

# 光子晶体垂直腔面发射激光器的 电流分布研究\*

王宝强 徐 晨<sup>†</sup> 刘英明 解意洋 刘 发 赵振波 周 康 沈光地

(北京工业大学北京市光电子技术实验室, 北京 100124)

(2009 年 11 月 17 日收到; 2010 年 5 月 26 日收到修改稿)

对氧化限制型外腔式光子晶体垂直腔面发射激光器注入到有源区的电流密度分布进行了分析研究. 提出三维电流分布计算模型, 研究了光子晶体结构对电流密度分布和器件串联电阻的影响. 研究发现, 光子晶体孔刻蚀深度越深, 电流分布圆对称性越差, 引起的串联电阻越大. 不同光子晶体图案对电流分布的均匀性和圆对称性也有很大的影响. 该模型对于研究、设计氧化限制型外腔式光子晶体垂直腔面发射激光器提供了一个有用的分析方法.

**关键词:** 光子晶体, 垂直腔面发射激光器, 电流分布

**PACC:** 4255P, 4260H

## 1. 引 言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在光网络、数据传输、光互联、光存储和激光打印中有广阔的应用前景. 在许多领域中 (如长距离数据通信、长途通信接入网、光纤耦合等) 需要 VCSEL 单模大功率光输出. 但是, 常规氧化限制型 VCSEL 要实现单模工作, 氧化孔径需在  $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ , 不仅工艺难以控制, 也限制了出光功率, 且串联电阻大. 所以, 要获得高功率单横模是比较困难的, 而光子晶体 VCSEL 为此提供了一个很好的途径<sup>[1-5]</sup>. 光子晶体 VCSEL 是在其上分布布拉格反射 (DBR) 区刻蚀带有缺陷的周期性分布的空气孔, 其结构如图 1 所示. 该结构类似于光子晶体光纤结构<sup>[6,7]</sup>, 能控制光学模式, 使得器件在较大的氧化孔下依然保持单模工作. 大的氧化孔径会有相应大的出光孔径和高的出光功率, 这样既可实现高功率单横模输出, 又提高了与单模光纤的耦合效率, 同时也降低了氧化工艺的难度. 由于光子晶体对 VCSEL 模式的控制作用, 目前国内外许多科研人员对其进行了广泛的研究<sup>[8-12]</sup>. 中国科学院半导体研究所已经研制出发散角为  $5.1^\circ$  的光子晶体 VCSEL<sup>[8]</sup>. Tomasz 等<sup>[9]</sup> 对波长为  $1300\ \text{nm}$  的底发射

光子晶体 VCSEL 进行了研究, 分析不同光子晶体结构、刻蚀深度等对阈值电流的影响. Yang 等<sup>[10]</sup> 研制的量子点光子晶体 VCSEL 的单横模光输出功率已达到  $5.7\ \text{mW}$ .

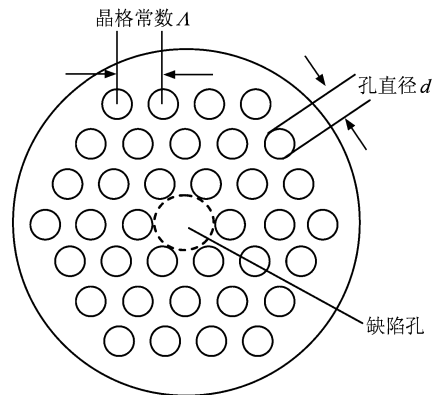


图 1 光子晶体结构示意图

光子晶体结构虽然可带来单模功率性能的改变, 但光子晶体结构的引入会影响注入电流的分布, 导致电流扩展不均匀<sup>[13]</sup>, 影响有源区载流子分布和模式变化<sup>[14]</sup> 以及串联电阻的大小. 目前, 已经有人对 VCSEL 的电流分布做了研究, 例如蔡鲁刚等<sup>[13]</sup> 用导电介质的稳态电场模型对增益导波型

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

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn

VCSEL 注入电流的空间分布及对激光近场模式影响进行了研究; Hegbolm 等<sup>[15]</sup>对氧化限制型 VCSEL 的电流分布进行了研究, 但是没有考虑上 DBR 区的电流分布; 此外, 还有 Lysak 等<sup>[16]</sup>对内腔接触型 VCSEL 的电流分布开展的研究. 但是, 有关光子晶体结构对 VCSEL 的电流分布以及对器件特性影响的研究作者至今尚未见报道.

本文采用我们所研制的氧化限制型外腔式光子晶体 VCSEL 结构, 对注入到其有源区的电流密度分布进行分析研究. 利用我们所提出的三维模型研究了光子晶体结构对电流密度分布和器件串联电阻的影响. 此模型可以直观地描述不同光子晶体结构对电流密度分布的影响, 对于研究、设计光子晶体 VCSEL 提供了一个有用的分析方法.

## 2. 模型的建立

根据具体的氧化限制型外腔式光子晶体 VCSEL 器件结构(图 2(a)), 我们提出的计算模型如图 2(b)所示, 其中上电极为一个顶面环形电极, 环形电极的内环和外环的半径分别为 20 和 30  $\mu\text{m}$ , 宽度为 10  $\mu\text{m}$ . 光子晶体结构的中心缺陷为光输出窗口, p-DBR 区厚度为 3  $\mu\text{m}$ . 由于我们主要考虑由

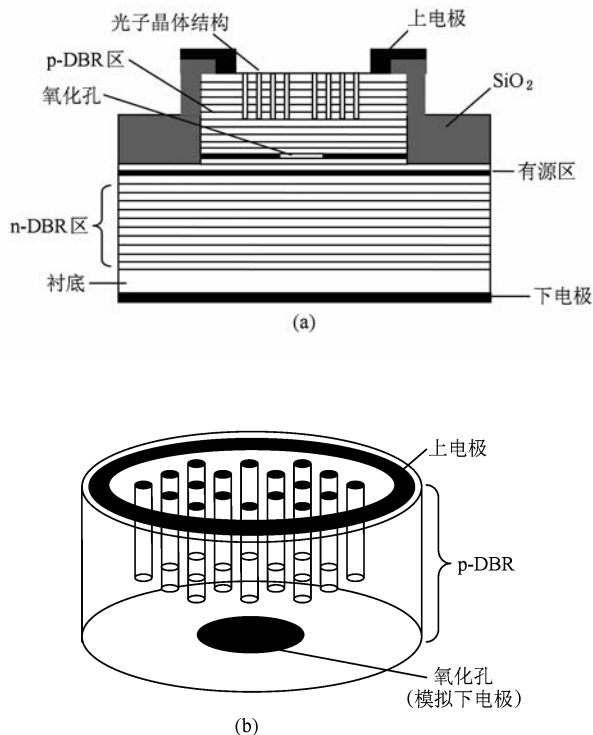


图2 光子晶体 VCSEL 结构及其电流密度分布模型  
(a) VCSEL 结构, (b) 电流密度分布模型

环形电极注入到有源区的电流密度分布, 且 DBR 区多层结构对电流密度分布的影响不大, 因而将 p-DBR 区作为均匀纯电阻区处理. 其次, 注入电流从氧化孔流入有源区, VCSEL 的下电极离氧化孔很远, 因而在氧化孔处电流基本垂直于氧化层所在的平面(我们的理论计算也证明了这一点), 所以可在氧化孔处用一圆形电极模拟上 DBR 区电流分布的边界条件, 氧化孔直径为 15  $\mu\text{m}$ , 标注为模拟下电极, 见图 2(b).

## 3. 计算结果及讨论

采用上述模型, 利用 ANSYS 软件进行模拟. 由于器件工作时电流大约为 20 mA, 估算降在上环形电极和模拟下电极之间 DBR 区上的电压为 0.25 V 左右, 又因 DBR 层作为均匀纯电阻处理, 改变电压值不会影响电流密度分布, 因此设定上环形电极和模拟下电极之间的电压为 0.25 V. DBR 区的电阻率取为<sup>[17]</sup> 0.01  $\Omega\text{cm}$ . 计算分析各种光子晶体结构对氧化孔横截面处的电流密度分布及对器件串联电阻的影响.

### 3.1. 不同光子晶体结构对有源区电流分布的影响

利用有效折射率分析模型<sup>[18]</sup>, 设计了能实现单模光输出的不同光子晶体结构. 理论计算表明, 若光子晶体孔直径  $d$  为 1—2  $\mu\text{m}$ , 晶格常数大于 4  $\mu\text{m}$ , 当占空比(光子晶体孔直径与光子晶体的晶格常数之比  $d/\Lambda$ ) 小于 0.5 时都满足单模条件. 另外, 我们在实验中利用上述参数已制作出了 1.7 mW 的单横模的光子晶体 VCSEL 器件<sup>[19]</sup>, 因此本文计算中采用晶格常数为 4, 5, 6  $\mu\text{m}$  三种结构进行模拟计算. 通过计算给出了光子晶体结构和氧化孔径固定而光子晶体刻蚀深度不同情况下电流密度在氧化孔区域的分布情况, 进而分析刻蚀深度对有源区电流密度的影响, 其中光子晶体结构的孔直径为 1  $\mu\text{m}$ , 晶格常数为 5  $\mu\text{m}$ .

图 3 给出了光子晶体刻蚀深度分别为 0, 1.5, 2, 2.5  $\mu\text{m}$  时氧化孔区域横截面上的电流密度分布, 图中不同灰度表示不同电流密度的大小, 且由边缘到中心电流密度逐渐减小. 从图 3 可以看出: 电流密度呈现边缘强、中心弱的特点. 在刻蚀深度较浅时, 电流密度分布呈现圆对称. 随着刻蚀深度的增加, 圆对称性越来越差, 进而会对激光器的单模输出特

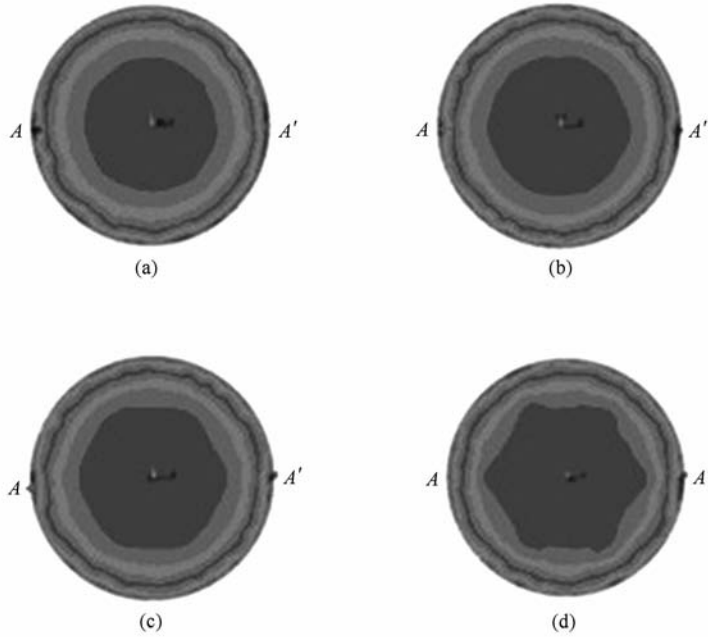


图3 氧化孔区域横截面上的电流分布 (a)没有刻蚀,(b)刻蚀深度为1.5 μm, (c)刻蚀深度为2 μm,(d)刻蚀深度为2.5 μm

性产生影响. 另外,不同的刻蚀深度对氧化孔边缘的电流密度分布基本没有影响,但是会影响电流密度的大小. 当刻蚀深度比较浅时,有一部分没有刻蚀光子晶体的 DBR 仍然对电流起到扩展作用,只有刻蚀到一定深度时,光子晶体对电流分布的影响才会比较大.

为了研究氧化孔区域横截面上沿各方向电流密度的变化规律,取图3中的AA'方向电流密度进行分析,所得结果如图4所示. 从图4可以发现,电流密度随着刻蚀深度的增加先稍减小再增加,且氧化孔区域中心的电流密度变化幅度较大,两边较小. 因此刻蚀深度不但影响电流密度分布,而且还会影响电流密度的大小,对激光器的输出模式有一定的影响.

图5给出了在刻蚀深度为2.5 μm、光子晶体孔直径 $d = 1.5 \mu\text{m}$ 、不同的光子晶体晶格常数条件下的氧化孔区域电流密度分布情况. 从图5可以发现,晶格常数 $\Lambda$ 越大,光子晶体结构对电流密度分布的圆对称性影响越大,且电流密度分布圆不对称性向边缘扩展. 造成这种现象的原因主要有两个方面. 第一,当固定光子晶体孔直径而增大晶格常数时,光子晶体的缺陷孔径也会随之增大,因而使得电流密度圆不对称性区域增大. 第二,较小的晶格常数

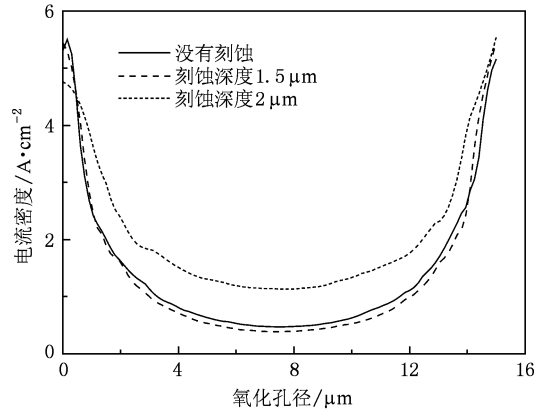


图4 氧化孔区域横截面上沿AA'方向电流密度随刻蚀深度的变化

意味着光子晶体孔间隔较小,相互靠近的光子晶体孔周围的电流相互影响,电流密度分布比较均匀;反之,较大的晶格常数会使得电流密度分布的圆对称性较差. 所以,光子晶体结构对电流分布的圆对称性有很大的影响.

分别取图5中的AA',BB'方向的电流密度进行分析,得到结果如图6所示. 由图6可以看出,晶格常数的变化会引起电流密度的变化,不同方向得到的电流密度变化程度也不同.

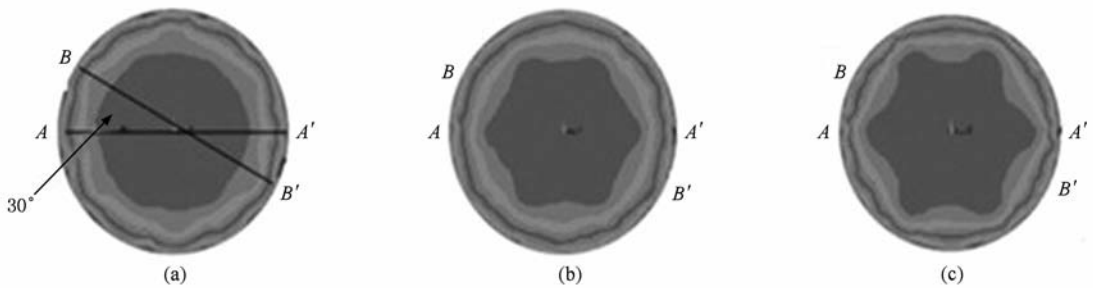


图5 不同光子晶体结构的电流密度分布 (a)  $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ , (b)  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ , (c)  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$

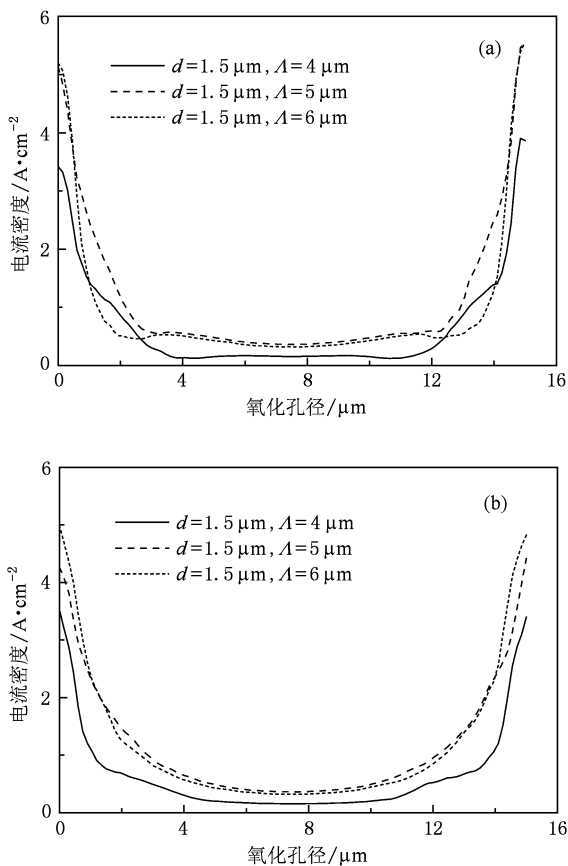


图6 氧化孔区域电流密度横向分布曲线 (a)  $AA'$ 方向, (b)  $BB'$ 方向

### 3.2. 光子晶体结构对串联电阻的影响

根据上述模型,不同的光子晶体结构会导致电流密度分布不均匀,而且也会带来 VCSEL 串联电阻的变化.图7给出了光子晶体结构一定时串联电阻随刻蚀深度的变化情况.由图7可以看出,当刻蚀深度小于  $1.5 \mu\text{m}$  时,光子晶体结构引入对串联电阻

基本没有影响,而刻蚀深度大于  $2 \mu\text{m}$  时,对串联电阻有较大的影响.这主要是由于随着刻蚀深度的增加,电流流过的面积减小,串联电阻增加.另一方面,在同样的电流横截面条件下串联电阻还与电流密度分布有关,随着刻蚀深度的增加,电流密度分布会更加不均匀,造成局部电流增加,使得串联电阻增加.

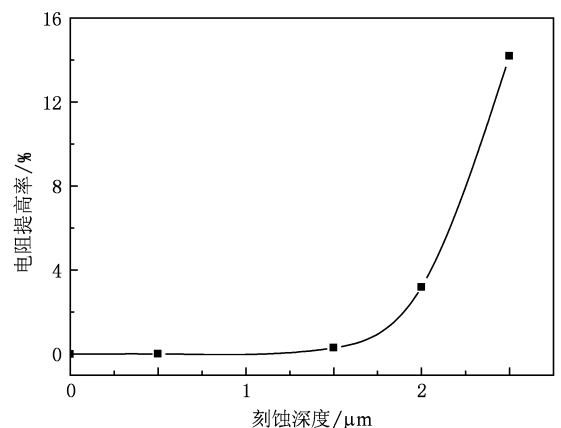


图7 串联电阻随刻蚀深度的变化情况

## 4. 结 论

通过对氧化限制型光子晶体 VCSEL 建立三维模型,分析了电流密度在上 DBR,特别是在氧化孔区域的分布情况.结果显示,不同光子晶体结构影响电流密度分布和串联电阻的大小,光子晶体刻蚀深度越深,对电流密度分布影响越大,电流分布圆对称性被破坏程度就越严重.当刻蚀深度小于  $1.5 \mu\text{m}$  时,串联电阻基本没有变化,而当刻蚀深度大于  $2 \mu\text{m}$  时,串联电阻会迅速增加.

- [1] Xu X S, Wang C X, Du W, Zhao Z M, Hu H Y, Song Q, Lu L, Kan Q, Chen H D 2007 *Physics* **36** 15 (in Chinese) [许兴胜、王春霞、杜伟、赵致民、胡海洋、宋倩、鲁琳、阚强、陈弘达 2007 物理 **36** 15]
- [2] Hong G P, Se H K, Min K S, Young G J, Sung B K, Yong H L 2005 *Quantum Electron.* **41** 1131
- [3] Noriyuki Y, Aaron J D, Kent D C 2003 *Quantum Electron.* **9** 1439
- [4] Dae S S, Se H K, Hong G P, Chang K K, Yong H L 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3901
- [5] Lan Y P, Chen Y F, Huang K F, Lai H C, Pan J S 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 272
- [6] Zhang L, Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang M Y, Zheng Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1101 (in Chinese) [张磊、李曙光、姚艳艳、付博、张美艳、郑义 2010 物理学报 **59** 1101]
- [7] Jiang L H, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1095 (in Chinese) [姜凌红、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 1095]
- [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] Tomasz C, Robert P S, Maciej D, Wlodzimierz N, Hugo T, Krassimir P 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 093102
- [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. Lightwave Technol.* **26** 1387
- [11] Liu J A, Xing M X, Qu H W, Chen W, Zhou W J, Zheng W H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1035 (in Chinese) [刘金安、邢名欣、渠红伟、陈微、周文君、郑婉华 2010 物理学报 **59** 1035]
- [12] Liu Y, Gong H R, Wei Y Y, Gong Y B, Wang W X, Liao F J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7845 (in Chinese) [刘漾、巩华荣、魏彦玉、宫玉彬、王文祥、廖复疆 2009 物理学报 **58** 7845]
- [13] Cai L G, Wu J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3531 (in Chinese) [蔡鲁刚、吴坚 2008 物理学报 **57** 3531]
- [14] Yang H, Guo X, Guan B L, Wang T X, Shen G D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2959 (in Chinese) [杨浩、郭霞、关宝璐、王同喜、沈光地 2008 物理学报 **57** 2959]
- [15] Hegbolm E R, Margalit N, Thibeault B J, Coldren L A, Bowers J E 1997 *Proc. SPIE* **3003** 176
- [16] Lysak V V, Chang K S, Lee Y T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 231118
- [17] Liu N K, Zhu B S, Luo J S 2005 *Semiconductor Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p99 (in Chinese) [刘恩科、朱秉升、罗晋生 2005 半导体物理学(北京:国防工业出版社)第99页]
- [18] Wang K 2008 *M. S. Thesis* (Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王科 2008 硕士学位论文(北京:中国科学院半导体研究所)]
- [19] 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 current spreading of photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers<sup>\*</sup>

Wang Bao-Qiang Xu Chen<sup>†</sup> Liu Ying-Ming Xie Yi-Yang Liu Fa

Zhao Zhen-Bo Zhou Kang Shen Guang-Di

(*Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(Received 17 November 2009; revised manuscript received 26 May 2010)

## Abstract

The distribution of injected current in the active region of external cavity oxide-confined photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers is studied extensively. An advanced three-dimensional model of current distribution is used to analyse the effects of photonic crystal structures on current density distribution and series resistance of the device. It is found that the deeper the photonic crystal holes are, the worse the circular symmetry of the current density distribution is and the higher the series resistance is, especially when the etching depths of holes are larger than 2  $\mu\text{m}$ . Different patterns of photonic crystal structures have a great influence on current density distribution and circular symmetry. The results are beneficial to the research and the design of external cavity oxide-confined photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers.

**Keywords:** photonic crystal, vertical cavity surface emitting lasers, current distribution

**PACC:** 4255P, 4260H

---

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn