

# 垂直腔面发射激光器氧化孔结构对器件 激射性能的影响

梁静<sup>1,2</sup>, 贾慧民<sup>1\*</sup>, 冯海通<sup>2</sup>, 唐吉龙<sup>1</sup>, 房丹<sup>1</sup>, 苏瑞巩<sup>2</sup>, 张宝顺<sup>2</sup>, 魏志鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学理学院高功率半导体激光器国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

**摘要** 为实现 894.6 nm 低阈值、高稳定性、单模激光输出, 设计了具有不同台面刻蚀结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 器件, 研究了台面直径和氧化孔结构对器件激射性能的影响。研究表明: VCSEL 台面直径越大, 阈值电流越大; 氧化孔径越偏向圆形, 边模抑制比越高。制备了氧化孔为圆形、直径为 4.4  $\mu\text{m}$  的 VCSEL 器件, 该器件在 70~90  $^{\circ}\text{C}$  工作温度及 0.6 mA 驱动电流下实现了 894.6 nm 单模激光输出, 边模抑制比高于 35 dB。

**关键词** 激光器; 垂直腔面发射激光器; 台面结构; 氧化孔; 激射性能; 边模抑制比

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0301001

## Influence of Oxide Aperture Structure on Lasing Performance for Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Liang Jing<sup>1,2</sup>, Jia Huimin<sup>1\*</sup>, Feng Haitong<sup>2</sup>, Tang Jilong<sup>1</sup>, Fang Dan<sup>1</sup>, Su Ruigong<sup>2</sup>,  
Zhang Baoshun<sup>2</sup>, Wei Zhipeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** In order to realize 894.6 nm single mode laser output with low threshold, high stability, we design vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) devices with different mesa etching structure and study the influences of mesa diameter, oxide aperture shape and size on lasing performance. The research results show that the larger of the mesa in VCSEL device, the higher the threshold current; the more circular the oxide aperture, the higher the single mode suppression ratio. VCSEL devices with diameter of 4.4  $\mu\text{m}$  circular oxide aperture is achieved, and the device can realize 894.6 nm single mode laser output with driving current of 0.6 mA and working temperature of 70~90  $^{\circ}\text{C}$ , and the side mode suppression ratio is higher than 35 dB.

**Key words** lasers; vertical cavity surface emitting laser; mesa structure; oxide aperture; lasing performance; side-mode suppression ratio

**OCIS codes** 140.7260; 140.3570; 110.0180; 300.6550

## 1 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有体积小、光斑为圆形、响应频带宽、易于实现二维阵列集成等优越的性能,在光纤通信系统、陀螺仪、原子钟等领域

具有重要应用。现阶段,由于激光器材料质量及器件制备工艺的限制,VCSEL 器件实现低阈值电流、波长稳定输出较为困难,且 VCSEL 器件的多模现象较为严重。应用于芯片原子钟的 VCSEL 器件,需要实现高温环境下低阈值、单模激光的稳定输出。

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-11-26; 录用日期: 2018-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0402800)、国家自然科学基金(61504010,61504022)、吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(20160519007JH)、吉林省科技厅重大科技招标专项(20160203015GX)

\* E-mail: huiminjia01@163.com

减小台面可以达到降低阈值电流的目的,利用水汽氧化可以提高 VCSEL 的边模抑制比。随着水汽氧化工艺在 VCSEL 器件制备中的应用,VCSEL 的性能得到了很大改善<sup>[1-3]</sup>。

氧化限制层可以起到光电限制的作用<sup>[4]</sup>,使 VCSEL 器件实现低阈值的单模激光输出。为提高 VCSEL 的边模抑制比,研究人员研究了氧化限制层对 VCSEL 激射性能的影响;Geib 等<sup>[5]</sup>以及 Ku 等<sup>[6]</sup>对影响 VCSEL 的氧化因素进行了分析,得到了氧化深度与时间、温度之间的关系;2002 年, Hawkins 等<sup>[7]</sup>分析了 VCSEL 氧化孔的大小对器件可靠性的影响,得出了具有较大氧化孔的器件具有较高可靠性的结论;2006 年, Chang 等<sup>[8]</sup>利用多个氧化层来减小 VCSEL 寄生效应的方法,通过将多个氧化层融合到器件中,实现了效率和调制速率高的 VCSEL 器件;2008 年, Almuneau 等<sup>[9]</sup>对 VCSEL 的氧化深度进行研究,实现了对氧化深度的实时观测;2012 年,刘迪等<sup>[10]</sup>对不同氧化孔直径的单管器件的热特性进行研究后发现,氧化孔直径越小,器件的热阻越大,可通过加大氧化孔直径来降低热阻;2017 年,冯源等<sup>[11]</sup>采用 CROSSLIGHT 软件对 VCSEL 的反射谱和增益谱进行模拟,并对器件结构进行优化,得到了室温下光谱中心波长在 850 nm 左右的 VCSEL 器件;2017 年, Marigo-Lombart 等<sup>[12]</sup>对制备低阈值、高边模抑制比 VCSEL 器件的方法进行研究,找到了工艺步骤简单、器件工作效率较高的制备方法。

为实现高边模抑制比、低阈值的 VCSEL 器件,本文设计了补偿型和圆形台面刻蚀结构的 VCSEL 器件,利用水汽氧化工艺制备出氧化孔形状及大小不同的一系列 VCSEL 器件;然后对器件的阈值电流、温漂、边模抑制比等进行测试分析;此外,研究了 VCSEL 氧化孔形状及大小对器件边模抑制比、阈值电流的影响,根据研究结果制备出具有补偿型台面结构的 VCSEL 器件,该器件在 0.6 mA 驱动电流及 70~90 °C 工作温度下,实现了边模抑制比高于 35 dB 的 894.6 nm 激光输出。

## 2 实验及理论分析

### 2.1 VCSEL 器件的理论分析及结构设计

面发射激光器的阈值电流  $I_{th}$  的表达式为

$$I_{th} \approx \frac{eB_{eff}V_a}{\eta_i\eta_{spon}}N_{th}^2, \quad (1)$$

式中: $e$  为电子电荷; $B_{eff}$  为等价复合系数; $V_a$  为有

源区的体积; $N_{th}$  为满足振荡条件时产生光增益所必须的有源区的电子密度; $\eta_i$  为注入效率; $\eta_{spon}$  为自发辐射效率。

圆形台面结构通过水汽氧化工艺可以得到椭圆形的氧化孔形状,这是由于 $[0\bar{1}1]$ 晶向的键能较高,具有较低的表面反应速率,使得 $[0\bar{1}1]$ 晶向的氧化速率小于 $[011]$ 晶向的氧化速率。椭圆形氧化孔在长和宽方向上的折射率可分别表示为

$$n(x,y) = n_0 \left( 1 + \frac{1}{2}g^2 \right) - \frac{1}{2}g^2 n_0 \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right), \quad \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) \leq 1, \quad (2)$$

$$n(x,y) = n_0 - \delta n, \quad \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) > 1, \quad (3)$$

式中: $a$  为椭圆的长轴; $b$  为短轴; $n_0$  为氧化层的折射率; $g$  为与温度相关的拟合参数; $\delta n$  为折射率梯度; $x$  和  $y$  分别为氧化层中折射率为  $n$  时测试点的横纵坐标。椭圆形氧化孔引起了不均匀的折射率分布,故波长差  $\Delta\lambda$  与不同方向上折射率差  $\Delta n$  之间的关系可以表示为

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_0$  为中心波长。从(4)式中可以看出,当两个方向的折射率差  $\Delta n$  不为 0 时,必然会产生一个相应的波长差。可见,波长差  $\Delta\lambda$  的大小受氧化孔形状的影响。

根据 VCSEL 理论进行器件的结构设计,采用金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)技术制备 VCSEL 外延片,然后基于外延片制备 VCSEL 器件,并对 VCSEL 器件的激射特性进行测试分析。所设计的 VCSEL 器件结构如图 1 所示,其中:N 型布拉格反射镜(DBR)由  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As$  缓变膜层组成;有源区由光学厚度为  $\lambda_0/2$  的两对  $In_yGa_{(1-y)}As/Al_xGa_{(1-x)}As$  量子阱以及缓变组分的  $Al_xGa_{(1-x)}As$  间隔层组成;氧化层  $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$  的厚度为 30 nm,利用侧向氧化产生  $Al_2O_3$  层,形成绝缘性良好的氧化限制层;氧化层上方是由

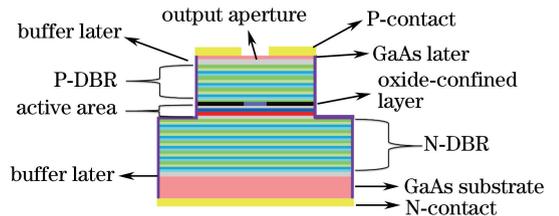


图 1 VCSEL 示意图

Fig. 1 Schematic of VCSEL

$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  缓变膜层构成的 P 型 DBR, 每对 DBR 的光学厚度均为  $\lambda_0/2$ ; N 与 P 分别表示此器件结构的背面与正面。

### 2.2 实 验

氧化限制型 VCSEL 器件的制备过程如下: 采用电感耦合等离子刻蚀设备 (ICP 180) 对外延生长制备得到的 VCSEL 外延片进行台面刻蚀, 刻蚀深度为  $4.4\ \mu\text{m}$  (设计了补偿型台面刻蚀结构和圆形台面刻蚀结构两种器件); 刻蚀完成后对其进行水汽氧化, 首先打开  $\text{N}_2$  管道和水浴蒸汽管道, 将管式氧化炉升温至  $400\ ^\circ\text{C}$ ,  $\text{N}_2$  流量为  $7\ \text{L}/\text{min}$ , 水浴蒸汽管道中的  $\text{N}_2$  流量为  $0.3\ \text{L}/\text{min}$ , 水浴温度为  $75\ ^\circ\text{C}$ , 温度稳定后, 保持  $40\ \text{min}$ , 随后将 Wafer 放入氧化炉中进行水汽氧化 (水汽氧化完成后将样品取出冷却至室温, 用光学显微镜对氧化孔的形状及大小进行观察); 然后采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术对氧化后的 Wafer 进行钝化, 并用聚酰亚胺 (PI) 胶填充间隔槽, 获得平坦的台面结构; 接着采用磁控溅射工艺制备器件的 P 面电极, 将 N 面减薄抛光至芯片厚度为  $150\ \mu\text{m}$ , 并制备 N 面金属电极; 最后进行退火处理, 使 N 面电极和 P 面电极形成良好的欧姆接触, 获得 VCSEL 芯片, 将 VCSEL 芯片进行封装即可获得 VCSEL 器件。

利用 Avaspec ULS2048L-2-USB2 光谱仪 (步长为  $0.25\ \text{nm}$ ) 及测试软件 AvaSoft8 进行光谱测试, 测试过程中采用相干布居囚禁 (CPT) 物理测试系统 (温度精确度为  $0.01\ ^\circ\text{C}$ , 电流精确度为  $0.001\ \text{mA}$ ) 控制温度和电流, 得到稳定温度下 VCSEL 器件的阈值电流及激射谱。

### 3 结果与讨论

采用水汽氧化工艺制备得到的两种 VCSEL 台面结构如图 2 所示, 由图 2 (f) 可知, 两种台面分别为圆形和补偿型刻蚀结构。图 2(a)~(c) 所示器件 A、B、C 的台面直径分别为  $27, 23, 21\ \mu\text{m}$ , 台面刻蚀结构为补偿型, 氧化孔为偏圆形, 氧化孔的长短轴值较为接近 (可近似看作是圆形); 器件 A、B 的氧化孔直径分别为  $4.8\ \mu\text{m}, 4.4\ \mu\text{m}$ , 器件 C 的氧化孔为偏圆形, 长轴约为  $3.8\ \mu\text{m}$ , 短轴约为  $3.5\ \mu\text{m}$ , 椭率较小 (可近似看作是圆形)。图 2(d) 所示器件 D 的台面直径为  $27\ \mu\text{m}$ , 台面刻蚀结构为圆形, 氧化孔为椭圆形, 长轴约为  $6.1\ \mu\text{m}$ , 短轴约为  $5.5\ \mu\text{m}$ 。图 2(e) 所示器件 E 的台面直径为  $23\ \mu\text{m}$ , 台面刻蚀结构为圆形, 氧化孔为椭圆形, 长轴约为  $5.7\ \mu\text{m}$ , 短轴约为  $4.1\ \mu\text{m}$ 。

通过对比分析测试结果可知, 在相同的氧化条件下, 台面刻蚀结构不同时, 氧化孔形状会有所差

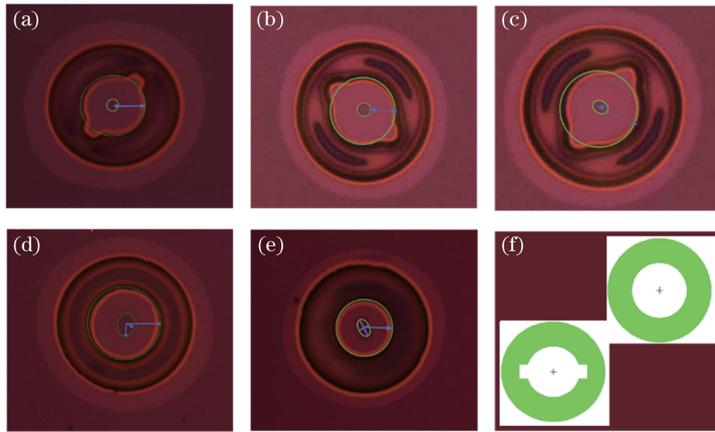


图 2 器件台面结构氧化后的俯视显微图与台面结构类型示意图。(a) 直径为  $27\ \mu\text{m}$  的补偿型台面结构, 氧化孔为圆形; (b) 直径为  $23\ \mu\text{m}$  的补偿型台面结构, 氧化孔为圆形; (c) 直径为  $21\ \mu\text{m}$  的补偿型台面结构, 氧化孔为圆形; (d) 直径为  $27\ \mu\text{m}$  的圆形台面结构, 氧化孔为椭圆形; (e) 直径为  $23\ \mu\text{m}$  的圆形台面结构, 氧化孔为椭圆形; (f) 补偿型与圆形台面结构示意图

Fig. 2 Top view of device structure after oxidation obtained with optical microscope and schematic of mesa structure. (a) Compensating mesa structure with mesa diameter of  $27\ \mu\text{m}$  and circular oxide aperture; (b) compensating mesa structure with mesa diameter of  $23\ \mu\text{m}$  and circular oxide aperture; (c) compensating mesa structure with mesa diameter of  $21\ \mu\text{m}$  and circular oxide aperture; (d) circular mesa structure with mesa diameter of  $27\ \mu\text{m}$  and circular oval aperture; (e) circular mesa structure with mesa diameter of  $23\ \mu\text{m}$  and circular oval aperture; (f) schematic of compensatory and circular mesa structures

异。如图 2(d)、(e)所示,圆形氧化台面经水汽氧化后,氧化孔为非圆形,这表明氧化反应不是完全各向同性的,即反应速率沿特定的晶向是不同的<sup>[13-14]</sup>。如图 2(a)~(c)所示,将圆形与矩形相结合形成的补偿型台面结构可以对具有较快反应速率的 $[011]$ 晶向进行补偿,调控水汽氧化过程中 $[011]$ 晶向与 $[0\bar{1}1]$ 晶向的氧化深度差值,弥补氧化过程中因不同晶向的反应速率不同而引起的氧化孔形状不规则的问题,并最终得到圆形氧化孔。如图 2 所示,补偿型刻蚀台面的氧化效果较好,氧化孔形状接近圆形。对不同直径台面的氧化效果进行对比可知,台面直径越大,氧化孔越趋于圆形,这是因为随着氧化孔径增大,氧化孔氧化速率的各向异性程度减弱,故而趋于圆形。因此,可通过采用补偿型台面刻蚀结构或增大台面直径的方式来获得圆形氧化孔。

### 3.1 VCSEL 台面直径和氧化孔结构对器件阈值电流及温漂的影响

对器件进行变温阈值电流测试,研究 VCSEL

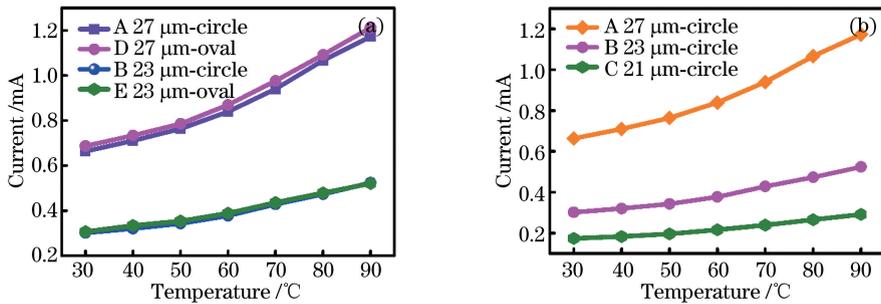


图 3 不同 VCSEL 器件的变温阈值电流曲线。(a)不同氧化孔形状;(b)不同台面直径

Fig. 3 Variable temperature threshold current curves for different VCSEL devices. (a) Device with different oxide aperture shapes; (b) device with different mesa diameters

图 4 所示为器件 B 在不同温度下的激光光谱测试结果,25 °C 时器件的激光峰位为 891.5 nm,30 °C 时激光峰位为 891.8 nm,70 °C 时激光峰位为

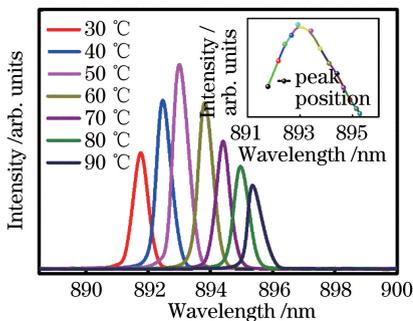


图 4 器件 B 的峰值波长随温度的变化  
Fig. 4 Temperature dependence of peak wavelength for device B

氧化孔形状及大小对器件阈值电流温漂的影响,具有不同氧化孔形状和不同台面结构的 VCSEL 器件的阈值电流随温度变化的测试结果如图 3 所示。可见,器件的阈值电流均随着温度的升高而增加。在图 3(a)中可进一步观察到:当台面直径相同时,圆形和椭圆形氧化孔器件在相同温度下的阈值电流相差较小,表明氧化孔形状不是影响器件阈值电流的最主要因素;台面直径大的器件,相应的阈值电流较大。图 3(b)为台面直径不同但氧化孔均为圆形的 VCSEL 器件的阈值电流对比结果,从对比结果可知,相同温度下,台面直径越大,器件的阈值电流越大,80 °C 时器件 A、B、C 的阈值电流分别为 1.1,0.48,0.28 mA,这表明台面直径是影响 VCSEL 器件阈值电流的主要因素。由(1)式可知,通过减小半导体激光器有源区的体积可以降低器件的阈值电流,因此,减小 VCSEL 器件的台面直径是获得低阈值电流器件的有效途径。

894.2 nm,75 °C 时激光峰位为 894.6 nm,器件的激光峰位随温度升高呈线性关系,波长的温度漂移系数为 0.062 nm/°C。VCSEL 器件的高温工作性能是由增益-腔模特性决定的,光谱发生红移的根本原因是其温度升高导致了增益的变化,腔模增益谱、量子阱增益光谱均发生了红移。量子阱的增益峰并不能决定 VCSEL 器件的激光波长,VCSEL 的激光波长是由腔模决定的,随着温度升高,器件有源区及 DBR 光学厚度均会增加,因而其对应的光学波长会增大<sup>[15-17]</sup>。

### 3.2 VCSEL 台面直径和氧化孔结构对器件边模抑制比的影响

VCSEL 的谐振腔非常短,其纵模间距非常大,所以多模输出主要是多横模激光引起的,氧化孔的形状及大小对 VCSEL 的近场模式特性有很大影

响,会使高阶横模近场模式分布不同,从而改变激光器的激光特性,这一现象可以在激光器的近场图像上观测到<sup>[18]</sup>。由于氧化限制层的折射率比该 VCSEL 器件结构中量子阱材料的折射率低,光可在氧化限制层与量子阱层之间形成全反射,起到横向折射率波导的作用。为分析氧化孔形状及大小对器件边模抑制比的影响,对氧化孔形状不同的两组器件进行对比分析,结果如图 5 所示。

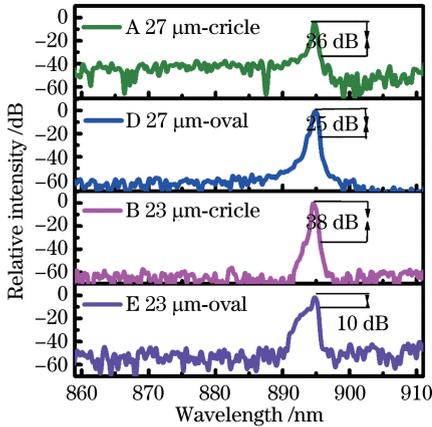


图 5 氧化孔形状不同而台面直径相同的 VCSEL 的边模抑制比

Fig. 5 Side mode suppression ratio of VCSELs devices with different oxide aperture shapes but same mesa diameter

在图 5 中,器件 B、E 的台面直径为 23  $\mu\text{m}$ ,边模抑制比分别为 38 dB 和 10 dB,器件 A、D 的台面直径为 27  $\mu\text{m}$ ,边模抑制比分别为 36 dB 和 25 dB。从测试结果可知,器件氧化孔形状接近圆形时,边模抑制比较高。器件 A、B 的氧化孔为椭圆形,椭圆形氧化孔在长轴和短轴方向上的折射率不均匀,会造成多个模式的输出,边模抑制比降低。

图 6 所示为氧化孔均为圆形,台面结构直径分别为 27,23,21  $\mu\text{m}$  的 3 个 VCSEL 器件边模抑制比的测试结果,器件激光波长为 894.6 nm。器件 A、B、C 的边模抑制比分别为 37 dB、38 dB、30 dB,器件 A、B 的氧化孔为圆形,且边模抑制比相差较小。器件 C 虽为补偿型刻蚀结构,但由于氧化时间稍长,导致氧化孔尺寸过小,氧化的各项异性较为明显,因此边模抑制比稍低。随着氧化孔直径增大,器件激光模式分布的各向异性变小,各个模式波长更接近中心波长,相邻模式之间的距离随之变小,激光模式表现为单模激射。从测试结果分析可知,VCSEL 器件台面直径对器件边模抑制比的影响较小,而氧化孔的形状及大小对 VCSEL 器件边模抑制比的影响较大。当氧化孔接近圆形时,边模抑制比较高,这说

明氧化孔的不规则化会引起激射波长模式的选择相似度降低,使多个模式同时激射,导致边模抑制比降低,这为制备高边模抑制比 VCSEL 器件提供了实验基础。

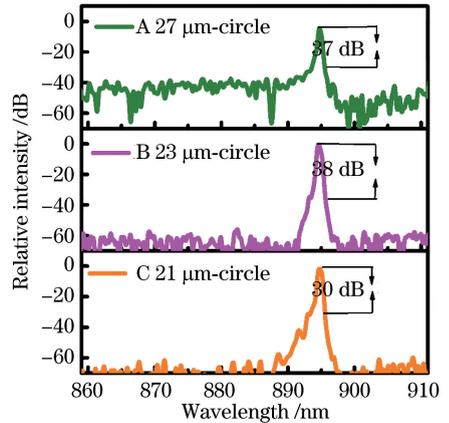


图 6 氧化孔均为圆形但台面直径不同的 VCSEL 的边模抑制比

Fig. 6 Side mode suppression ratio of VCSELs with circle oxide aperture but different mesa diameters

## 4 结 论

通过理论及实验研究了台面直径及氧化结构对 VCSEL 器件激射性能的影响,研究表明:台面直径对器件的阈值电流有较大影响,氧化孔的形状对 VCSEL 边模抑制比的影响较大,圆形氧化孔器件的边模抑制比较高。根据研究结果,利用台面氧化补偿方法制备出了具有补偿型台面结构且圆形氧化孔直径为 4.4  $\mu\text{m}$  的 VCSEL 器件,该器件在 0.6 mA 驱动电流及 70~90  $^{\circ}\text{C}$  温度下,实现了边模抑制比高于 35 dB 的 894.6 nm 激光输出。

## 参 考 文 献

- [1] Komar P, Śpiewak P, Gębski M, *et al.* The influence of the VCSEL design on its electrical modulation properties [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10552: 105520M.
- [2] Lu I C, Wei C C, Chen H Y, *et al.* Very high bit-rate distance product using high-power single-mode 850-nm VCSEL with discrete multitone modulation formats through OM4 multimode fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 444-452.
- [3] Yazdanypoor M, Emami F. High power single mode multi-oxide layer VCSEL with optimized thicknesses and aperture sizes of oxide layers [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(2): 167-173.

- [4] Shi G Z, Guan B L, Li S, *et al.* Power dissipation in oxide-confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(1): 014206.
- [5] Geib K M, Choquette K D, Hou H Q, *et al.* Fabrication issues of oxide-confined VCSELs [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3003: 69-75.
- [6] Ku P C, Chang-Hasnain C J. Thermal oxidation of AlGaAs: modeling and process control [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(4): 577-585.
- [7] Hawkins B M, Hawthorne R A, Guenter J K, *et al.* Reliability of various size oxide aperture VCSELs [C]. Electronic Components and Technology Conference, 2002: 540-550.
- [8] Chang Y C, Wang C S, Johansson L A, *et al.* High-efficiency, high-speed VCSELs with deep oxidation layers[J]. Electronics Letters, 2006, 42(22): 1281-1282.
- [9] Almuneau G, Bossuyt R, Collière P, *et al.* Real-time *in situ* monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs [J]. Semiconductor Science and Technology, 2008, 23(10): 105021.
- [10] Liu D, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Effect of oxide aperture on temperature rise in high power vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502005.  
刘迪, 宁永强, 秦莉, 等. 氧化孔径对高功率垂直腔面发射激光器温升的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502005.
- [11] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, *et al.* Structural optimization and fabrication of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301005.  
冯源, 郝永芹, 王宪涛, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器结构优化与制备[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301005.
- [12] Marigo-Lombart L, Calvez S, Arnoult A, *et al.* Oxide-confined VCSELs fabricated with a simple self-aligned process flow [J]. Semiconductor Science and Technology, 2017, 32(12): 125004.
- [13] Guan B L, Liu X, Jiang X W, *et al.* Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 164203.  
关宝璐, 刘欣, 江孝伟, 等. 多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 164203.
- [14] Mokhtari M, Pagnod-Rossiaux P, Laruelle F, *et al.* Optical characterizations of VCSEL for emission at 850 nm with Al oxide confinement layers[J]. Journal of Electronic Materials, 2018, 47(9): 4987-4992.
- [15] Zhang J W, Zhang X, Zhu H B, *et al.* High-temperature operating 894.6 nm-VCSELs with extremely low threshold for Cs-based chip scale atomic clocks [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14763-14773.
- [16] Chang Y A, Chen J R, Kuo H C, *et al.* Theoretical and experimental analysis on InAlGaAs/AlGaAs active region of 850-nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 536-543.
- [17] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, *et al.* Gain-cavity mode detuning vertical cavity surface emitting laser operating at the high temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0502001.  
张建伟, 宁永强, 张星, 等. 增益-腔模失配型高温工作垂直腔面发射半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502001.
- [18] Li M S, Zhang B T, Chen K P, *et al.* Noncircular refractive index profile and breakdown of mode degeneracy of vertical cavity surface emitting lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 1065-1068.