

多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性

关宝璐 刘欣 江孝伟 刘储 徐晨

Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser

Guan Bao-Lu Liu Xin Jiang Xiao-Wei Liu Chu Xu Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 164203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于半导体环形激光器的高速双向双信道混沌保密通信

High speed bidirectional dual-channel chaos secure communication based on semiconductor ring lasers

物理学报.2015, 64(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154205>

243 nm 稳频窄线宽半导体激光器

A narrow linewidth diode laser at 243 nm

物理学报.2015, 64(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134205>

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system

物理学报.2015, 64(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124206>

有机激光材料及器件的研究现状与展望

Current research and future development of organic laser materials and devices

物理学报.2015, 64(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094202>

反馈强度对外腔反馈半导体激光器混沌熵源生成的随机数序列性能的影响

Influence of feedback strength on the characteristics of the random number sequence extracted from an external-cavity feedback semiconductor laser

物理学报.2015, 64(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084204>

## 多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性\*

关宝璐† 刘欣 江孝伟 刘储 徐晨

(北京工业大学, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2015年2月9日收到; 2015年3月12日收到修改稿)

基于氧化限制型内腔接触垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构设计, 研究了 VCSEL 的多横模分布及其模式波长分裂特性与氧化孔径尺寸、形状的关系. 在实验基础上, 通过建立有效折射率模型, 并利用标量亥姆霍兹方程的迭代算法理论, 分别对椭圆形氧化孔径和圆形氧化孔径 VCSEL 的横向模式特性进行模拟研究, 计算得到不同形状孔径的多横模光场分布情况, 同时测量得到高阶横模多频输出光谱. 研究发现, 椭圆氧化孔形状不仅影响横模分布特性, 还会导致每个模式的波长产生分裂, 分裂值可达 0.037 nm. 同时, 随着氧化孔径的增大, 波长分裂影响会逐渐减小, 直至趋近于圆形氧化孔径的分布特性. 研究结果为进一步实现氧化限制型 VCSEL 的多横模锁定提供了有益参考和借鉴.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器, 氧化孔径, 横模分布, 波长分裂

**PACS:** 42.55.Px, 42.79.Ag, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.64.164203

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 作为重要的半导体激光器光源之一, 对促进信息社会的高速发展和推动高密度、超快光通信技术的形成变得越来越重要. 特别是具有短脉冲、高重复频率的横模锁定 (mode-locking, ML) VCSEL 越来越被人们所研究和关注 [1,2]. 通过锁定 VCSELs 的单个或多个高阶横模, 可以使 VCSEL 产生皮秒级甚至飞秒级的高重复率激光, 并具有相同的模式空间, 可以产生类似光学频率梳的输出频谱, 广泛应用于集成光通信、全光原子钟以及光测量. 但是由于面发射激光器所生长的晶体材料的各向异性, 在 AlGaAs 氧化限制孔径形成过程中容易产生不规则形状, 直接导致 VCSEL 的近场模式分布不均匀 [3]. 特别是为了减小 VCSEL 激光器阈值电流, 人们在设计中往往采取小尺寸氧化孔径的方法 [4,5]. 而氧化孔径较小时, 高铝组分 AlGaAs 层氧化速率的各向异性更为突出, 所设计的圆形氧化孔径最终成为椭圆形 [6],

从而影响拉格朗日-高斯模式间距分布的形成. 因此, 为了使横向模式能够更好地锁定, 椭圆形氧化孔径 VCSEL 的横向模式分布以及相邻模式对应波长分裂的研究变得至关重要. 目前, 已有课题组开展了氧化限制型 VCSEL 横模特性研究, 例如, Li 等 [7] 在实验中观测到了波长分裂的现象; Zhang 等 [8] 研究了电光双折射效应对模式分裂的影响, 解释了在外加电场下两个正交方向波长的偏移的现象. 但这些研究都没有具体考虑氧化孔形状变化带来的影响, 特别是对高阶横模的分布以及波长分裂计算方法的研究尚未见报道.

传统 VCSEL 是利用柱坐标系下的多横模速率方程来研究横模场分布 [9], 但是这种针对于圆形氧化孔径的计算方法显然已经不再适用于椭圆形氧化孔径波导结构. 因此, 本文在实验基础上, 建立椭圆波导有效折射率模型, 并利用 Rsoft 软件对 VCSEL 的多横模特性进行模拟分析, 最终得到椭圆形氧化孔径多横模近场模式的二维平面分布和氧化孔径横截面的有效折射率分布, 并与实验结果进行了对比.

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 60908012)、北京市教委面上项目 (批准号: KM201010005030) 和北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gbl@bjut.edu.cn

## 2 氧化限制型 VCSEL 的结构设计

图 1(a) 为 850 nm 氧化限制型 VCSEL 的横截面示意图, 该 VCSEL 采用金属有机物化学汽相淀积方法生长得到, 其主要结构如下: 首先, 在 n 型掺杂的 GaAs 衬底上外延生长 34 对  $\lambda/4$  厚度的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  下分布布拉格反射镜 (DBR); 再生长 3 对 7.2 nm 厚的 GaAs 量子阱和 8 nm 厚的  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  势垒组成有源区部分; 然后在有源区上面生长 20 对  $\lambda/4$  厚度的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  的顶部 DBR. 同时, 在有源区和顶部 DBR 之间生长一层厚度为 30 nm 的氧化限制层 ( $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ ), 经过湿氮氧化工艺后得到对电流和光场同时具有限制作用的氧化孔径 [10].

上述 VCSEL 制备工艺过程如下: 首先在外延

片上光刻, 并利用体积比为甲醇:磷酸:双氧水:去离子水 = 1 : 3 : 1 : 5 的 DBR 腐蚀液, 湿法刻蚀出圆柱形台面, 深度大于 2.7  $\mu\text{m}$ , 使氧化限制层  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  侧壁充分暴露出来. 然后在 400  $^{\circ}\text{C}$  的湿氮环境下进行氧化, 氧化孔径分别为 8, 10, 15 和 20  $\mu\text{m}$ . 通过等离子体增强化学气相淀积淀积一层 400 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  作为钝化层, 溅射 350 nm 的 Ti-Au p 型电极, 光刻出电极图形, 背面衬底减薄至 120  $\mu\text{m}$ , 溅射 Au-Ge-Ni-Au 并在 430  $^{\circ}\text{C}$  下退火 35 s, 合金形成 n 型背面电极. 氧化孔径如图 1(b) 所示, 可清晰看到图中氧化孔径不再是初始设计的圆形, 而近似为椭圆形. 这是由于  $[0\bar{1}1]$  晶向的键能较高, 该晶向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 [11], 于是在高组分 Al 层中心形成了一个近似椭圆形的氧化孔径 [12], 其中  $[0\bar{1}1]$  方向为椭圆的长轴方向,  $[011]$  方向为椭圆的短轴方向.

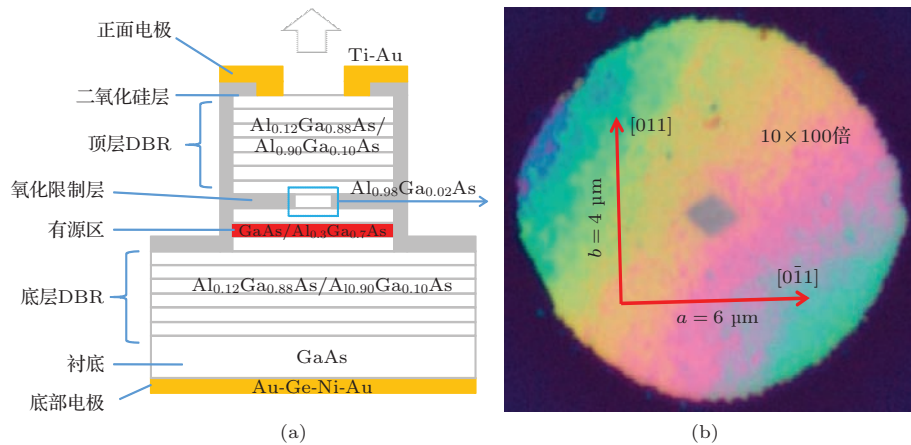


图 1 (网刊彩色) 实验中 VCSEL 结构和近似椭圆的氧化孔径形状

Fig. 1. (color online) Structure of VCSEL and elliptical oxide aperture.

## 3 椭圆形氧化孔径 VCSEL 的模式计算

氧化孔径的形状对 VCSEL 的近场模式特性有很大影响, 往往会导致高阶横模近场模式分布的不同, 从而改变激光器的激励特性. 因此, 本文分别建立了小尺寸下的椭圆波导模型和圆形波导模型, 并基于标量亥姆霍兹方程的迭代算法 (BPM) 对横模近场分布进行了计算分析, 得到椭圆形氧化孔径和圆形氧化孔径 VCSEL 近场二维分布, 如图 2 和图 3 所示.

可以看出, 当模式阶数较低时, 模式光场分布范围相对集中, 光束发散角较小. 因此, 对于椭圆形氧化孔径和圆形氧化孔径 VCSEL 的基模分布没有明显的区别. 但随阶数的增加, 模式光场分布变得复杂且分散, 范围随之增大, 并且由于氧化孔径形状的不同, 椭圆孔径和圆形孔径 VCSEL 的模式分布也不再一致. 如图 2 中  $\text{LP}_{41}$  的横模近场分布, 由于椭圆的氧化孔径形状不是圆对称结构, 在短轴  $[011]$  方向, 模式分布被大大限制, 导致光场能量分布不均匀, 并集中在一起, 其光斑并未如图 3 中圆形氧化孔径的  $\text{LP}_{41}$  模式具有清晰的分裂光斑. 此

外, 对于标准圆对称氧化型 VCSEL 结构, 模式波长可以表示为

$$\lambda_{lp} = \lambda_B \left[ 1 - (2p + l - 1) \frac{\lambda_B}{a} \frac{\sqrt{n_0^2 - n_a^2}}{\sqrt{2\pi n_0^{3/2}}} \right], \quad (1)$$

其中,  $\lambda_{lp}$  是每个 LP 模式对应波长,  $\lambda_B$  是中心波长,  $a$  是氧化孔径半径,  $n_0$  是芯层折射率,  $n_a$  是包层折射率, 则两个相邻模式之间的波长间距由 (2) 式给出,

$$\Delta\lambda = \lambda_{01} - \lambda_{11} = \lambda_{11} - \lambda_{21} = \frac{\lambda_B^3}{2\pi^2 \omega_0^2 n_0^2}, \quad (2)$$

其中  $\omega_0$  是光斑半径,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a\lambda_B}{\pi\sqrt{n_0^2 - n_a^2}}}. \quad (3)$$

因此, 从 (2), (3) 式可以得出任意两个相邻模式波

长的间距为定值,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2 \sqrt{n_0^2 - n_a^2}}{2\pi a n_0^2}. \quad (4)$$

从 (4) 式中我们可以看出, 波长间距只与中心波长、氧化孔径以及有效折射率差有关, 即每个模式波长间距均相等. 因此, 在标准的圆对称氧化孔径结构中, VCSEL 相邻模式波长本质上也是等间距的. 且当两个模式序数  $(2p + l)$  的值相等时, 这两个模式的截止频率和波长都相等, 即频率简并.

图 4 为不同尺寸圆形氧化孔径下, 激光器模式波长的分布图. 从图中可以看出, 氧化孔径为  $8 \mu\text{m}$  时, VCSEL 的一阶模式  $LP_{11}$  的波长是  $848.72 \text{ nm}$ , 而当氧化孔径增大到  $20 \mu\text{m}$  时, VCSEL 的  $LP_{11}$  模式波长变为  $849.49 \text{ nm}$ , 红移了  $0.77 \text{ nm}$ , 即随着氧化孔径的增大, 每个模式对应的激射波长将相应增加. 同时, 氧化孔径为  $8 \mu\text{m}$  时 VCSEL 模式空间距

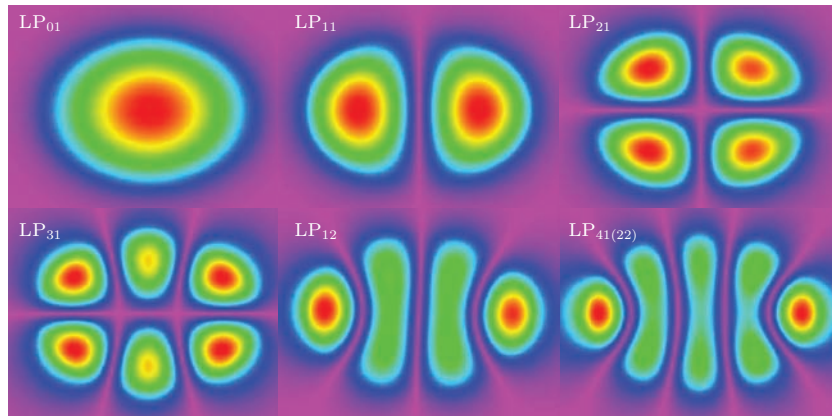


图 2 (网刊彩色) 椭圆孔径 VCSEL 横向模式分布

Fig. 2. (color online) Distribution of transverse mode of elliptical oxide aperture VCSEL.

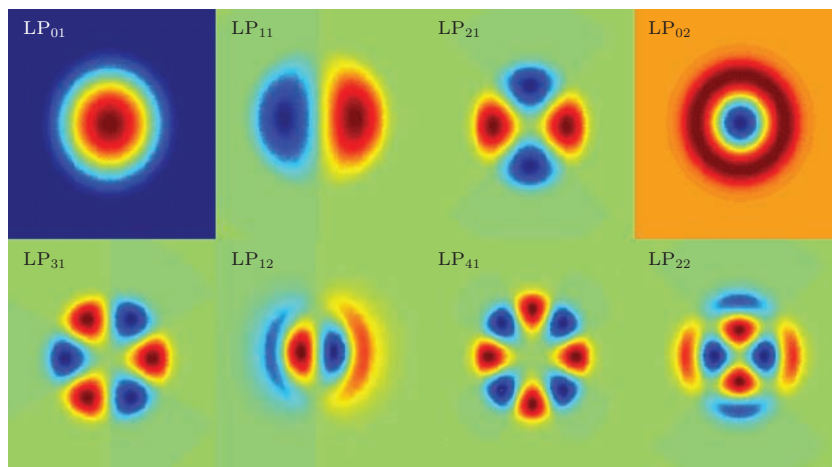


图 3 (网刊彩色) 圆形氧化孔径 VCSEL 近场模式分布

Fig. 3. (color online) Distribution of transverse mode of circular oxide aperture VCSEL.

离为0.64 nm, 而当氧化孔径增大到20 μm时 VCSEL 的模式空间距离却减小为0.25 nm, 即模式空间距离随着孔径的增大而减小. 这是由于, 随着氧化孔径的增大, 模式空间分布的各向异性逐渐变小, 同时, 椭圆波导结构对横模的横向限制作用减弱, 各个模式波长更接近中心波长, 使得相邻模式空间距离随之变小.

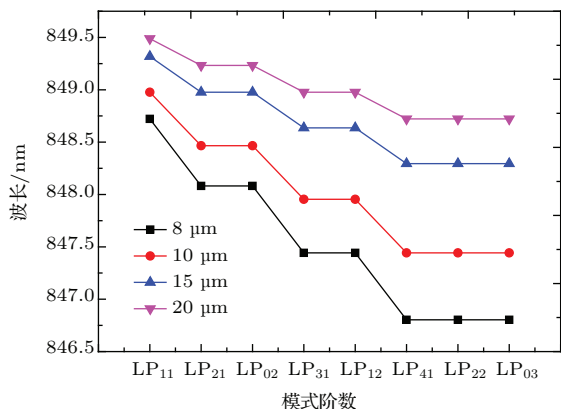


图4 (网刊彩色) 四个不同尺寸圆形氧化孔径器件每个模式对应波长的分布

Fig. 4. (color online) Distribution of wavelength corresponding to each transverse mode in different diameter size of circular oxide aperture VCSEL.

LP 模式不仅具有固定的模式波长, 每个模式还具有相同的两个正交分布的退化模式, 并且每个模式均由两个互相正交的电场矢量  $\mathbf{E}$  和磁场矢量  $\mathbf{H}$  组成. LP 模式的偏振方向在水平方向的分布可以按照  $\cos(j\phi)$  或  $\sin(j\phi)$  变化进行耦合, 即电场矢量  $\mathbf{E}$  既可以沿  $x$  轴方向传播, 也可以沿  $y$  轴方向传播. 因此, 对于单一的 LP 模式实际上有 4 种不同的模场分布, 且两两正交. 但是, 对于氧化孔径不再是标准圆对称结构, 而是类似于椭圆形的结构而言, 当 LP 模式在两个正交方向分布时, 椭圆波导阶跃折射率分布的各向异性将会导致两个正交分布的模式波长产生分裂. 其椭圆形氧化孔径在  $[0\bar{1}1]$  和  $[011]$  方向的折射率分布可以表示为<sup>[13]</sup>

$$n(x, y) = \begin{cases} n_0 \left(1 + \frac{1}{2}g^2\right) - \frac{1}{2}g^2 n_0 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right), & \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \leq 1\right), \\ n_0 - \delta n, & \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} > 1\right). \end{cases} \quad (5)$$

其中  $a$  为椭圆波导的长轴,  $b$  为短轴, 芯层折射率  $n_0 = 3.30$ ,  $g$  为与温度相关的拟合参数, 折射率梯度  $\delta n = 0.01$ .

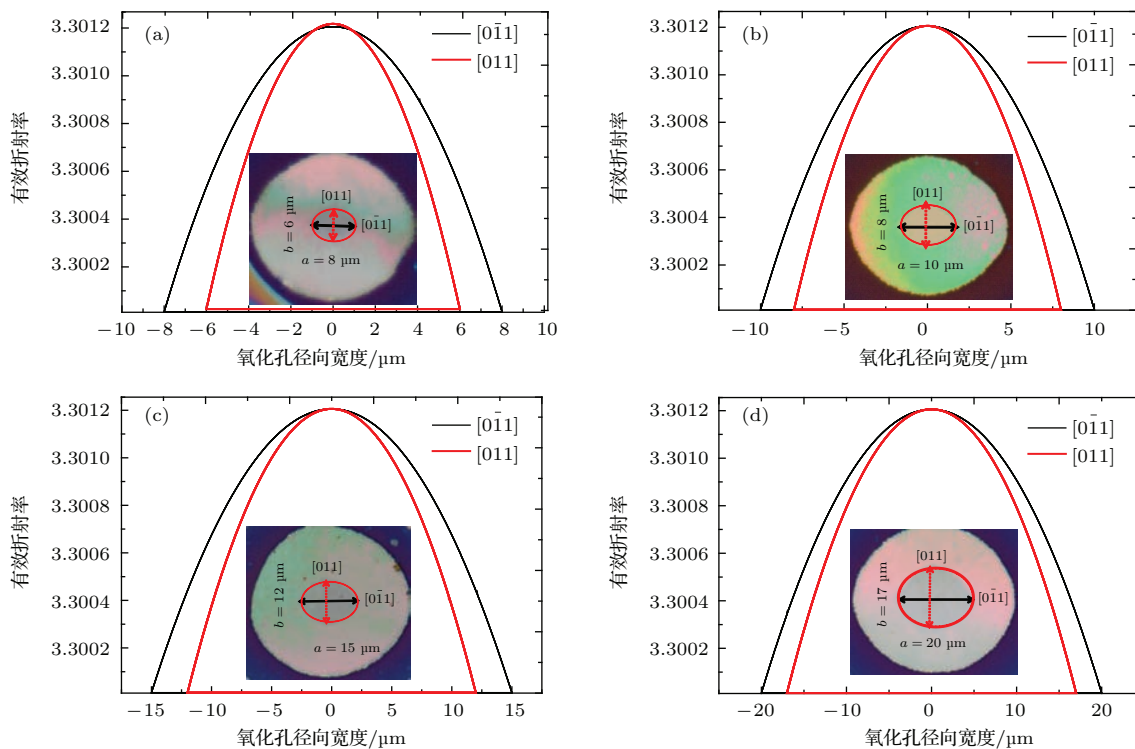


图5 (网刊彩色) 不同椭圆形氧化孔径的折射率径向分布 (a)  $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 6 \mu\text{m}$ ; (b)  $a = 10 \mu\text{m}$ ,  $b = 8 \mu\text{m}$ ; (c)  $a = 15 \mu\text{m}$ ,  $b = 12 \mu\text{m}$ ; (d)  $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 17 \mu\text{m}$

Fig. 5. (color online) The distribution of refractive index of the elliptical oxide aperture with different diameter: (a)  $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 6 \mu\text{m}$ ; (b)  $a = 10 \mu\text{m}$ ,  $b = 8 \mu\text{m}$ ; (c)  $a = 15 \mu\text{m}$ ,  $b = 12 \mu\text{m}$ ; (d)  $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 17 \mu\text{m}$ .

图5为椭圆形氧化孔径VCSEL不同晶向的折射率分布. 可以看出, 两个正交方向的折射率成抛物线形状分布, 考虑到温度的影响, 原来的阶跃折射率分布将变为周围低、中间高的渐变折射率分布, 并且由于椭圆氧化孔径的不对称, 折射率分布在 $[0\bar{1}1]$ 方向比 $[011]$ 方向要高一些. 随着氧化孔径的增大, 不同径向上的折射率差值会随之减小, 这是由于当孔径尺寸增大时, 各向异性减弱, 氧化孔径的椭率越来越小, 形状越来越接近圆形, 因此折射率分布也逐渐接近圆对称形状的折射率分布. 椭圆正交方向的不对称直接导致了折射率分布的不均匀, 并决定了两个方向的折射率差值 $\Delta n$ 的大小. 而模式波长分裂产生的波长差与不同径向上折射率差值的关系可以表示为

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}, \quad (6)$$

其中 $n_0$ 为芯层折射率,  $\lambda_0$ 为中心波长.

从(6)式中不难看出, 当两个正交模式的折射率差值 $\Delta n$ 不为0时, 必然会产生一个相应的波长差 $\Delta \lambda_{ip}$ , 因此, 波长差值的大小直接由氧化孔径的各向异性决定.

图6为当长轴 $a = 8 \mu\text{m}$ , 短轴 $b = 6 \mu\text{m}$ 时椭圆氧化孔径VCSEL高阶模式波长的分布. 当模场按长轴 $[0\bar{1}1]$ 方向分布时, 激光的波长比按短轴 $[011]$ 方向分布时红移, 即正交模式波长随着轴向分布的正交变化而出现两个可能的峰值. 从图6可以看出, 当长轴 $a = 8 \mu\text{m}$ , 短轴 $b = 6 \mu\text{m}$ 时, VCSEL的模式空间距离为0.64 nm, 而对应于一阶模式 $LP_{11}$

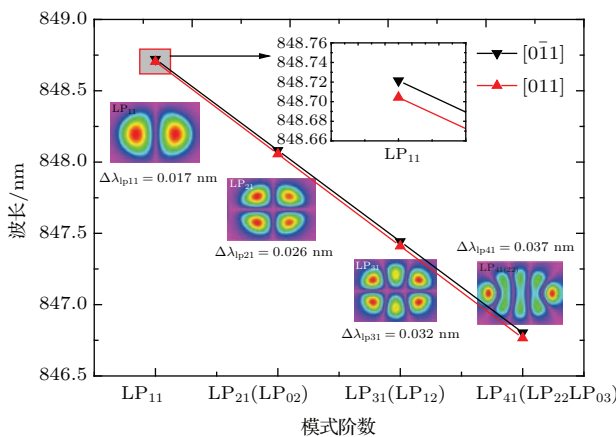


图6 (网刊彩色) 长短轴分别为 $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 6 \mu\text{m}$ 的椭圆氧化孔径VCSEL波长分布

Fig. 6. (color online) Distribution of wavelength of  $a = 8 \mu\text{m}$  and  $b = 6 \mu\text{m}$  elliptical oxide aperture VCSEL.

模式波长的 $\Delta \lambda_{11} = 0.017 \text{ nm}$ . 随着阶数的增加,  $LP_{41}$ 模式波长差变为 $\Delta \lambda_{41} = 0.037 \text{ nm}$ . 表1为不同长轴的椭圆孔径VCSEL模式波长分裂情况. 其中, 芯层折射率 $n_0 = 3.30$ , 包层折射率 $n_a = 3.29$ , 折射率梯度 $\delta n = 0.01$ , 与温度相关的拟合参数 $g = 0.0269$ . 如表1所列, 当长轴 $a = 20 \mu\text{m}$ , 短轴 $b = 17 \mu\text{m}$ 时, VCSEL的模式空间距离为0.25 nm, 其一阶模式 $LP_{11}$ 模式波长差为 $\Delta \lambda_{11} = 0.0013 \text{ nm}$ ,  $LP_{41}$ 模式波长为 $\Delta \lambda_{41} = 0.0033 \text{ nm}$ . 计算结果表明, 由于椭圆折射率的各向异性分布产生的波长分裂现象直接导致相邻模式间波长变为非等间距分布, 并且随着氧化孔径的减小, 波长分裂程度会进一步增加.

表1 不同尺寸椭圆孔径模式对应波长分裂情况

Table 1. Distribution of wavelength split corresponding to each transverse mode in different diameter size of elliptical oxide aperture VCSEL.

模拟参数: $n_0 = 3.30, n_a = 3.29, \delta n = 0.01, g = 0.0269$				
模式	$\Delta \lambda_{ip}/\text{nm}$			
	$a = 8 \mu\text{m}$	$a = 10 \mu\text{m}$	$a = 15 \mu\text{m}$	$a = 20 \mu\text{m}$
$LP_{11}$	0.017	0.00798	0.004	0.0013
$LP_{21}$	0.026	0.01133	0.005	0.0021
$LP_{02}$	0.026	0.01133	0.005	0.0021
$LP_{31}$	0.032	0.015	0.006	0.0026
$LP_{12}$	0.032	0.015	0.006	0.0026
$LP_{41}$	0.037	0.018	0.007	0.0033
$LP_{22}$	0.037	0.018	0.007	0.0033
$LP_{03}$	0.037	0.018	0.007	0.0033

从表1可以看出, 在同一个VCSEL中, 模式序数越大, 波长分裂情况越为严重. 同时, 两个频率简并的模式, 也依然具有相同的波长分裂情况. 简并模式 $LP_{21}$ 和 $LP_{02}$ 波长分裂均为0.026 nm, 二者依然具有相同波长. 而对于不同椭圆孔径的VCSEL, 孔径越小, 分裂效果越明显, 长轴为 $a = 8 \mu\text{m}$ 的椭圆氧化孔径VCSEL的 $LP_{11}$ 模式波长分裂值为0.017 nm, 而 $LP_{41}$ 模式波长分裂达到0.037 nm, 但是对于长轴为 $a = 20 \mu\text{m}$ 的椭圆氧化孔径VCSEL,  $LP_{11}$ 模式波长分裂0.0013 nm,  $LP_{41}$ 模式波长分裂为0.0033 nm, 相差达到一个数量级. 而且, 孔径越小, 模式限制作用越大, 有效折射率在 $[0\bar{1}1]$ 方向和 $[011]$ 方向各向异性越强, 每个模式对波长的分裂趋势也越显著.

### 4 实验结果与分析

图7为室温测量得到的椭圆形氧化孔径VCSEL输出功率和电压随电流变化关系曲线,其中注入电流为5 mA,椭圆氧化孔径长轴8 μm.从图7中可以看出,5 mA下VCSEL最高输出光功率为0.72 mW,阈值电流为0.2 mA,激射中心波长为850.48 nm.

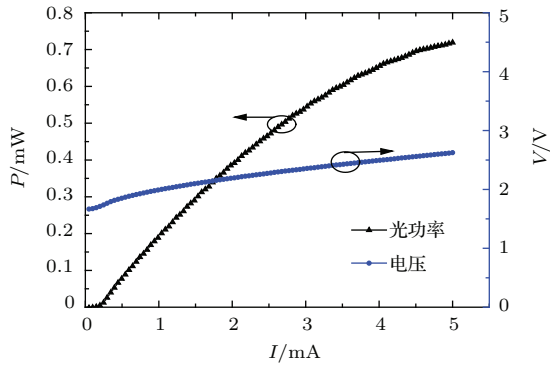


图7 (网刊彩色)  $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 6 \mu\text{m}$  孔径器件的  $I$ - $P$ - $V$  特性曲线

Fig. 7. (color online)  $I$ - $P$ - $V$  characteristic curve in  $a = 8 \mu\text{m}$  and  $b = 6 \mu\text{m}$  elliptical oxide aperture VCSEL.

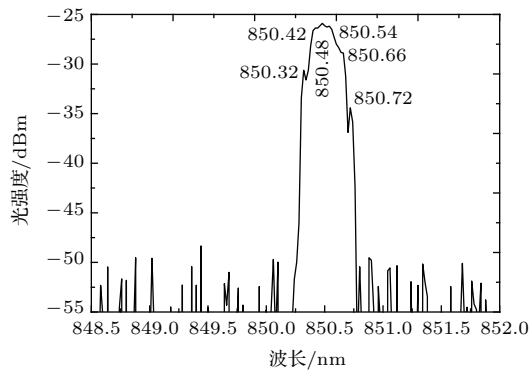


图8 4 mA注入电流下激射光谱

Fig. 8. Emission spectrum at a bias current of 4 mA.

图8为室温下VCSEL的多横模输出光谱.可以看出,当注入电流为4 mA时,不考虑简并情况,多横模输出光谱中包含了6个模式,测得模式波长分别为850.72, 850.66, 850.54, 850.48, 850.42和850.32 nm.同时,相邻模式波长间距分别为0.06, 0.12, 0.06, 0.06和0.1 nm.如上分析,波长间距已经变为非等间距分布.这是由于氧化孔径的各向异性导致椭圆折射率波导的非对称分布和偏振方向不同所导致,使得模式波长产生分裂,波长间距的差值在0.04 nm左右,这与我们的计算分析结果一致.另外,对于高阶模式,实测波长间距为

0.06—0.1 nm,比我们计算的波长间距小0.2 nm.这是因为考虑到温度影响后,氧化孔径阶跃折射率分布变为如图5所示的近似渐变折射率,(4)式中 $\sqrt{n_0^2 - n_a^2}$ 的值减小,将导致波长间距值的相应减小.此外,由于椭圆氧化孔径为8 μm的VCSEL的截止频率为7.5856,多横模的截止模式可以达到LP<sub>51</sub>,因此,通过合理设计注入电流分布,并减小热效应影响,可以获得更高阶多横模式激射,从而实现稳定多光频输出光谱.

利用Zeiss高倍显微镜在放大1500倍下观察到VCSEL分别在2, 3, 4, 5 mA电流下的多横模近场分布,如图9所示.可以看到激光器在2 mA注入电流时已经达到高阶横模的阈值电流,并形成多横模激射.随着注入电流的增加,模式分布区域继续增大,且多个横模模式的峰值强度、形状随之产生变化,进一步说明激光器多横模输出不是以单一高阶模式的形式工作,而是多个横模叠加在一起.同时,受氧化孔径限制,载流子注入时同样成椭圆形分布注入,并且随着电流增加,产生空间烧孔效应,导致高阶模在模式竞争中占据主导地位,多横模按照载流子注入的椭圆分布进行激射.从图9中还可看出,随载流子注入的增加,激光器温度升高,且呈非均匀分布,从而使VCSEL内部有效折射率形成中间高、四周低的渐变分布<sup>[14]</sup>,这就使得高阶模式在模式竞争中取得优势,更利于高阶模的激射;其次,工艺过程也会对模式分布产生一定影响,例如,出光孔表面不平整、金属电极表面接触不均匀等都会导致注入电流和有效折射率变化,从而影响模式分布均匀分布.

### 5 结 论

本文针对氧化限制型VCSEL氧化孔径的各向异性,建立了椭圆形波导有效折射率模型,利用Rsoft软件对横向模式的分布以及折射率分布进行模拟,得到了椭圆形氧化孔径的近场模式的二维平面分布.研究表明,椭圆折射率的不对称分布产生波长分裂现象,直接导致相邻模式间波长变为非等间距分布,模式波长的分裂可达到0.037 nm,且随氧化孔径的减小,上述影响会进一步增强.同时,本文制备出椭圆形氧化孔径VCSEL激光器,并测量得到高阶多横模光谱输出,波长范围从850.72 nm蓝移至850.32 nm,进一步测得多横模近场分布,该实验测试结果与理论分析结果一致.

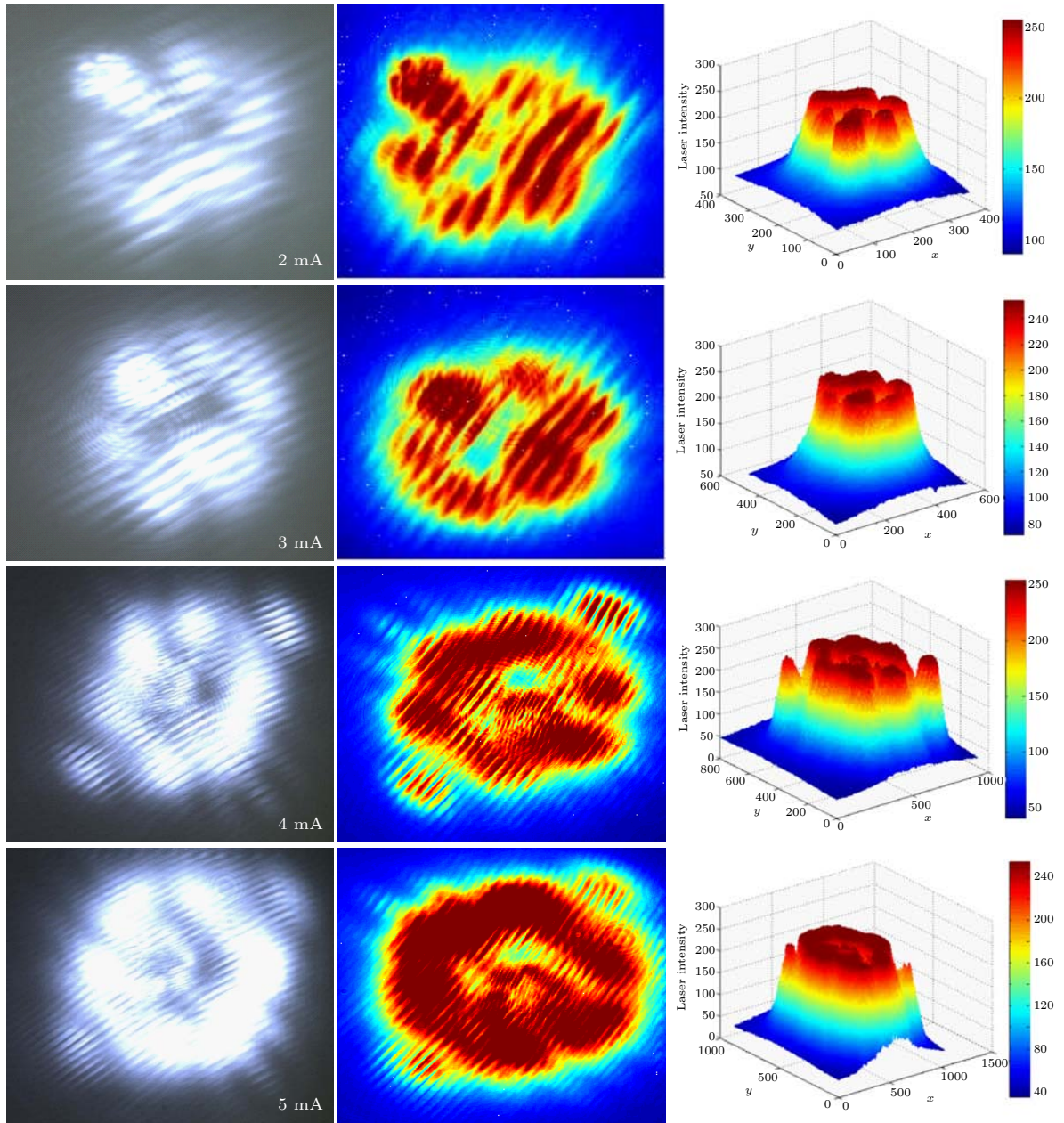


图9 (网刊彩色)  $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 6 \mu\text{m}$  椭圆形孔径 VCSEL 的近场分布

Fig. 9. (color online) Near-field emission patterns of  $a = 8 \mu\text{m}$  and  $b = 6 \mu\text{m}$  elliptical oxide aperture VCSEL.

参考文献

[1] Gordon R, Heberle A P, Cleaver J R A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4523

[2] Gadallah A S, Michalzik R 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1040

[3] Li S, Guan B L, Shi G Z, Guo X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184208 (in Chinese) [李硕, 关宝璐, 史国柱, 郭霞 2012 物理学报 **61** 184208]

[4] Zhang B, Heberle A P 2007 *Proc. of OSA* **285** 4117

[5] Song D S, Kim S H, Park H G, Kim C K, Lee Y H 2002 *J. Appl. Phys.* **80** 3901

[6] Liu F, Xu C, Zhao Z B, Zhou K, Xie Y Y, Mao M M, Wei S M, Cao T, Shen G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054203 (in Chinese) [刘发, 徐晨, 赵振波, 周康, 解意洋, 毛明明, 魏思民, 曹田, 沈光地 2012 物理学报 **61** 054203]

[7] Li M S, Zhang B T, Chen K P, Snoko D W, Heberle A P 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 8

[8] Zhang J, Yu J L, Cheng S Y, Lai Y F, Chen Y H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 027304

[9] 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]

[10] Shi G Z, Guan B L, Li S, Wang Q, Shen G D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 1

[11] Cheng P, Gao J H, Kang X J, Lin S M, Zhang G B, Liu S A, Hu G X 2000 *Chin. J. Semicond.* **21** 0253



- [12] Debernardi P, Bava G P, Degen C, Fischer I, Elsässer W, Member S 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1  
[13] Yariv A, Yeh P 1984 *Optical Waves in Crystals* (New

- York: Wiley) pp22–53  
[14] Brunner M, Gulden K, Hövel R, Moser M, Ilegems M 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 7

# Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser\*

Guan Bao-Lu<sup>†</sup> Liu Xin Jiang Xiao-Wei Liu Chu Xu Chen

(Laboratory of Opto-electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

( Received 9 February 2015; revised manuscript received 12 March 2015 )

## Abstract

We study the multi-transverse mode distributions and the wavelength splittings with different designed oxide apertures of the oxide-confined VCSEL. By developing the effective index model and BPM algorithm theory, the characteristics of transverse optical field distribution are calculated with circular aperture and ellipsoid aperture, which are compared with our experimental results of multi-wavelength spectra of high-order transverse modes. The results show that the orthogonality of the different crystal orientation modes will be broken by the oxidation-induced ellipsoid aperture, and the maximum wavelength splitting of the degenerated high-order mode is 0.037 nm, which can be reduced as the diameter of aperture increases. The results in this paper will provide a useful reference for multi-transverse mode locking of oxide-confined VCSELs.

**Keywords:** vertical cavity surface emitting lasers, oxide apertures, transverse mode, wavelength split

**PACS:** 42.55.Px, 42.79.Ag, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.64.164203

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908012), the Foundation of Beijing Municipal Education Commission, China (Grant No. KM201010005030), and the Importation and Development of High-Caliber Talents Project of Beijing Municipal Institutions, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [gbl@bjut.edu.cn](mailto:gbl@bjut.edu.cn)