

# 浅面浮雕矩形台面垂直腔面发射半导体激光器

李秀山<sup>1,2</sup> 宁永强<sup>1</sup> 贾鹏<sup>1,2</sup> 陈泳屹<sup>1</sup> 张星<sup>1</sup> 张建伟<sup>1</sup> 张建<sup>1</sup>  
刘云<sup>1</sup> 秦莉<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100039

**摘要** 为实现垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)大功率窄线宽输出,设计了浅面浮雕矩形台面结构的垂直腔面发射激光器(SR VCSEL)。电流密度分布会影响模式分布,模拟结果表明,矩形台面 VCSEL 相比于圆形台面 VCSEL,在有源区面积增大的情况下,电流密度分布不变。在矩形台面 VCSEL 出光孔表面刻蚀浅面浮雕后,高阶模式比基模的阈值增益的变化大,基模对高阶模式的抑制增强。理论结果表明,矩形浅面浮雕结构的 VCSEL 能够实现对高阶模式的抑制,测试结果得到连续输出为 5.87 mW,光谱宽度为 0.1 nm,功率偏振度为 10,横向模式抑制比超过 30 dB 的窄线宽输出。

**关键词** 激光器;半导体激光器;矩形台面;浅面浮雕

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1202005

## Rectangular Mesa Shaped Vertical Cavity Surface Emitting Laser with Shallow Surface Relief

Li Xiushan<sup>1,2</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Jia Peng<sup>1</sup> Chen Yongyi<sup>1</sup> Zhang Xing<sup>1</sup>  
Zhang Jianwei<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Qin Li<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to realize the high-power narrow linewidth of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), the shallow surface relief rectangular structure (SR VCSEL) is designed. The difference of the current density distribution leads to the mode distribution different. Calculation results show that, compared with circular mesa VCSEL, the uniformity of the current density distribution of rectangular mesa VCSEL is not changed when the active area is increased. And theoretical results indicate that the threshold gain of high-order mode increases greater than that of the fundamental mode when etching shallow relief of surface. In the experiment, the power of 5.87 mW when current is continuous, spectral width of 0.1 nm, power polarization degree of 10, and transverse mode suppression ratio more than 30 dB are obtained.

**Key words** lasers; semiconductor laser; rectangular table; surface relief

**OCIS codes**

## 1 引 言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)相比于

边发射激光器,具有发散角低、阈值电流低、光斑对称、工艺简单、测试方便、列阵集成高、制造成本低等

**收稿日期**: 2014-06-03; **收到修改稿日期**: 2014-07-15

**基金项目**: 国家自然科学基金青年基金(61106068)、国家自然科学基金(61204056)和国家自然科学基金重点项目(61234004)

**作者简介**: 李秀山(1986—),男,博士,主要从事半导体激光器结构设计及高光束质量方面的研究。

E-mail: jinglexiushan@163.com

**导师简介**: 宁永强(1964—),男,博士,研究员,主要从事垂直腔面发射半导体激光器方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

优点,广泛应用于短距离光传输、光储存、激光打印、光谱分析等方面<sup>[1-4]</sup>。VCSEL的谐振腔很短,大约为 $1\ \mu\text{m}$ ,很容易实现单纵模激光<sup>[5]</sup>。然而,相比于短的腔长,VCSEL的横向尺寸很大,通常是多横模激光<sup>[6]</sup>,导致光谱线宽和远场发散角增大,此外在通讯方面,多横模还增大了噪声,减小了光的相干特性,这些缺点阻碍了VCSEL应用领域的拓展。

氧化孔直径小于 $4\ \mu\text{m}$ 的VCSEL容易实现单模,但是大的微分电阻和高电流密度降低了转换效率,减小了使用寿命,并且小的有源区面积限制着光功率的提高,限制了VCSEL在远距离通讯、红外探测等高功率方面的应用<sup>[5]</sup>。

为了解决以上问题,实现高功率、窄化VCSEL的模式是关键,当前采用的方式有光子晶体结构<sup>[7]</sup>,外腔结构<sup>[8]</sup>,多氧化层散射结构<sup>[9]</sup>,延长谐振腔结构<sup>[10]</sup>,反相光波导结构<sup>[11]</sup>,Zn无序诱导掺杂结构<sup>[12]</sup>等,但是这些方法工艺复杂,成品率低,输出功率低,不易实现工业方面的生产应用。根据报道,Haglund等<sup>[6]</sup>采用刻蚀浅面浮雕于圆形台面表面的工艺,实现单管单模最高输出功率 $6.5\ \text{mW}$ <sup>[6]</sup>,160个单管VCSEL中有157个输出单模抑制比大于30 dB、功率超过 $2.9\ \text{mW}$ <sup>[13]</sup>的成品率。Wei等<sup>[14]</sup>采用浮雕结构实现 $5\ \text{mW}$ 的单模输出。可见,浅面浮雕刻蚀技术可提高VCSEL的光谱质量,实现单模输出,窄化光谱线宽。

氧化孔直径在 $20\ \mu\text{m}$ 以下时,在电流注入和模式反射率的作用下,高阶模式的阈值电流大于基模,如果在出光孔表面刻蚀浅面浮雕,可以进一步增强对高阶模式的抑制<sup>[5]</sup>。但是,氧化孔直径小于 $20\ \mu\text{m}$ 时,VCSEL有源区面积小于 $300\ \mu\text{m}^2$ ,限制着输出功率。增大VCSEL的氧化孔直径,可增大有源区面积,提高输出功率,当圆形氧化孔直径增大后,由于电流注入的不均匀性,高阶模式的增益相对于基模更有竞争力<sup>[15]</sup>,在氧化孔表面刻蚀浅面浮雕不能够很好地抑制高阶模式。

为了实现高功率高成品率单模VCSEL,提出一种浅面浮雕矩形台结构的VCSEL(SR VCSEL)。相比于圆形台面VCSEL,矩形台面VCSEL的有源区面积增大时,电流密度分布不发生变化,增大了有源区的面积,矩形台面上的浅面浮雕起着抑制高阶模的作用。

应用COMSOL有限元分析软件分别模拟矩形台面和圆形台面的电流密度分布,通过对氧化孔的面积为 $1000\ \mu\text{m}^2$ ( $100\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ )的矩形台面、氧

化孔面积为 $1000\ \mu\text{m}^2$ 圆形台面以及和氧化孔面积为 $78\ \mu\text{m}^2$ (直径 $10\ \mu\text{m}$ )圆形台面的电流密度分布比较,得出矩形台面结构在增大有源区面积情形下不影响电流密度分布。理论计算了浅面刻蚀浮雕的面积大小及刻蚀深度对模式的限制因子影响,以及对增益阈值的影响,得到最佳的浅面浮雕刻蚀面积和深度。对矩形氧化孔边长为 $10\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 的普通结构VCSEL和表面有浅面浮雕结构的VCSEL的光场能量进行仿真,表明矩形浅面浮雕结构的VCSEL在增大有源区面积的情况下,减小了对模式的影响,并且得到实验验证。

## 2 器件结构

VCSEL的结构如图1所示,p型分布布拉格反射镜(DBR)由23对C掺杂的 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 交替组成。中间有源区由3个周期性增益的GaAs量子阱组成三明治结构,量子阱每层厚度为 $6\ \text{nm}$ ,量子阱间被厚度为 $8\ \text{nm}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 分隔开。N型DBR由34.5对Si掺杂的 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 交替组成。 $30\ \text{nm}$ 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 介于p型DBR和有源区之间。矩形台面长、宽分别为 $130\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ ,氧化限制层 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 经过氧化后形成面积为 $1000\ \mu\text{m}^2$ ( $100\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ )的矩形氧化孔。对出光孔表面的边缘区域进行刻蚀0.5对DBR,出光孔的中心区域不发生变化,出光孔中心部位呈现凸起的形状,形成浅面浮雕结构。

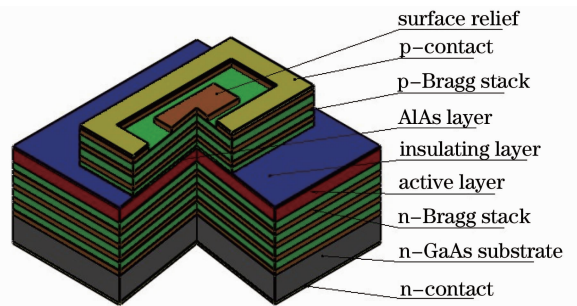


图1 制作VCSEL的工艺结构及外延结构示意图  
Fig. 1 Structure of fabricated VCSEL and its detail epitaxy structure

## 3 理论计算

### 3.1 电流分布

a、b、c代表3种不同台面形状的VCSEL结构,其中a结构代表氧化孔面积为 $1000\ \mu\text{m}^2$ ( $100\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ )的矩形台面VCSEL,b结构代表氧化孔面积

为  $78 \mu\text{m}^2$  (直径为  $10 \mu\text{m}$ ) 的圆形台面结构 VCSEL, c 结构代表氧化孔面积为  $1000 \mu\text{m}^2$  (直径为  $36 \mu\text{m}$ ) 的圆形台面结构 VCSEL, 这 3 种结构采用同一种外延片, 纵向结构完全相同, 其他外加条件如电极宽度、侧氧化深度、芯片两端施加偏压完全相同。

用 COMSOL 有限元分析软件对注入有源区的横向电流密度分布进行模拟分析, 得到如图 2 所示的曲线分布。A1、A2 曲线是 a 结构的电流密度分布图, A1 曲线平行短边方向, A2 曲线平行长边方向, B 曲线是 b 结构的电流密度分布图, C 曲线是 c 结构有源区电流密度分布图。横坐标代表有源区的位置, 纵坐标是电流密度, 0 为有源区中心。

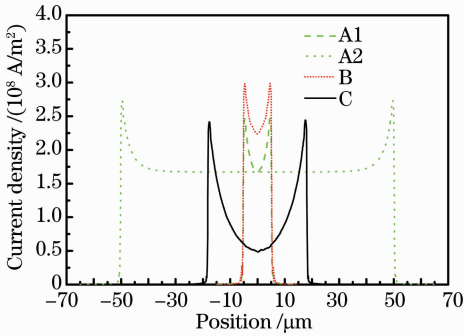


图 2 有源区横向电流密度分布

Fig. 2 Distribution of current density within active layer of laser

图 2 中, A2 曲线中间平滑, 两侧突起, 表明沿长边方向, 有源区横向电流非常均匀, 两侧突起是由绝缘的氧化限制层对电流限制造成。分布于边缘的电流占总电流的比例很小, 所以对激光器模式的增益影响很小。比较 A1 曲线和 B 曲线代表的电流密度, A1 曲线在均匀性方面类似于 B 曲线。B 曲线代表的电流密度分布比 A1 曲线高, 是因为圆形氧化孔比矩形氧化孔小, 注入的电流密度大。电流分布密度对模式的增益产生一定的影响, a 结构和 b 结构中, 电流分布密度对各模式的增益影响相似。C 结构中, 电流密度分布的不均匀性增大, 电流密度分布对激光器模式的增益影响也增大。

图 2 表明, 影响电流密度分布均匀性的因素是有源区两侧的最小距离, 矩形台面结构在增大了有源区面积后, 相比于直径为  $10 \mu\text{m}$  的圆形台面, 并未影响有源区中电流密度分布的均匀性。b 结构的 VCSEL, 在出光孔表面刻蚀出浅面浮雕结构后, 可增大基模对高阶模式的抑制, 实现单基模激励<sup>[2]</sup>。同理, 如果在 a 结构的出光孔表面刻蚀出浅面浮雕结构, 也会增大基模对高阶模式的抑制, 减少输出

模式。

### 3.2 矩形 VCSEL 模式分析

VCSEL 中, 各阶模式的阈值增益决定了模式的输出特性, 阈值增益小的模式优先激励。VCSEL 的出光孔表面刻蚀出浅面浮雕, 降低了反射率, 致使模式的阈值增益增大, 但是基模与高阶模式分布不同, 阈值增益的变化值不同, 基模的阈值增益变化小, 最终基模抑制了高阶模式<sup>[5]</sup>。浅面浮雕的原理是利用传输矩阵理论, 刻蚀深度不同时, 反射光的位相差不同, 反射率也不同。同相时, 反射率高; 反相时, 反射率低。模拟计算浅面浮雕刻蚀深度和面积, 分析由此引起的阈值增益, 对实验上实现高功率单模有重要指导意义。下面分别从浅面浮雕的刻蚀深度、刻蚀面积这两个因素来分析模式限制因子, 以及基模与其他模式的阈值增益差。

对于 VCSEL, 阈值增益的数学表达式为

$$\zeta g_{\text{th}} = \xi \Gamma g_{\text{th}} = \alpha_{\text{m}} + \alpha_{\text{d}} + \alpha_{\text{a}}, \quad (1)$$

式中  $\zeta$  为限制因子,  $g_{\text{th}}$  为阈值增益,  $\xi, \Gamma$  分别为纵向和横向限制因子,  $\alpha_{\text{m}}, \alpha_{\text{d}}, \alpha_{\text{a}}$  分别为端面损耗、衍射损耗、光吸收损耗。

为了抑制高阶模式, 实现单基模输出, 如图 3 所示, 在矩形出光孔的边缘进行刻蚀, 形成反相层, 中心的矩形为未刻蚀区, 是同相层。未刻蚀区和刻蚀区共同形成波导层, 光场分布于整个波导层。但基膜  $E_{00}$  主要能量分布于波导层中间, 与未刻蚀区重叠高; 相比于基膜, 高阶模  $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{04}, E_{10}$  分布于波导边缘, 其能量与刻蚀区重叠高。

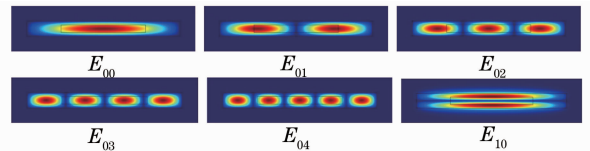


图 3 各模式的光能量分布

Fig. 3 Intensity profiles of several guided modes

为了计算各模式的阈值增益, 首先介绍一下横向限制因子

$$\Gamma = \frac{P_{\text{p}}}{P_{\text{t}}}, \quad (2)$$

式中  $P_{\text{p}}$  为波导层中的光总能量,  $P_{\text{t}}$  为矩形包层和波导层中的光总能量。

同理, 可得到

$$\Gamma_{\text{in}} = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{t}}}, \Gamma_{\text{out}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{t}}}, \quad (3)$$

式中  $P_{\text{in}}$  为未刻蚀区内的光能量,  $P_{\text{out}}$  为刻蚀区内的光能量,  $\Gamma_{\text{in}}$  为未刻蚀区的横向限制因子,  $\Gamma_{\text{out}}$  为刻蚀

区的横向限制因子, 因此

$$\Gamma = \Gamma_{in} + \Gamma_{out}, \quad (4)$$

浅面刻蚀浮雕矩形激光器中, 根据阈值增益(1)式, 假设在出光孔表面刻蚀浮雕后, 各模式  $\xi, \Gamma, \alpha_d, \alpha_a$  的变化忽略不计, 则由  $\xi, \Gamma, \alpha_d, \alpha_a$  引起的阈值增益也可忽略不计, 而端面损耗  $\alpha_m$  变化引起的阈值增益不能忽略, 端面损耗  $\alpha_m$  由未刻蚀区引起的端面损耗  $\alpha_{m-in}$  和刻蚀区引起的端面损耗  $\alpha_{m-out}$  组成, 其表达式为

$$\alpha_m = \alpha_{m-in}\Gamma_{in} + \alpha_{m-out}\Gamma_{out}, \quad (5)$$

增益小于阈值增益时, 对应模式不能激射, 增益大于阈值增益时, 对应模式发生激射。下面写出其中任意一个模式的阈值增益表达式

$$g_{th}\xi\Gamma = \alpha_{m-in}\Gamma_{in} + \alpha_{m-out}\Gamma_{out} + \alpha_d + \alpha_a. \quad (6)$$

把(4)式代入(6)式得

$$g_{th} = [\alpha_{m-in}\Gamma_{in}/\Gamma + \alpha_{m-out}(1 - \Gamma_{in}/\Gamma) + (\alpha_d + \alpha_a)/\Gamma]/\xi. \quad (7)$$

在出光孔表面刻蚀出浅面浮雕, 实现单基模激射, 其原理是: 增大基模与高阶模式的阈值增益  $g_{th}$  的差。假设基模在未刻蚀区内的横向限制因子为  $\Gamma_{in-0}$ , 在刻蚀区中的限制因子为  $\Gamma_{out-0}$ , 某一高阶模式在未刻蚀区内的横向限制因子为  $\Gamma_{in-high}$ , 在刻蚀区中的限制因子为  $\Gamma_{out-high}$ , 代入(7)式, 基模和某一高阶模式的阈值增益差可近似为

$$\delta g_{th} = (\Gamma_{in-0} - \Gamma_{in-high})(\alpha_{m-out} - \alpha_{m-in})/\Gamma\xi. \quad (8)$$

当  $(\alpha_{m-out} - \alpha_{m-in})/\Gamma\xi$  取最大值,  $(\Gamma_{in-0} - \Gamma_{in-high})$  取最大值时,  $\delta g_{th}$  为最大值, 基模对该高阶模式的抑制比最大。 $\alpha_{m-out}$  由 VCSEL 的纵向结构确定, 由刻蚀深度决定。

### 3.2.1 简要分析刻蚀深度对阈值增益的影响

根据端面损耗与反射率的关系  $\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln r_1 r_2$ ,

其中  $r_1, r_2$  为谐振腔两端的反射率,  $L$  为谐振腔长, 在刻蚀过程中, 假设  $L, r_1$  是不变量, 只有  $r_2$  随刻蚀

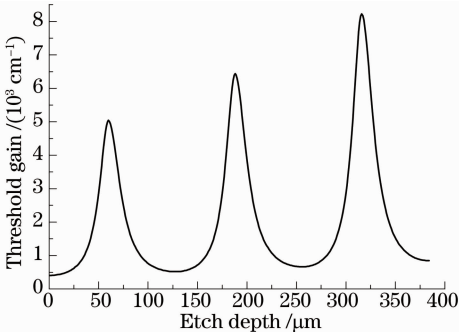


图 4 阈值增益和表面刻蚀深度的关系

Fig. 4 Calculated threshold gain versus etch depth for surface-etch

深度发生变化, 运用 matlab 计算出阈值增益与刻蚀深度的关系。如图 4 所示, 归功于 DBR 的周期性变化, 刻蚀深度引起的阈值增益也呈现周期性的增长和减小, 当刻蚀深度为  $(n+0.5)$  对 DBR 时 ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ) 时, 透射损耗引起的阈值损耗最大。

### 3.2.2 刻蚀面积对阈值增益的影响

对于矩形波导结构, 大部分高阶模式散射损耗大, 阈值增益高, 不能激射, 影响单基模出射的模式主要有  $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{04}, E_{05}, E_{10}$  等。

当表面未刻蚀区的面积不同时,  $\Gamma_{in}, \Gamma_{out}, (\Gamma_{in-0} - \Gamma_{in-high}) = \Delta\Gamma$  值不同。未刻蚀区中, 当长边不变, 短边变化时,  $\Delta\Gamma$  的值随短边发生改变; 当短边不变, 长边变化时,  $\Delta\Gamma$  的值随长边发生改变。取  $\Delta\Gamma$  的最大值, 得到最优的未刻蚀区的长边和短边的大小。

矩形台面结构的 VCSEL 波导层折射率为 3.26, 包层折射率为 3.16, 折射率差近似为 0.1<sup>[16]</sup>。模式分析结果如图 3 所示, 当未刻蚀区面积一定时, 可能同时存在多个模式, 基模只要抑制了与它的限制因子差  $\Delta\Gamma$  最小的高阶模式, 就能抑制其他所有的高阶模式。图 5 中, 纵坐标代表限制因子, 横坐标代表短边, 各个曲线表示长边边长分别为 45、50、55、60  $\mu\text{m}$ 。当一边不变, 另一边增大时,  $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{04}, E_{10}$  与  $E_{00}$  的限制因子差中最小的  $\Delta\Gamma$  先增大后减小。对于不同的边长, 图 5 显示, 当长边  $W=55 \mu\text{m}$ , 短边  $H=5.5 \mu\text{m}$  时, 即未刻蚀区和出光孔边长比为 55:100 时, 限制因子差  $\Delta\Gamma$  最大, 为 0.128。在本结构中,  $\alpha_{m-out}=81.06$ ,  $\alpha_{m-in}=8.45$ ,  $\Gamma=0.91$ ,  $\xi=0.021$ , 代入(8)式得到基模与其他模式阈值增益差为  $493 \text{ cm}^{-1}$ , 此时, 基模对高阶模式的抑制最强。

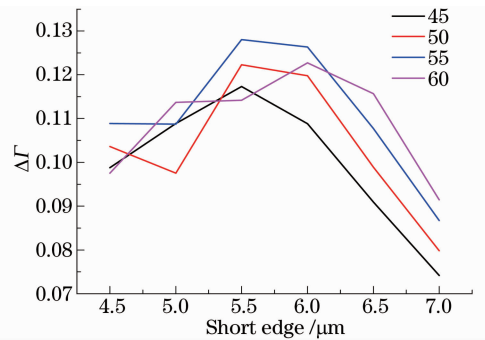


图 5 限制因子差  $\Delta\Gamma$  与未刻蚀区边长的关系

Fig. 5 Difference of confinement factor  $\Delta\Gamma$  versus length of no etching area

### 3.3 理论模拟结果

采用 COMSOL 有限元分析软件对计算得到的



最佳参数结构进行理论分析,为了简化运算,只对波长为 848.5~851.5 nm 范围内的光进行模拟,得到图 6 所示的光能量分布曲线图。普通 VCSEL 的光能量分布曲线中,波长为 849.1、850.1、850.6 nm 的光能量密度相对较大,这 3 个波长的光能量密度相差较小,几乎能同时激射,在光激射过程中,以多横模方式输出。点线是浅面浮雕的 VCSEL 光能量分布曲线,相比于普通结构的光能量密度,浅面浮雕结构的光能量密度较小,主要由出光面反射率减小,输出增大,内部光能减小所致。850.6 nm 波长的光能量明显比其他波长的光能量密度大,会优先于其他波长激射。在输出光的过程中,能很好地抑制其他波长的光。

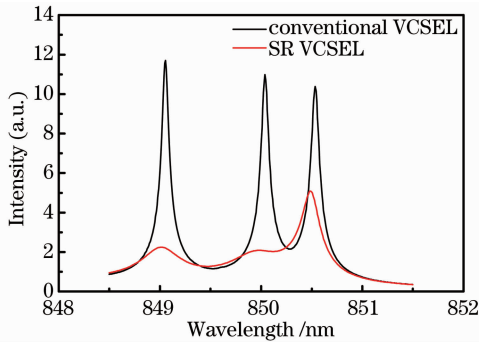


图 6 浅面浮雕结构与普通结构的光谱分布曲线

Fig. 6 Spectral distribution curve of shallow surface relief structure and general structure

## 4 实验结果

根据上述理论,制备出氧化孔边长为  $100\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ,浅面浮雕边长为  $55\ \mu\text{m} \times 5.5\ \mu\text{m}$  的矩形台面 VCSEL。采用连续电源注入在室温下进行测试,光功率-电流-电压 ( $P$ - $I$ - $V$ ) 曲线如图 7 所示。总功率曲线的斜率效率为  $0.5\ \text{W/A}$ ,阈值电流为  $7\ \text{mA}$ 。V 代表长边方向,H 代表短边方向,在电流小于  $25\ \text{mA}$  时,长边和短边方向输出功率的偏振比约为 10。随着电流的增大,模式的增加,在电流为  $30\ \text{mA}$  时,输出功率的偏振比降为 6。在电流为  $18\ \text{mA}$  时,输出功率为  $5.87\ \text{mW}$ ,采用分辨率为  $0.02\ \text{nm}$  的光谱仪对其测量,得到图 8 所示的光谱图。边模抑制比大于  $30\ \text{dB}$ ,峰值以下  $3\ \text{dB}$  的光谱宽度为  $0.106\ \text{nm}$ ,实验结果与上述理论模拟结果相符,而传统 VCSEL 为多模激射,光谱较宽。中心波长为  $853.14\ \text{nm}$ ,与理论波长不同,产生的原因可能有以下几个方面:在 VCSEL 外延片制备中,谐振腔的误差会引起波长的不同;在测试过程中,有源区的热效

应会引起波长发生漂移;表面刻蚀造成的等效腔长增大,也会引起波长发生变化。图 9 为对应的远场分布图,短边发散角为  $9.5^\circ$ ,长边发散角为  $7.9^\circ$ ,相比于没有表面浮雕结构的矩形 VCSEL,远场发散角无明显的变化。

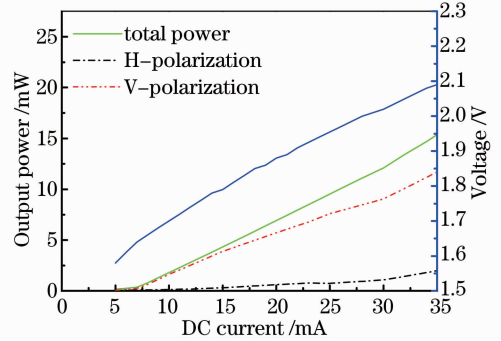


图 7 偏振特性的  $P$ - $I$ - $V$  曲线图

Fig. 7 Polarization-resolved  $P$ - $I$ - $V$  characteristics

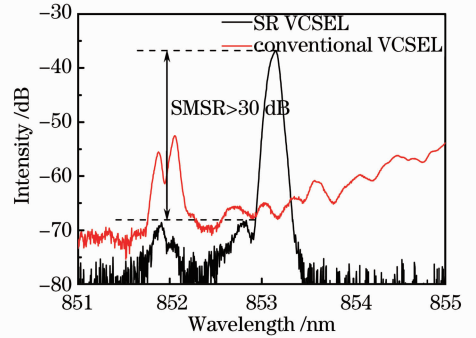


图 8 SR VCSEL 在电流为  $18\ \text{mA}$  时的光谱分布曲线

Fig. 8 Spectra distribution of SR VCSEL at pump current of  $18\ \text{mA}$

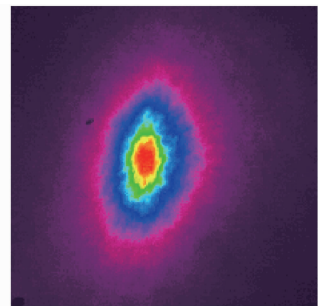


图 9 远场光斑图

Fig. 9 Far-fiele distribution

## 5 结 论

在理论上通过对 VCSEL 电流密度分布分析,比较了氧化孔边长为  $10\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  的矩形台面、氧化孔直径为  $10\ \mu\text{m}$  的圆形台面及氧化孔面积为  $1000\ \mu\text{m}^2$  的圆形台面的电流密度分布。研究表明,相比于氧化孔直径为  $10\ \mu\text{m}$  的圆形台面,采用矩形

台面时,有源区面积增大后,电流密度分布的均匀性不变,电流密度分布对它的模式影响也不变。通过对出光孔表面未刻蚀区的面积和刻蚀区刻蚀深度的计算,得到刻蚀深度为 0.5 对 DBR,未刻蚀区和出光孔在边长比为 55:100 时,基模和高阶模式的阈值增益差最大,为  $493 \text{ cm}^{-1}$ 。

采用理论模拟证实,浅面浮雕结构的矩形 VCSEL 能够抑制高阶模式,窄化输出光谱。实验结果显示,具有浅面浮雕结构的矩形波导 VCSEL 能够实现输出功率为 5.87 mW、功率偏振比为 10,模式抑制比为 30 dB,线宽为 0.1 nm 的激光输出。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Ning Yongqiang, Zhang Jinglong, *et al.*. Polarization properties of high-power vertical-cavity bottom-emitting laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302002.  
王 伟, 宁永强, 张金龙, 等. 高功率垂直腔底发射激光器的振荡特性[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302002.
- 2 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Gain-cavity mode detuning vertical cavity surface emitting laser operating at the high temperature [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502001.  
张建伟, 宁永强, 张 星, 等. 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.
- 3 Zhang Jinsheng, Ning Yongqiang, Zhang Jinlong, *et al.*. Optimization of electric field intensity distribution on high power semiconductor laser facet film[J]. Chinese J Lasers, 2014, 40(1): 0107001.  
张金胜, 宁永强, 张金龙, 等. 大功率半导体激光器腔面膜的场强分布优化[J]. 中国激光, 2014, 40(1): 0107001.
- 4 Wang Zhiqun, Yao Shun, Cui Bifeng, *et al.*. Thermal characteristic of high beam quality laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2497-2501.  
王智群, 尧 舜, 崔碧峰, 等. 高光束质量大功率半导体激光阵列的热特性[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2497-2501.
- 5 H J Unold, S W Z Mahmoud, R Jäger, *et al.*. Large-area single-mode VCSELs and the self-aligned surface relief[J]. Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 7(2): 368-392.
- 6 Å Haglund, J S Gustavsson, J Vukušić, *et al.*. Single fundamental-mode output power exceeding 6 mW from VCSELs with a shallow surface relief[J]. Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 368-370.
- 7 M S Alias, S Shaari, P O Leisher, *et al.*. Single transverse mode control of VCSEL by photonic crystal and trench patterning[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2010, 8(1): 38-46.
- 8 Z H Yang, J R Leger, A V Shchegrov. Three-mirror resonator with aspheric feedback mirror for laser spatial mode selection and mode shaping[J]. Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(9): 1258-1269.
- 9 A N Al-Omari, K L Lear. High-speed 980 nm vertical cavity surface emitting lasers with a multi-oxide layer structure for single-mode operation[J]. IET Optoelectron, 2011, 5(2): 57-61.
- 10 H J Unold, S W Z Mahmoud, R Jäger, *et al.*. Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 939-941.
- 11 D Zhou, L J Mawst. High-power single-mode antiresonant reflecting optical waveguide-type vertical-cavity[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(12): 1599-1606.
- 12 J W Shi, C C Chen, Y S Wu, *et al.*. High-power and high-speed Zn-diffusion single undamental-mode vertical-cavity surface-emitting lasers at 850-nm wavelength [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1121-1123.
- 13 A Kroner, F Rinaldi, J M Ostermann, *et al.*. High-performance single fundamental mode AlGaAs VCSEL with mode-selective mirror reflectivities[J]. Opt Commun, 2007, 270(2): 332-335.
- 14 Wei Simin, Xu Chen, Deng Jun, *et al.*. Single-fundamental-mode 850 nm surface relief VCSEL[J]. Chinese Phys Lett, 2012, 29(8): 084208.
- 15 Yang Hao, Guo Xia, Guan Baolu, *et al.*. The influence of injection current on transverse mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Phys Sin, 2008, 57(5): 2959-2964.  
杨 浩, 郭 霞, 关宝璐, 等. 注入电流对垂直腔面发射激光器横模特性的影响[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 2959-2964.
- 16 K L Lear, K D Choquette, R P Schneider, *et al.*. Modal analysis of a small surface emitting laser with a selectively oxidized waveguide[J]. Appl Phys Lett, 1995, 66(20): 2616-2618.

栏目编辑:张 雁