

文章编号: 1001-9014(2010)05-0329-04

# 高功率高光束质量 980nm 垂直腔底面发射激光器

张岩<sup>1,2</sup>, 宁永强<sup>1\*</sup>, 王焯<sup>1,2</sup>, 刘光裕<sup>1,2</sup>, 张星<sup>1,2</sup>, 王贞福<sup>1,2</sup>  
史晶晶<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 张立森<sup>1,2</sup>, 秦莉<sup>1</sup>, 孙艳芳<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 长春 130033;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**报道了优化 p 面电极的高功率高光束质量 980nm 垂直腔底面发射激光器 (VCSEL). 采用数学模型对 VCSEL 的电流密度进行了模拟计算, 发现电流密度分布由氧化孔直径和 p 面电极直径决定. 确定氧化孔直径后, 优化 p 面电极直径可以实现电流密度的均匀分布, 抑制远场光斑中高阶边模的产生. 将 p 面电极直径优化为 580 $\mu\text{m}$ , 制作的 600 $\mu\text{m}$  的 VCSEL 远场发散角从 30° 减小到 15°, 优化器件的阈值电流和最高输出功率都略有增加. 通过改进器件封装方式后, 器件输出功率达到 2.01W, 激光波长为 982.6nm.

**关键词:**垂直腔面发射激光器; 高功率; 电流分布; 远场分布

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## HIGH POWER AND HIGH BEAM QUALITY 980nm BOTTOM-EMITTING VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASER

ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, NING Yong-Qiang<sup>1\*</sup>, WANG Ye<sup>1,2</sup>, LIU Guang-Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing<sup>1,2</sup>,  
WANG Zhen-Fu<sup>1,2</sup>, SHI Jing-Jing<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-Sen<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>,  
SUN Yan-Fang<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-Jun<sup>1</sup>

(1. Key laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and  
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A high-power and high beam quality 980nm bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with optimized p-contact aperture was reported. A numerical simulation of current density in a large aperture bottom-emitting VCSEL with oxidation between the active region and the top p-type mirror was conducted. It is found that the simulated current density profiles of VCSEL are dependent on the oxide aperture diameter and the p-contact diameter. For a fixed oxide aperture diameter, the homogeneous current density of the VCSEL could be realized by optimizing the p-contact diameter. Thus, the edge mode in far-field patterns was suppressed. The far-field divergence angle from a 600  $\mu\text{m}$  diameter VCSEL was suppressed from more than 30° to 15° and no strong sidelobe was observed in far-field pattern when the p-contact diameter decreased from 650  $\mu\text{m}$  to 580  $\mu\text{m}$ . There is a slight rise both in threshold current and optical output power due to the p-contact optimization. The VCSEL device produces the maximum optical output power of 2.01 W with lasing wavelength of 982.6nm by improving the device packaging method.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL); high power; current spreading; far-field distribution

收稿日期: 2009-04-22, 修回日期: 2010-06-18

Received date: 2009-04-22, revised date: 2010-06-18

基金项目: 国家基金重点项目垂直腔面发射大功率激光器的研究 (60636020); 国家基金项目微透镜集成垂直腔面发射大功率激光器的研究 (60676034); 国家基金项目电泵浦激励垂直外腔面发射半导体激光器阵列 (60706007); 国家基金项目高功率垂直腔面发射激光器基模问题的理论和实验研究 (10974012); 国家基金项目大功率垂直腔面发射激光器的偏振控制 (60876036); 国家自然科学基金重点项目飞秒激光微纳加工在高性能微光学元件制造中的应用基础研究 (90923037); 吉林省科技发展项目高功率、窄脉冲垂直腔面发射激光器 (20080335); 吉林省科技发展项目光通信用 650nm VCSEL (20080516); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助 (Supported by CAS Innovation Program)

作者简介: 张岩 (1982-), 男, 河北秦皇岛人, 博士生, 主要研究方向为半导体光电子器件. E-mail: qhdzhangyan@126.com.

\* 通讯作者: E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn.

## 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs) 具有圆形输出光束、动态单模工作、可在片检测、易于二维集成制作列阵器件以及易与其它光学元件集成等优良特性<sup>[1,2]</sup>. 随着器件结构的优化、DBR 外延技术的提高及湿法氧化技术的使用, VCSELs 器件的性能显著提高, 小直径低功率的 VCSELs 器件已经广泛应用于光通信、光存储、光学扫描及并行光互连等领域<sup>[3,5]</sup>. 同时, 高功率的 VCSELs 器件在医疗、材料处理、数据存储、激光泵浦等方面也具有广泛的应用前景, 特别是激光波长为 980nm 的 VCSELs 器件可以用于泵浦掺铒光纤放大器和光纤激光器, 也可以利用它来替代边发射半导体激光器泵浦固体激光器, 获得蓝绿光输出<sup>[6,8]</sup>. 为了获得高的功率输出, 我们采用了增加有源区面积的方法制作大直径单管器件, 与列阵器件相比, 单管器件有制作简单、散热要求低、更易于与光纤耦合等优势.

有源区内的电流分布对激光束光斑强度分布有直接影响, 特别是在大直径器件中表现的更为突出. 随着器件直径的增加, 激光束的远场光斑中会出现很强的边模, 从而增大器件的远场发散角, 增加光纤耦合的难度, 影响光纤耦合的效率. 因此对大直径面发射激光器注入电流在有源区内的分布进行研究是很有必要的. 本文模拟了氧化限制层位于有源区和 p 型 DBR 之间的底面发射 VCSEL 器件的电流密度分布, 计算了不同氧化孔直径和不同 p 面电极直径时有源区中的电流密度分布. 计算结果显示, 有源区中的电流密度分布受到氧化孔直径和 p 面电极直径的共同影响, 在确定氧化孔直径后, 通过优化设计 p 面电极的直径, 可以实现有源区中电流密度的均匀分布, 从而抑制远场光斑中高阶边模的产生. 将 p 面电极直径由 650 $\mu\text{m}$  减小到 580 $\mu\text{m}$  后, 制作的氧化孔径为 600 $\mu\text{m}$  的 VCSEL 器件的远场发散角从 30° 减小到 15°, 优化后器件的阈值电流和最高输出功率都稍有增加, 室温连续最高输出功率为 2.01W, 激光波长为 982.6nm.

## 1 外延片结构及理论计算

图 1 为底面发射 VCSEL 器件的结构图, VCSEL 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长而成. 有源区包括 3 个 6nm 厚的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  量子阱和 8nm 厚的  $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$  材料构成的势垒, 设计

激光波长约为 980nm. 有源区夹在两个  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  空间层间, 有源区及空间层构成一个波长的谐振腔. 为了获得良好的欧姆接触, 在外延片的最上层生长了 100nm 厚、掺杂浓度为  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  的 GaAs 接触层. p 型 DBR 由 30 对碳掺杂的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  构成. n 型 DBR 包括 22.5 对硅掺杂的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ , 使激光从衬底方向出射. 两种 DBR 在  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  和  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  间采用了渐变结构以减小电阻. 在有源区与 p 型 DBR 之间有一 30nm 厚的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层, 这一层经选择氧化后变成低折射率的高阻氧化物  $\text{Al}_x\text{O}_y$ , 形成由氧化物包围的氧化孔, 这样就形成了对有源区电流的限制, 决定了有源区的直径大小.

在模型计算中, 选用柱坐标, 设定坐标原点在 VCSEL 器件 p 面电极的中心, z 方向垂直于出光窗口并指向衬底. 电流从 p 面接触电极注入, 通过 p 型 DBR、有源区、n 型 DBR 流向 n 面接触电极. 计算此电流传输的拉普拉斯方程为<sup>[9]</sup>:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \cdot U) = 0, \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为电导率,  $U$  为电势. 假定 p 电极加电压为  $U_0$ , 计算使用的边界条件为:

$$U(0 \leq r \leq r_s, z = 0) = U_0, \quad (2)$$

$$U(r, z = d_{\text{all}}) = 0, \quad (3)$$

其中,  $r_s$  为 p 面电极半径,  $d_{\text{all}}$  为器件的总厚度. 电导率  $\sigma$  在方程中用矢量模型定义为:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 \\ 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

这里  $\sigma_z$  和  $\sigma_r$  分别表示柱坐标中 VCSEL 的轴向电导率和径向电导率. 为减少计算量, 假定各个 VCSEL 区域内具有均匀的轴向电导率  $\sigma_z$  和径向电导率  $\sigma_r$ . 采用文献[10]中的计算方法, 电导率由方程(5)和(6)计算出, 具体数值见表 1.

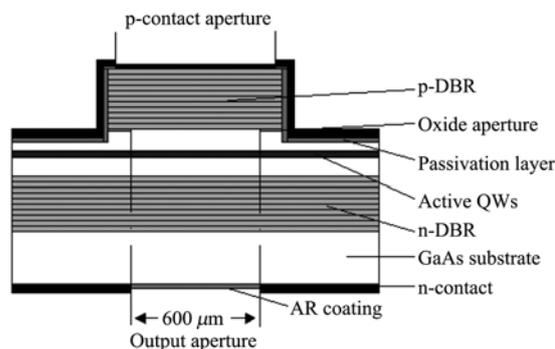


图 1 底面发射 VCSEL 器件的结构图  
Fig. 1 Schematic layer structure of bottom-emitting VCSEL

表 1 VCSEL 各区域轴向和径向的电导率,单位  $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$   
 Table 1 Homogeneous radial and longitudinal conductivity values in  $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  for each region of the VCSEL

Layer	$\sigma_r$	$\sigma_z$
p-contact	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
cap	$4.225 \times 10^4$	$4.225 \times 10^4$
p-type DBR	$5.856 \times 10^3$	$2.325 \times 10^2$
oxide	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
oxide aperture	$3.657 \times 10^3$	$3.657 \times 10^3$
p-spacer	$2.138 \times 10^3$	$1.172 \times 10^2$
active	$5.9 \times 10^2$	$1.2 \times 10^2$
n-spacer	$3.198 \times 10^3$	$2.137 \times 10^2$

$$\sigma_z = \frac{1}{\rho_z} = \frac{(J_c d_{\text{reg}})}{V} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}, \quad (5)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{\rho_r} = \frac{\left( \frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n} \right)}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)}, \quad (6)$$

其中,  $J_c$  是流过每个薄层的电流密度,  $d_{\text{reg}}$  和  $d_n$  分别表示器件中各区域的总厚度和各区域中第  $n$  层的厚度。

不同电极及不同氧化孔径时有源区中电流密度的分布计算使用有限元的方法. 计算结果如图 2 所示, 图 2(a) 为 p 面电极直径为  $650 \mu\text{m}$  时不同氧化孔直径下有源区的电流密度分布, 图 2(b) 为氧化孔直径为  $600 \mu\text{m}$  时不同 p 面电极直径下有源区的电流密度分布. 可以看出, 氧化孔直径的大小决定有源区的直径, 有源区中的电流密度分布受 p 面电极直径和氧化孔直径的影响. 当 p 面电极直径大于氧化孔直径时, 电流密度分布主要由氧化孔直径决定. 由于  $\text{Al}_x\text{O}_y$  氧化物对电流的限制作用, 氧化孔径边缘的电流密度远高于有源区中心区域, 这种电流聚集效应会使激光束的远场光斑中出现很强的边模, 增大远场的发散角. 同时, 随着氧化孔直径的减小, 有源区中心区域的电流密度略有增加, 如图 2(a) 所示. 当 p 电极直径小于氧化孔直径时, 电流密度分布由氧化孔直径和 p 面电极直径共同决定, 氧化孔直径对电流分布的影响随着 p 型电极直径的减小而不断减小, 当 p 面电极直径远小于氧化孔直径时, 氧化孔径失去对电流的有效限制, 此时电流密度分布只由 p 面电极直径决定, 如图 2(b) 所示. 根据图 2 的模拟结果, 为了获得高功率高光束质量的 VCSEL 器件, 选择氧化孔径为  $600 \mu\text{m}$ , 同时选择 p 面电极直径为  $580 \mu\text{m}$ , 这样可以在对电流进行有效限制的同时实现有源区中电流密度的均匀分布, 从而抑制远场光斑中边模的产生.

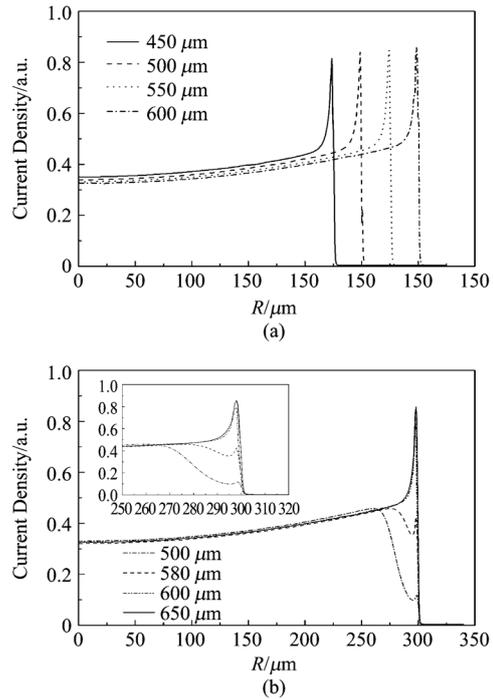


图 2 不同 p 面电极直径和不同氧化孔直径下底面发射 VCSEL 的电流密度分布图. (a) p 面电极直径为  $650 \mu\text{m}$ , 氧化孔直径分别为  $450 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$ ,  $550 \mu\text{m}$ ,  $600 \mu\text{m}$  (b) 氧化孔直径为  $600 \mu\text{m}$ , p 面电极直径分别为  $650 \mu\text{m}$ ,  $600 \mu\text{m}$ ,  $580 \mu\text{m}$ ,  $550 \mu\text{m}$

Fig. 2 Current density profiles for bottom-emitting with varying p-contact diameters and oxide aperture diameters. (a)  $650 \mu\text{m}$  p-contact diameter with varying oxide aperture diameters of  $450$ ,  $500$ ,  $550$  and  $600 \mu\text{m}$  (b)  $600 \mu\text{m}$  oxide aperture diameter with varying p-contact aperture diameters of  $650$ ,  $600$ ,  $580$  and  $550 \mu\text{m}$

## 2 器件制作及实验结果分析

在光刻胶的保护下, 用湿法腐蚀方法制作圆形台面. 腐蚀后暴露出的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层在  $420^\circ\text{C}$  石英炉内被由氮气携带的水蒸气氧化成  $\text{Al}_x\text{O}_y$  绝缘层, 通过精确控制氧化时间形成直径为  $600 \mu\text{m}$  的氧化孔径. 湿法氧化后, 大面积生长的二氧化硅绝缘层防止电流从台面侧向注入导致器件短路. 用套刻工艺将台面上相应电极区的二氧化硅腐蚀掉, 形成直径分别为  $650 \mu\text{m}$  和  $580 \mu\text{m}$  的圆形电极窗口. 大面积溅射 Ti-Pt-Au 作为 p 型电极. 为了减少衬底损耗, 将 n 面 GaAs 衬底减薄至  $170 \mu\text{m}$  左右, 采用双面对准工艺形成  $600 \mu\text{m}$  的出光窗口, 蒸镀  $\text{HfO}_2$  增透膜, 以提高输出窗口的透射率. n 面的欧姆接触通过在衬底上蒸镀 AuGeNi/Au 形成. 制作完成后, 将解理后的单管管芯用钢焊料烧焊在铜热沉上进行测试.

图 3 是实验测得的电极直径分别为  $650 \mu\text{m}$  和

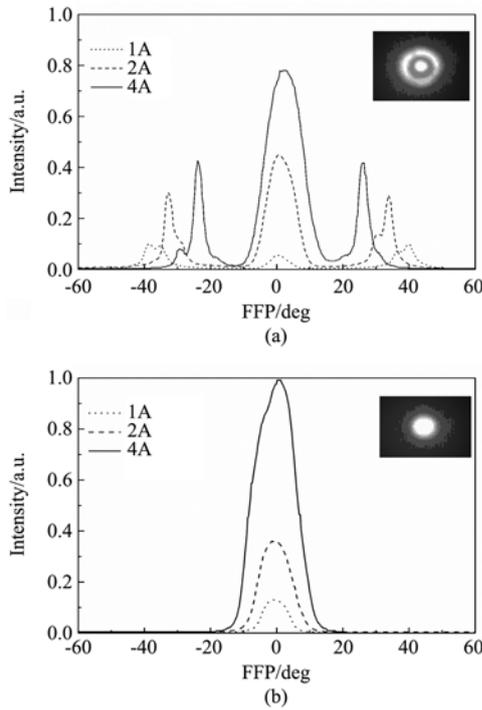


图3 在 1, 2, 4 A 电流驱动下, p 面电极直径分别为 (a) 650 μm 和 (b) 580 μm 器件的远场光斑图. 插图均为 4A 下的近场光斑.

Fig. 3 Comparison of measured far-field patterns at different injection currents ( $I=1, 2, 4\text{ A}$ ) between devices with (a) 650 μm and (b) 580 μm p-contact diameters. Inset: Near-field pattern at  $I=4\text{ A}$ .

580μm 两种器件的远场图以及 CCD 抓拍的 4A 工作电流下的光斑图片. 如图 3(a) 所示, 电极直径为 650μm 的器件, 在工作电流分别为 1A、2A、4A 时, 器件的远场图形中都出现了很强的边模, 远场的发散角 (FWHM) 约为 30°, 这是由于氧化孔径的边缘较高的电流密度使高阶横模获得激励, 这种远场能量分布非常不利于光纤耦合输出. 图 3(b) 为 580μm 电极直径器件的远场图形, 远场的发散角 (FWHM) 降低到约 15°, 由于有源区中电流密度的均匀分布, 使得氧化孔径边缘的高阶横模得到有效的抑制, 此时器件以相对较低的低阶模式工作, 光场呈现出类高斯型分布, 这种具有较小发散角的圆形对称光可以使用简单的准直聚焦装置耦合进光纤, 从而获得广泛的应用.

图 4 是电极直径分别为 650μm 和 580μm 器件的功率电流曲线. 从图中可以看出, 650μm 器件的阈值电流稍低于 580μm 器件的阈值电流, 这是由于即使在小电流情况下, 650μm 器件氧化孔径的边缘仍存在很高的电流密度, 高阶模式可以在较小的电流下就获得激励. 同时, 由于高阶模式的存在使得

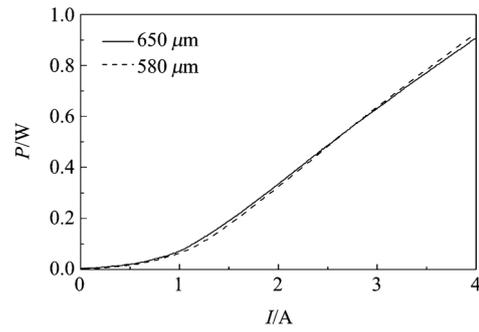


图4 650μm 与 580μm 器件输出功率的比较图  
Fig. 4 Comparison of optical output power characteristics between devices with 650μm and 580μm p-contact diameter

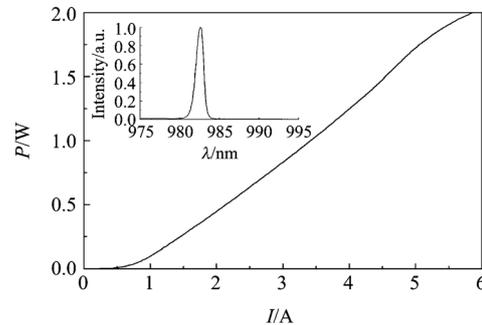


图5 器件的输出功率特性曲线. 插图为 6A 下的光谱  
Fig. 5 Optical output power characteristics of the device. Inset: measured lasing wavelength at injection current of 6A

650μm 器件在小电流区域 ( $I \leq 2.5\text{ A}$ ) 的输出功率大于 580μm 器件的输出功率. 580μm 器件的最高输出功率为 0.92W, 略高于 650μm 器件 0.91W 的最高输出功率. 这可能是由于 650μm 器件氧化孔径边缘较高的电流密度引起的电流聚集效应、散射损耗的增加, 及存在的高阶模使边缘温度增加, 不利于器件的散热等引起的.

为了对器件进行更好的散热, 将管芯和铜热沉之间加入高导热率的金属化金刚石散热片. 图 5 为使用这种方式封装后, p 面电极直径为 580μm 的器件室温下的输出功率曲线. 在 5.88A 电流下最高输出功率达到 2.01W, 阈值电流约为 1A, 斜率效率为 0.39W/A. 图 5 中的插图为 6A 下的激光光谱图, 激光波长为 982.6nm, 半高宽为 0.9nm.

### 3 结论

报道了高功率高光束质量 980nm 底面发射垂直腔面发射激光器. 通过数学模型对氧化孔直径位于有源区和 p 型 DBR 之间的大直径底面发射垂直

(下转 361 页)

- 2005, **24**(6):463—466.
- [6] WU Ke, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang. A neural network method of selective endmember for pixel unmixing [J]. *Journal of Remote Sensing* (吴柯, 张良培, 李平湘. 一种端元可变的神经网络混合像元分解方法. *遥感学报*), 2007, **11**(1):20—26.
- [7] Cheng-hai Yang, James H Everitt, Joe M Bradford. Airborne hyperspectral imagery and linear spectral unmixing for mapping variation in crop yield [J]. *Precision Agric*, 2007, **8**:279—296.
- [8] Enner Alc nara, Cl udio Barbosa, José Stech. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity distributions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**:1051—1061.
- [9] Ben Somers, Kenneth Cools, Stephanie Delalieux, et al. Nonlinear Hyperspectral mixture analysis for tree cover estimates in orchards [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**:1183—1193.
- [10] Dagrun Vikhamara, Rune Solberg. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**:309—323.
- [11] XIAO-Qing, WEN Jian-guang, LIU Qin-huo, et al. Study on spectral unmixing model and its application in extracting chlorophyll concentration of water body [J]. *Journal of Remote Sensing* (肖青, 闻建光, 柳钦火. 混合光谱分解模型提取水体叶绿素含量的研究. *遥感学报*), 2006, **10**(4):559—567.
- [12] YUE Wen-ze, WU Ci-fang. Urban Impervious surface distribution estimation by spectral mixture analysis [J]. *Journal of Remote Sensing* (岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透明水面分布估算. *遥感学报*), 2007, **11**(6):914—922.
- [13] HUI Wei-wei, YI De-ping, LIAO Cai-xia, et al. The study of decomposing mix element [J]. *Forestry Science and Technology Information* (惠巍巍, 衣德萍, 廖彩霞, 等. 混合像元分解研究综述. *林业科技情报*), 2007, **39**(1):2—3.
- [14] WEI Jian-jun, LI Xin-ping, ZHAO Dong-bo, et al. Review on un-mixing mixed-pixel of remotely sensed data [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (卫建军, 李新平, 赵东波, 等. 混合像元分离的研究进展. *水土保持研究*), 2006, **13**(5):103—105.
- [15] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fen. *Hyperspectral remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. *高光谱遥感-原理、技术与应用*. 北京: 高等教育出版社), 2006:246—289.
- [16] PAN Ming-zhong, QI Hong-xing, XIAO Gong-hai, et al. Design of compact field hyperspectral imaging spectrometer [J]. *Infrared* (潘明忠, 齐洪兴, 肖功海, 等. 便携式地面成像光谱辐射计的设计. *红外*), 2010, **31**(1):1—7.

(上接 332 页)

腔面发射激光器有源区中的电流密度分布的进行了模拟计算,由计算结果可知有源区中的电流密度由氧化孔直径和 p 面电极直径共同决定.当 p 面电极直径大于氧化孔直径时,电流密度分布主要由氧化孔直径决定;当 p 电极直径小于氧化孔直径时,电流密度分布由氧化孔直径和 p 面电极直径共同决定,氧化孔直径对电流分布的影响随着 p 型电极直径的减小而不断减小,当 p 面电极直径远小于氧化孔直径时,氧化孔径失去对电流的有效限制,此时电流密度分布只由 p 面电极直径决定.在确定氧化孔直径后,通过优化设计 p 面电极直径,在对电流进行有效限制的同时实现有源区中电流密度的均匀分布,从而抑制远场光斑中高阶边模的产生.将 p 面电极直径由 650 $\mu\text{m}$  减小到 580 $\mu\text{m}$  后,制作的氧化孔径为 600 $\mu\text{m}$  的 VCSEL 器件的远场发散角从 30° 减小到 15°,优化后器件的阈值电流和最高输出功率都略有增加.通过改进封装方式后,器件室温连续最高输出功率为 2.01 W,激光波长为 982.6 nm.

## REFERENCES

- [1] MEDERER F, JAGER R, SCHNITZER P, et al. Multi-Gb/s graded-index POF data link with butt-coupled single-mode InGaAs VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(2):199—201.
- [2] IGA K. Vertical-Cavity Surface-emitting laser: Its Conception and Evolution [J]. *Japan. J. Appl. Phys*, 2008, **47**(1):1—10.
- [3] JAGER R, GRABHERR M, JUNG C, et al. 57% wallplug efficiency oxide-confined 850nm wavelength GaAs VCSELs [J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(4):330—331.
- [4] AMANN M C, ORTSIEFER M, SHAU R, et al. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes for Telecommunication Wavelengths [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4871**:123—129.
- [5] UEKI N, NAKAYAMA H, SAKURAI J, et al. Complete polarization control of 12  $\times$  8-bit matrix-addressed oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Japan. J. Appl. Phys*, 2001, **40**:L33—L35.
- [6] WU Jian, IORDACHE G, SUMMERS H D, et al. Optical characteristics of VCSEL pumped microchip lasers [J]. *Optics Communications*, 2001, **196**:251—256.
- [7] JIN Zhenhua, SUN Yanfang, NING Yongqiang, et al. 980nm High power bottom emitting VCSELs [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金珍花, 孙艳芳, 宁永强, 等. 980nm 大功率垂直腔底发射激光器. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):61—64.
- [8] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, et al. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6908**(08):1—14.
- [9] HARDLEY G R, LEAR K L, WARREN M E, et al. Comprehensive numerical modeling of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, **32**(4):607—616.
- [10] ANGELOS C, HINCKLEY S, MICHALZIK R, et al. Simulation of Current Spreading in Bottom-Emitting Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for High Power Operation [C], *Proceedings of SPIE*, 2004, **5277**:261—272.