

文章编号: 1000-7032(2011)01-0047-06

小发散角垂直腔面发射激光器的设计与制作

张 岩^{1,2}, 宁永强^{1*}, 秦 莉¹, 孙艳芳¹, 刘 云¹, 王立军¹

(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, 吉林 长春 130033;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对垂直腔面发射激光器单管及列阵器件较大的远场发散角, 对大直径单管器件及列阵单元器件的有源区中的电流密度分布进行了模拟计算, 分析了器件高阶横模产生的原因。分别采用优化 p 面电极直径和镀制额外金层结构来抑制单管及列阵器件远场光斑中的高阶边模, 所制作的氧化孔径为 600 μm 的单管器件的远场发散角半角宽度从 30° 降低到 15°; 氧化孔径 200 μm , 单元间距 280 μm 的 4 × 4 列阵的远场发散角从 30° 降低到 10°。

关 键 词: 激光器; 垂直腔面发射激光器; 远场发散角

中图分类号: TN248.4

PACS 42.55.Px

PACC: 4255P, 4260B

文献标识码: A

DOI 10.3788/fjxb20113201.0047

1 引 言

随着半导体激光器外延技术的发展和器件设计、制作工艺水平的提高, 现已广泛应用于光通讯、光互联、光存储、光信息处理等领域的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的性能有了很大改善^[1-5], 输出功率不断提高, 使 VCSEL 成为潜在的可以提供高功率输出的激光光源之一^[6-8]。高功率 VCSEL 与高功率边发射激光器相比有许多独特的优势: 可以很容易的制成二维面阵; 散热结构简单, 可以减小整个激光系统的体积、重量; 在实现高功率密度输出时不受光学灾变损伤的影响, 可靠性优于边发射激光器; 光束整形及光束耦合成本低, 与光纤耦合效率高; 波长稳定性好, 增加了固体或光纤材料对泵浦光的吸收效率。正因具有如此多的优势, 才使得人们不断致力于提高 VCSEL 器件的性能^[9-10]。

为了提高器件的输出功率, 一个最简单的途径是制作大直径单管器件; 但是随着器件直径的增大, 器件中高阶横模的激射增大了远场发散角,

不利于光纤耦合^[11]。另一个获得高功率的方式是制作二维列阵器件^[12], 但二维列阵器件存在两个明显缺点, 一是为了降低列阵器件的热阻, 一般需要采用较大的单元间距且采用较大直径的器件作为列阵单元; 二是列阵采用并联驱动, 每个单元的工作电流相对较低, 输出的是环形光斑而非圆形光斑, 使得由单元器件的远场分布叠加而成的列阵远场分布呈现环形光斑, 增大了列阵的远场发散角。现在工业、军事、医疗和空间通信等领域除要求激光器具有高功率输出外, 对激光器的光束质量也提出更高要求。因此, 在提高 VCSEL 输出功率的同时降低器件的远场发散角是十分必要的。

本文模拟计算了大直径单管器件及列阵单元器件有源区中的电流密度分布。计算结果显示, 由于氧化限制层对电流的限制作用, 氧化孔径周围的电流密度远大于有源区中心区域, 这种电流聚集效应使得高阶横模在较小的电流下就能获得激射, 从而在远场中产生环形光斑。为了解决这个问题, 我们在大直径单管器件中采用优化 p

收稿日期: 2010-05-31; 修订日期: 2010-07-07

基金项目: 国家自然科学基金 (60636020, 60706007, 61006054, 11074241, 0974012, 60876036, 90923037); 吉林省科技发展项目 (20080335, 20080516); 中国科学院知识创新工程领域前沿课题资助项目

作者简介: 张岩 (1982-), 男, 河北秦皇岛人, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: qhdzhangyan@126.com, Tel: (0431) 86176348

*: 通讯联系人: E-mail: ningyq@cim.p.ac.cn, Tel/Fax: (0431) 84627013

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

面电极结构、在 4×4 列阵中采用镀制额外金层的方法来降低远场发散角并取得了明显效果,单管及列阵器件的远场发散角半角宽度由 30° 分别降至 15° 和 10°。

2 器件结构及理论计算

2.1 器件结构

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 8 nm 厚的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱和 10 nm 厚的 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 材料构成的势垒,设计激光波长为 980 nm。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。在外延片的最上层生长了 100 nm 厚掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 的 GaAs 接触层以利于形成良好的欧姆接触。p 型及 n 型分布布拉格反射 (DBR) 分别由 30.5 对碳掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As} / \text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 和 22.5 对硅掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As} / \text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 构成,在 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 与 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 层之间采用了阶梯掺杂抛物线型渐变结构来减小串联电阻。厚度为 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层放置在 p 型 DBR 与有源区之间,经选择氧化后形成低折射率的高阻氧化物 Al_2O_3 , 提供对电流和光场的有效限制。

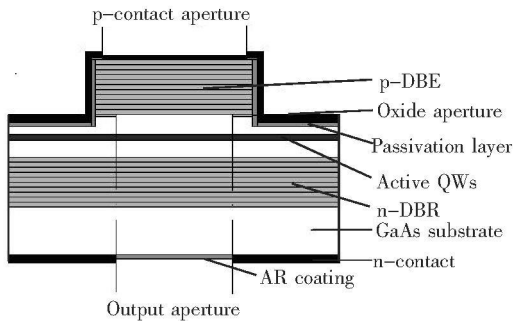


图 1 底面发射 VCSEL 器件的结构图
Fig 1 Schematic layer structure of bottom-emitting VCSEL

2.2 理论计算

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^[13]:

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

其中 σ 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_{all} 为器件的总厚度。电导率 σ 在方程中用矢量模型定义为:

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

这里 σ_r 和 σ_z 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 σ_z 和径向电导率 σ_r 。有源区中的电流密度分布使用有限元的方法计算得到。

氧化孔直径为 600 μm 的大直径单管器件在不同的 p 面电极直径下,有源区中电流密度分布的计算结果如图 2 所示。从图 2 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,由于 Al_2O_3 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。当 p 电极直径小于氧化孔直径时,氧化孔径边缘的电流聚集效应逐渐减弱直至消失。因此对于确定的氧化孔直径,可以通过调整 p 面电极直径的大小来实现有源区中电流密度的均匀分布,从而抑制高阶边模的产生。对氧化孔直径为 600 μm 的大直径单管器件,我们选择 p 面电极直径为 580 μm 来减小器件的远场发散角。所计算的 p 面电极直径为 250 μm 、氧化孔直径为 200 μm 的列阵单元有源区中的电流密度分布如图 3 所示。从图中可以看出,与大直

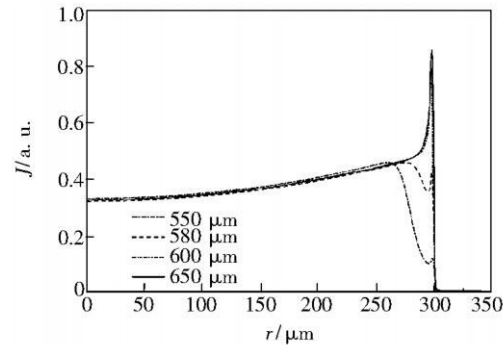


图 2 600 μm 氧化孔直径器件在电极直径分别为 650 μm 、600 μm 、580 μm 、550 μm 时,有源区中的电流密度分布图。

Fig 2 Current density profiles for devices with 600 μm oxide aperture diameter and varying p-contact diameters of 650, 600, 580, 550 μm

径器件相比,小直径器件中有源区中心部分电流密度分布更加均匀;但由于 AlO_x 氧化物对电流的限制作用,同样在氧化孔直径周围产生了电流聚集效应,较高电流密度出现在氧化孔径周围约 10 μm 范围内。虽然可以通过减小 p 面电极直径的方法可实现有源区中电流密度的均匀分布,但是对小直径器件来说,减小 p 面电极直径后会增大器件的电阻,降低器件的转换效率,使列阵器件很快发生热饱和。因此,为了抑制高阶横模、降低远场发散角,我们在器件制作中镀制了一层额外的金层,将列阵单元的出光孔径由原来的 200 μm 减小到 180 μm ,这样就可以将高阶横模滤掉^[14]。图 3 中的插图是镀制了额外金层的器件结构示意图。

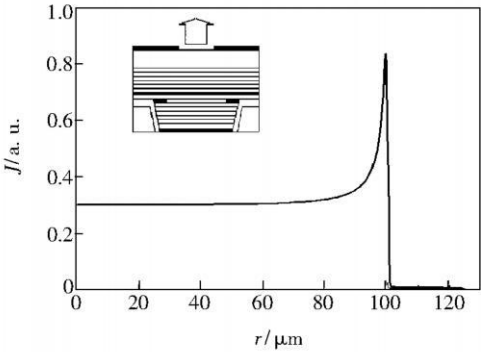


图 3 氧化孔径为 200 μm 的列阵单元的有源区中电流密度分布,插图为镀制额外金层结构示意图。

Fig 3 Current density profiles for array element with 200 μm oxide aperture diameter. Inset Schematic diagram of a VCSEL structure with an extra Au layer

3 器件制作

单管器件与列阵器件的制作基本相同。用光刻法在外延片 p 表面制作出器件图形,使用湿法腐蚀的方法制作台面,腐蚀深度刚好到达有源区即可。在 420 $^{\circ}\text{C}$ 石英炉内,由氮气携带 95% 水蒸气对 $\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 层进行选择氧化以形成氧化孔径,通过控制氧化时间可以精确地得到所需的氧化孔直径。大面积生长 SiO_2 绝缘膜可以防止焊接时器件发生短路。刻蚀掉台面上的 SiO_2 膜后制作 TiPtAu 电极。为了减少吸收损耗,将 n 型 GaAs 衬底减薄、抛光至 150 μm 左右。采用双面对准光刻工艺将出光窗口图形与 p 面的台面对齐,制作 AuGeNi/Au 形成 n 面电极,并在出光窗口上制作单层 HfO_2 增透膜。对列阵器件,在制作完增

透膜后再镀制一层金层作为滤光膜。采用倒装焊的方式,使用钎焊料将解理后的管芯压焊在无氧铜热沉上。

4 结果与讨论

4.1 单管器件

图 4 是实验测得的氧化孔直径为 600 μm 电极直径分别为 650 μm 和 580 μm 器件的远场比较图。如图 4(a) 所示,电极直径为 650 μm 的器件,在工作电流分别为 1、2、4 A 时,器件的远场图形中都出现了很强的边模,远场的发散角半角宽度达到 30 $^{\circ}$ 。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射,这种远场能量分布非常不利于光纤耦合输出。图 4(b) 为 580 μm 电极直径器件的远场图形,远场的发散角半角宽度降低到约 15 $^{\circ}$ 。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,远场类

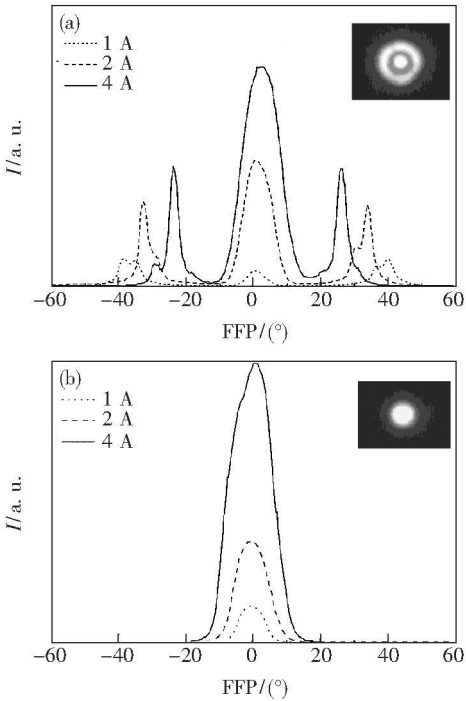


图 4 氧化孔直径为 600 μm ,不同电极直径器件的远场比较图,(a) 650 μm ,插图为 $I=4\text{ A}$ 下的近场光斑;(b) 580 μm ,插图为 $I=4\text{ A}$ 下的近场光斑。

Fig 4 Comparison of measured far-field angles between 600 μm oxide aperture diameter devices with 650 μm and 580 μm p-contact diameters (a) 650 μm , Inset Near-field pattern at $I=4\text{ A}$; (b) 580 μm , Inset Near-field pattern at $I=4\text{ A}$.

似于高斯型分布。

图 5 是电极直径分别为 650 μm 和 580 μm 器件的输出功率比较。从图中可以看出, 650 μm 器件的阈值电流稍低于 580 μm 器件的阈值电流。这可能是由于 650 μm 器件氧化孔径的边缘仍存在很高的电流密度, 导致高阶模式可以在较小的电流下就获得激励。高阶模式的存在使 650 μm 器件在小电流区域 ($I < 2.5\text{ A}$) 的输出功率大于 580 μm 器件的输出功率。580 μm 器件的最高输出功率为 0.92 W, 略高于 650 μm 器件 0.91 W 的最高输出功率。650 μm 器件在氧化孔径边缘存在较高的电流密度, 其所引起的电流聚集效应和散射损耗的增加以及存在的高阶模使边缘温度升高, 不利于器件的散热, 这可能是 650 μm 器件输出功率低于 580 μm 器件的原因。

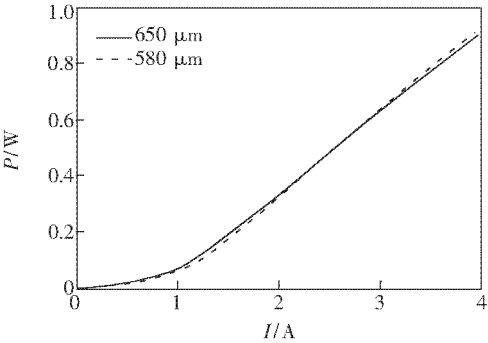


图 5 650 μm 与 580 μm 器件输出功率的比较图
Fig 5 Comparison of optical output power characteristics between devices with 650 μm and 580 μm p-contact diameter

4.2 列阵器件

图 6 是所制作的氧化孔径为 200 μm、单元间距为 280 μm 的 4×4 二维列阵的远场比较图。图中的插图为 CCD 抓拍的 $I = 6\text{ A}$ 时的远场光斑经 Matlab 处理后得到的远场三维分布。从图 6 (a) 中可以看到, 未镀制额外金层的列阵器件, 由于电流聚集效应使高阶横模获得激励, 导致由单元器件的远场叠加而成的列阵远场分布中出现环形光斑, 增大了列阵的远场发散角, 半角宽度达 30°。图 6 (b) 为镀制额外金层后列阵器件的远场图。由于金层对高阶模式的过滤作用, 使器件的远场发散角半角宽度降低到 10°左右。这种具有较小发散角的圆形对称光斑可以使用简单的准直聚焦装置耦合进光纤。

输出功率比较图。从图中可以看出, 在改善远场发散角的同时, 由于额外金层对激光的散射和吸收的影响, 列阵的最高输出功率略有下降, 在 $I = 6\text{ A}$ 时输出功率为 1.61 W。

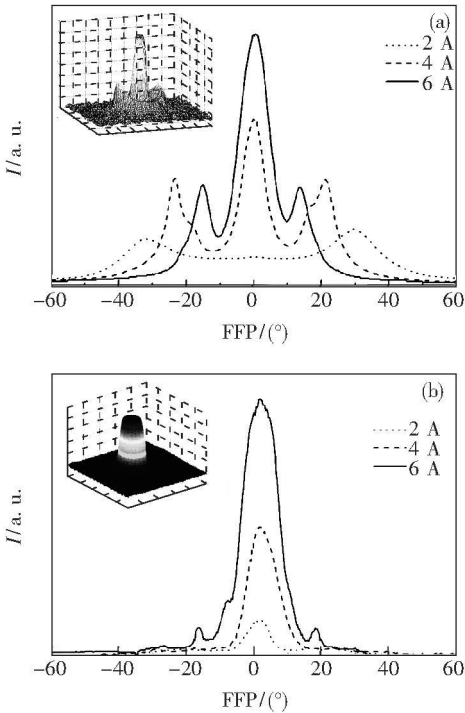


图 6 镀制额外金层前后 4×4 二维列阵器件远场比较图, (a) 未镀制额外金层的器件, 插图为 $I = 6\text{ A}$ 下的远场三维分布; (b) 镀制额外金层的器件, 插图为 $I = 6\text{ A}$ 下的远场三维分布。

Fig 6 Comparison of measured far-field angles between devices with and without an extra Au layer (a) Without an extra Au layer. Inset: three-dimensional far-field distribution at $I = 6\text{ A}$. (b) With an extra Au layer. Inset: three-dimensional far-field distribution at $I = 6\text{ A}$.

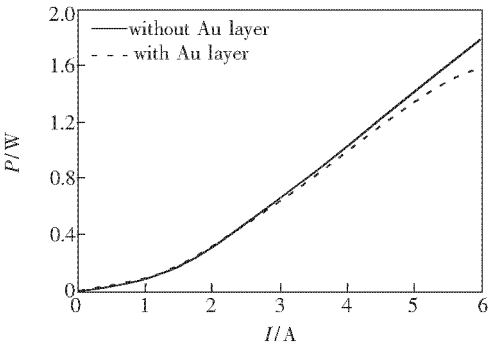


图 7 镀制额外金层前后列阵的输出功率比较
Fig 7 Comparison of output power characteristics between with and without an extra Au layer of a 4×4 arrays

5 结 论

对 VCSEL 大直径单管器件及列阵单元器件中有源区的电流密度分布进行了计算。有源区中氧化孔径周围的电流密度远高于有源区中心区域, 在氧化孔周围存在的电流聚集效应使得高阶横模获得激射, 增大了器件的远场发散角。分别采用优化 p 面电极结构和镀制额外金层结构来抑制单管及列阵器件中高阶边模的产生。将 p 面电极直径由 650 μm 优化到 580 μm 后, 所制作的氧

化孔径 600 μm 的单管器件的远场发散角半角宽度从 30 降低到 15, 优化后器件的输出功率略有提高。在氧化孔径为 200 μm 、单元间距为 280 μm 的 4 $\times$ 4 二维列阵器件中镀制一层额外的金层, 将列阵单元的出光孔径由原来的 200 μm 减小到 180 μm 可以滤掉高阶横模, 改善列阵器件的远场发散角, 半角宽度由 30 被压缩到 10 左右。由于金层对激光的散射和吸收的影响, 列阵的最高输出功率略有下降。

参 考 文 献:

- [1] Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(1): 1-10.
- [2] Weigl B, Grabherr M, Jung C, *et al*. High-performance oxide-confined GaAs VCSELs [J]. *IEEE J. Selectal Topics Quant. Electron.*, 1997, **3**(2): 409-415.
- [3] Peng Biao, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al*. Polarization characteristics of 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2008, **29**(5): 845-850 (in Chinese).
- [4] Ma Qiang, Tan Zhenhua, Wang Zhenfu, *et al*. A theoretical model of high power VCSEL based on the thermal offset-current [J]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2009, **30**(4): 463-466 (in Chinese).
- [5] Liang Xuemei, Lu Jinkai, Cheng Liwen, *et al*. Structural design of vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser with 920 nm [J]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2010, **31**(1): 79-85 (in English).
- [6] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Wang Ye, *et al*. A linear array of 980 nm VCSEL and its high temperature operation characteristics [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, **30**(11): 114008-1-4.
- [7] Seurin J F, Xu G Y, Khalfin V, *et al*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2009, **7229**: 722903-1-11.
- [8] Sun Yanfang, Jin Zhenhua, Ning Yongqiang, *et al*. Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2004, **12**(5): 449-453 (in Chinese).
- [9] Chow W W, Choquette K D, Crawford M H, *et al*. Design, fabrication and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(10): 1810-1824.
- [10] Seurin J F, Xu G Y, Wynn J D, *et al*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser pump sources [J]. *IEEE Leos Newsletter*, 2007, **21**(4): 28-32.
- [11] Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang, *et al*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting Laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2007, **34**(5): 641-645 (in Chinese).
- [12] Seurin J F, Ghosh C L, Khalfin V, *et al*. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2008, **6908**: 690808-1-14.
- [13] Angebs C, Hinkley S, Michalzik R, *et al*. Simulation of current spreading in bottom-emitting vertical cavity surface emitting lasers for high power operation [J]. *SPIE*, 2004, **5277**: 261-272.
- [14] Yan Changling, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an extra Au layer [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1599-1601.

Design and Fabrication of Vertical-cavity Surface-emitting Laser with Small Divergence

ZHANG Yan^{1,2}, NING Yong-qiang¹, QIN Li¹, SUN Yan-fang¹,
LU Yun¹, WANG Li-jun¹

(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 100039, China)

Abstract In this paper, dramatic improvements in vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) performance have been obtained due to the advanced fabrication techniques and electrical confinement, as well as the structural design and growth of Bragg mirrors. A numerical simulation of current density distribution in the active of a large aperture single device and an array element were constructed. It is found that the current density at the perimeter of the oxide aperture is higher than at the center of the active region. The high order transverse modes were excited due to the current crowding at the perimeter of the oxide aperture, which leading to large divergence angle. And it is suppressed by optimizing the p-contact diameter in a single device and suppressed by using an extra Au layer. The far-field angle of a single device with a 600 nm oxide aperture decreased from 30° to 15° when the p-contact diameter is optimized from 650 nm to 580 nm, and there is a slight increase in output power due to the optimization. By using an extra Au layer, the output aperture of a 4 × 4 two dimension array element is decreased to 180 nm, and the far-field angle of the array device is suppressed to 10°. There is a slight drop in output power due to the introduction of the extra Au layer.

Key words lasers; vertical-cavity surface-emitting laser; far-field divergence angle

CLC number TN248.4

PACS 42.55.Px

PACC 4255P, 4260B

Document code A

DOI 10.3788/fjxb20113201.0047