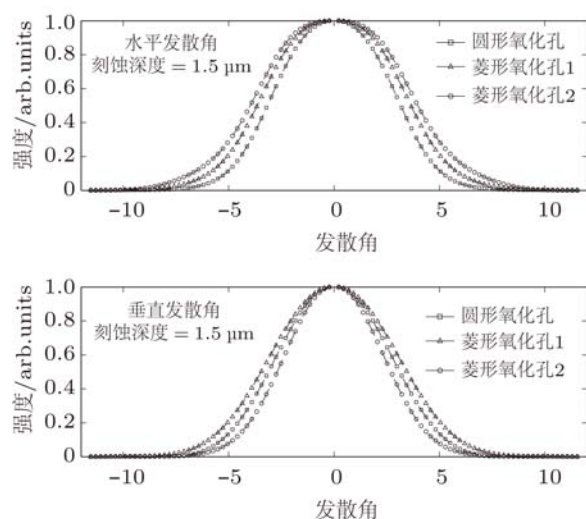


图 5 刻蚀深度为 1.5 μm 下水平与垂直发散的比较

总体而言, 菱形氧化孔对器件远场发散角稍有负面作用, 却有利于频谱特性的改善, 所以有利于器件模式特性的改善, 并且面积越大越显著, 但这两种影响都随着刻蚀深度的增加而逐渐减小. 从激光器模场分布的角度上来分析, 可根据 Laguerre-Gauss 近似^[22], 得到不同模式的场分布:

$$E_{mn}(r, \varphi) = C_{mn} \left(\sqrt{2} \frac{r}{\omega_{0s}} \right)^m \times L_n^m \left(2 \frac{r^2}{\omega_{0s}^2} \right) \times e^{-(r^2/\omega_{0s}^2)} \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases}, \quad (1)$$

E 为电场强度, C_{mn} 为归一化常数, m, n 为模式的

阶数, r, φ 为位置参数, ω_{0s} 为基膜光斑半径, $L_n^m(\xi)$ 为缔合多项式. 其对应的不同激光器的模式分布如图 6 所示. 从该图中可以看出, 基模的光斑分布区域要小于高阶模. 因此菱形氧化孔对器件的影响可以解释为面发射激光器的基模被完全包含在缺陷孔之内, 受到氧化孔形状的影响较小; 而高阶模式的分布区域较大, 且其对称性与菱形氧化孔的对称性不一致, 因此菱形氧化孔对高阶模式有着更强的抑制作用, 更有利于基模出射.

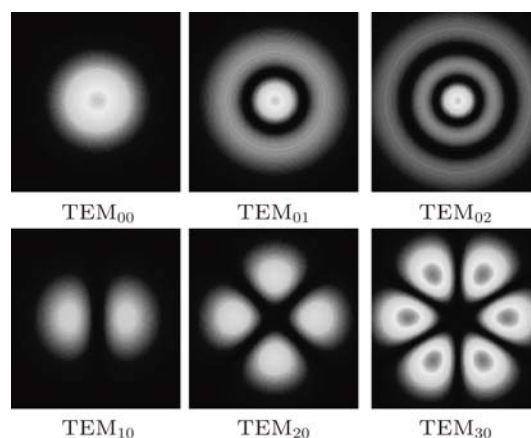


图 6 激光器不同模式的光斑比较

由于当氧化孔的尺寸减小到 10 μm 时, 氧化孔形状将不可避免地成为菱形, 所以我们不能获得圆形氧化孔来进行对比实验. 但是在实际器件的制作中, 在 10 μm 菱形氧化孔的条件下, 我们制备出了高性能器件^[23]. 在不考虑载流子浓度、器件热特性等其他因素的情况下, 菱形氧化孔对器件并无负面作用, 没有太大的必要采用各种工艺方法取得圆形氧化孔.

4 结论

在常规光子晶体刻蚀深度下氧化孔形状对光子晶体 VCSEL 模式特性有较大影响, 特别是对于频率特性. 在不考虑电、热等其他因素的情况下, 面积相近的菱形氧化孔器件的频率特性比圆形氧化孔器件的要好, 而远场特性稍差.

- [1] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 1996
- [2] Tomasz C, Maciej D, Krassimir P 2007 *Opt. Exp.* **15** 1301
- [3] Song D S, Kim S H, Park H G, Kim C K, Lee Y H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3901
- [4] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3608
- [5] Siriani D F, Tan M P, Kasten A M, Harren L A C, Leisher P O, Sulkin J D, Raftery J J, Danner A J, Giannopoulos A V, Choquette K D 2009 *J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 909
- [6] Alias M S, Shaari S, Leisher P O, Choquette K D 2010 *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* **100** 453
- [7] Huang J, Guo X, Qu H W, Lian P, Zhu W J, Zou D X, Shen G D 2003 *Semiconductor Optoelectronics* **24** 341 (in Chinese) [黄静, 郭霞, 渠红伟, 廉鹏, 米文军, 邹德恕, 沈光地 2003 半导体光电 **24** 341]
- [8] Ivanov P S, Sukhoivanov I A 2000 *2nd International Conference on Transparent Optical Networks* Gdansk, Poland 213
- [9] Bienstman P, Baets R, Vukusic J, Larsson A, Noble M J, Brunner M, Gulden K, Debernardi P, Fratta L, Bava G P, Wenzel H, Benjamin K, Conradi O, Pregla R, Riyopoulos S A, Seurin J F P, Chuang S L 2001 *J. Quantum Electron.* **37** 1618
- [10] Sharizal A M, Leisher P O, Choquette K D, Choudhury P K, Mitani S M, Razman Y M, Fatah A M A 2007 *Optik* **120** 121
- [11] Czyszanowski T, Sarzata R P, Ptukasz, Dems M, Wasiaak M, Nakwaski W, Panajotov K 2007 *J. Quantum Electron.* **43** 1041
- [12] Liu A J, Xing M X, Qu H W, Chen W, Zhou W J, Zhen W H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1035 (in Chinese) [刘安金, 邢名欣, 渠红伟, 陈微, 周文君, 郑婉华 2010 物理学报 **59** 1035]
- [13] Wang B Q, Xu C, Liu Y M, Xie Y Y, Liu F, Zhao Z B, Zhou K, Shen G D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8542 (in Chinese) [王宝强, 徐晨, 刘英明, 解意洋, 刘发, 赵振波, 周康, 沈光地 2010 物理学报 **59** 8542]
- [14] Wu J, Summers H D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014213
- [15] Guo C Z, Chen S L 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1731 (in Chinese) [郭长志, 陈水莲 1997 物理学报 **46** 1731]
- [16] Peng H L, Han Q, Yang X H, Niu Z C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 863 (in Chinese) [彭红玲, 韩勤, 杨晓红, 牛智川 2007 物理学报 **56** 863]
- [17] Xiong Z G, Li Z Y, Zhang D Z 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3292
- [18] Zhao Z M 2006 *Ph. D. Dissertation* (Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing) [赵致民 2006 博士学位论文 (北京, 中国科学院半导体研究所)]
- [19] Ge D B, Yan Y B 2001 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (1St Ed.) (Xi'an: Xidian University Press) p90 (in Chinese) [葛德彪 2001 电磁波时域有限差分方法 (第一版) 第 90 页]
- [20] Grabherr M, Jeger R, Michalzik R, Weigl B, Reiner G, Ebeling K J 1997 *Photon. Technol. Lett.* **9** 1304
- [21] Liu A J, Xing M X, Qu H W, Chen W, Zhou W J, Zheng W H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 191105
- [22] Yan J X 2006 *Principles and Applications of Laser Technology* (1St Ed.) (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p96 (in Chinese) [阎吉祥 2006 激光原理技术及应用 (第一版) 第 96 页]
- [23] Xie Y Y, Xu C, Kan Q, Wang C X, Liu Y M, Wang B Q, Chen H D, Shen G D 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 024206

Study on influence of oxide aperture shape on modal characteristics of VCSELs*

Liu Fa Xu Chen[†] Zhao Zhen-Bo Zhou Kang Xie Yi-Yang Mao Ming-Ming
Wei Si-Min Cao Tian Sheng Guang-Di

(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

(Received 5 May 2011; revised manuscript received 16 June 2011)

Abstract

The effects of oxide aperture shape whose size is small, on the mode characteristics of external cavity oxide-confined photonic crystal vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) is studied extensively based on the finite-difference time-domain algorithm. A new three-dimensional model of optical field in photonic crystal VCSEL is built and the influence of the variation in aperture shape on the characteristics of far-field and spectrum is pointed out. It is found that the modal characteristics of PhC-VCSEL are influenced by the shape of oxide aperture, the influence on spectrum feature is more apparent. It can be explained from the distribution of modal field by the fact that the symmetrical characteristic of prismatic oxide aperture is not identical to that of high-order mode. But the influence is less apparent while the depth of photonic crystal hole is deeper. The reason for this matter is illustrated. The results can be used to guide the fabrication of external cavity oxide-confined photonic crystal VCSELs.

Keywords: photonic crystal, vertical cavity surface emitting lasers, oxide aperture, finite difference time domain

PACS: 42.25.Bs, 42.55.Tv

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA03Z402), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4092007), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61076044).

[†] E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn