

文章编号: 1001-3806(2016)04-0610-05

## 外腔面发射激光器自发辐射谱的热特性

詹小红<sup>1,2,3</sup>, 朱仁江<sup>1,2,3</sup>, 蒋茂华<sup>1,2,3</sup>, 胡平<sup>4</sup>, 崔玉亭<sup>1,2,3</sup>, 张鹏<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 400047; 2. 重庆师范大学 重庆市高校光电材料与工程重点实验室, 重庆 400047; 3. 重庆师范大学 重庆市光电功能材料重点实验室, 重庆 400047; 4. 四川机电职业技术学院 材料工程系, 攀枝花 617000)

**摘要:** 热效应是限制外腔面发射激光器(VECSEL)输出功率和光束质量的主要原因。为了优化 VECSEL 增益芯片有源区量子阱的设计,降低激光器的热效应,提高斜效率和输出功率,采用光致荧光谱方法,对设计波长 980nm VECSEL 自发辐射谱的热特性进行了实验研究。取得了不同热沉温度下边发射和面发射谱随温度的变化数据。结果表明,反映有源区量子阱自身特性的边发射谱峰值波长随温度升高的红移速率是 0.5nm/K,而受到增益芯片多层结构调制的面发射谱峰值波长随温度升高的红移速率只有 0.1nm/K;由于受到 VECSEL 增益芯片中微腔的限制,面发射谱分离为多个模式,分别与微腔的腔模对应。可见对量子阱的发射波长及微腔腔长做预偏置优化处理,可以显著改善激光器的输出性能。

**关键词:** 激光器;外腔面发射激光器;光致荧光谱;热特性

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.032

## Thermal characteristics of spontaneous emission spectra from external-cavity surface-emitting lasers

ZHAN Xiaohong<sup>1,2,3</sup>, ZHU Renjiang<sup>1,2,3</sup>, JIANG Maohua<sup>1,2,3</sup>, HU Ping<sup>4</sup>, CUI Yuting<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. High Education Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Engineering Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 3. Key Laboratory of Optoelectronic Functional Materials Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 4. Department of Materials Engineering, Sichuan Electromechanical Institute of Vocation and Technology, Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** Thermal effect is the main reason limiting output power and beam quality of vertical-external-cavity surface-emitting lasers (VECSELs). To optimize the quantum design in active regions of gain chip, decrease thermal effect and upgrade slope efficiencies and output laser power, thermal characteristics of a VECSEL at 980nm wavelength were investigated experimentally by means of photoluminescence. The edge-emitting and surface-emitting spectra at different heatsink temperatures were obtained. The results indicate that the redshift rate of the edge-emitting spectra, which reveals the intrinsic properties of quantum wells in active region, is 0.5nm/K with increasing temperature, while the redshift rate of the surface-emitting spectra, which are modulated by multiple-layer structure of the gain chip, is only 0.1nm/K with increasing temperature. The experiments also show that the surface-emitting spectra are split into several modes because of the restriction from the micro-cavities in gain chips of VECSELs. In the design of VECSEL gain chip, according to the above thermal characteristics of VECSELs, performance of a laser could be improved significantly by prebiasing emission wavelengths of quantum wells and cavity lengths of micro-cavities.

**Key words:** lasers; external-cavity surface-emitting laser; photoluminescence spectrum; thermal characteristic

## 引言

因为结合了二极管抽运固体激光器和垂直腔面发射激光器的优点,光抽运垂直外腔面发射激光器(optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting laser, OP-VECSEL)在输出高功率同时,可以确保高光束质量,即输出近衍射极限的基横模圆形高斯光束<sup>[1-3]</sup>,

基金项目:重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJJ130630)

作者简介:詹小红(1991-),女,硕士研究生,现主要从事激光单元器件及应用的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn

收稿日期:2015-06-09;收到修改稿日期:2015-09-07

在光通信、生物分析和激光雷达等方面具有广泛的应用。

自 1997 年获得 VECSEL 室温下高功率连续运转 (波长 1004nm, 输出功率 0.52W)<sup>[4-5]</sup> 以来, VECSEL 在波长扩展及功率提升方面都取得了长足的进步。2008 年, 通过优化设计增益芯片结构及芯片基质去除技术, 瑞士 RUDIN 等人获得 980nm 发射波长的 VECSEL, TEM<sub>00</sub> 的激光输出功率达 20W, 光束质量 M<sup>2</sup> 因子为 1.1<sup>[6]</sup>。2014 年, 瑞士 SIRBU 等人报道了 1300nm 波段 VECSEL, 输出功率 7.1W, 光束质量 M<sup>2</sup> 因子为 1.25<sup>[7]</sup>。2012 年报道的 VECSEL 最高输出功率已达 106W, 激光波长 1028nm<sup>[8]</sup>。

提高室温下 VECSEL 的输出功率是增强 VECSEL 实际运用的关键。影响 VECSEL 高功率输出性能的主要因素是激光器的热效应, 因为 VECSEL 增益芯片有源区的温度会随着抽运功率的增大而升高, 直接导致量子阱增益下降, 激光器的输出功率随之减小, 直至最终出现热熄灭。VECSEL 出现热熄灭的根本原因是高温下半导体增益芯片的自发辐射谱随温度红移, 导致有源区的谐振周期增益结构 (resonant periodic gain, RPG)<sup>[9-10]</sup> 失谐, 激光器模式增益下降。作者通过对 VECSEL 自发辐射谱中的边发射谱和面发射谱分别进行研究, 确定其随温度变化的热特性, 为 VECSEL 增益芯片设计提供热性能方面的基础参考, 以进一步优化增益芯片的量子设计, 实验中获得更高的激光功率输出。

### 1 实验装置

增益芯片通过金属有机气相化学沉积的方法在 GaAs 衬底上逐层生长分布喇格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、多量子阱 (multiple quantum wells, MQWs)、窗口层、帽层和腐蚀阻挡层, 其外延结构如图 1 所示, 设计 VECSEL 激光波长为 980nm。芯片顶端的 DBR 由 25 对光学厚度为 λ/4 的 AlAs/GaAs 交替生长而成, 对激光具有 99.9% 以上的高反射率, 构成激光器的一个端镜。有源区采用 8nm 的 In<sub>0.185</sub>GaAs/GaAs 量子阱, 将每个量子阱放置在激光驻波场的波峰处<sup>[11]</sup>, 形成 RPG 结构, 提高量子阱增益。由线性插值可得 In<sub>0.185</sub>GaAs 的晶格常数为 0.5706nm, 而 GaAs 基质的晶格常数为 0.56533nm, 实际外延生长中量子阱材料与 GaAs 基质的晶格失配度为 0.923%, 会产生一定程度的压应变。但由于只生长 6 对量子阱, 量子阱的总厚度小于临界厚度, 阱材料所积累的应变较小, 界面上的应力不会产生界面失配位错<sup>[12]</sup>, 因此增益芯片的结构设计中没有考虑增加应变补偿层, 而是只生长

GaAs		20nm	covering layer
AlAs		82nm	DBR
GaAs		69nm	
AlAs		82nm	
GaAs		69nm	
GaAs		4nm	adjust
GaAs		130nm	MQW
In <sub>0.185</sub> GaAs		8nm	
GaAs		130nm	
In <sub>0.185</sub> GaAs		8nm	
GaAs		65nm	adjust
Al <sub>0.6</sub> GaAs		207nm	window layer
GaAs		20nm	capping layer
Al <sub>0.85</sub> GaAs		200nm	stop layer
GaAs		100nm	buffer
GaAs		630μm	substrate

Fig. 1 Epitaxial structures of gain chips in VECSELs

几纳米厚的 GaAs 层来调节 RPG 结构。窗口层采用 207nm 的 Al<sub>0.6</sub>GaAs 材料, 能提供高的势垒, 抑制有源区光生载流子扩散至芯片表面, 产生非辐射复合<sup>[13]</sup>。由于高铝组分的 AlGaAs 材料在空气中极易氧化, 使得芯片表面质量变差, 增加对激光的损耗, 阻挡入射的抽运光进入有源区<sup>[14]</sup>, 为解决这一问题, 在窗口层之上, 设计生长 20nm 的 GaAs 材料帽层, 以防止窗口层氧化。因为需要用化学腐蚀方法去除基质, 设计中采用 Al<sub>0.85</sub>GaAs 材料作为腐蚀阻挡层。柠檬酸-双氧水系溶液 Al<sub>0.85</sub>GaAs 的腐蚀选择比较高, 可以获得理想的腐蚀表面。100nm 缓冲层的设置是增进外延生长质量的需要<sup>[15]</sup>。

VECSEL 自发辐射谱测量示意图如图 2 所示。实验测量不同热沉温度下增益芯片边发射谱时, 将芯片通过导热硅脂固定在铜热沉上, 采用 808nm 的半导体激光器作为抽运光源, 以 45°角斜入射照射至芯片 DBR 面上, 光谱仪光纤探头的放置与芯片侧边垂直。通过温控器控制铜热沉温度, 收集得到不同温度下

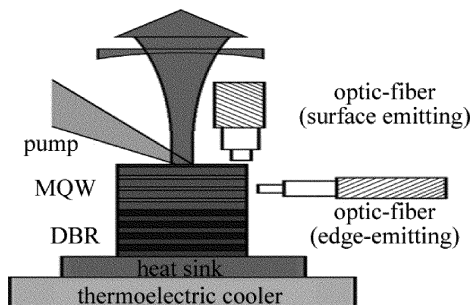


Fig. 2 Schematics of VECSELs and measurement of spontaneous emission spectra

VECSEL 增益芯片的边发射谱。测量面发射谱前,先将增益芯片用银胶粘接至 SiC 片上,加热至 150°使胶固化,缓慢降温。将固化后的芯片进行基质减薄,采用酸性腐蚀的方法<sup>[16]</sup>去除基质及阻挡层,得到良好的腐蚀平面。测量面自发辐射谱时,将光谱仪光纤探头垂直于芯片表面放置。

## 2 结果与讨论

### 2.1 边发射谱特性

在垂直于增益芯片外延生长的方向,也就是平行于量子阱平面的方向,由于平面波导的导引作用,量子阱的部分自发辐射谱会从增益芯片的侧边发射出来,在此位置测得的即 VECSEL 的边发射谱,它反映量子阱本身发光特性,是判断增益芯片生长与设计是否一致的重要方法。图 3 是 VECSEL 增益芯片在不同热沉温度下的边发射谱测量值。25℃时,其发射谱峰值波长为 972nm,与设计波长 980nm 相比较,量子阱自发辐射峰值波长向短波长方向漂移了 8nm,可能原因是 VECSEL 增益芯片在外延生长过程中,量子阱层参量发生漂移。

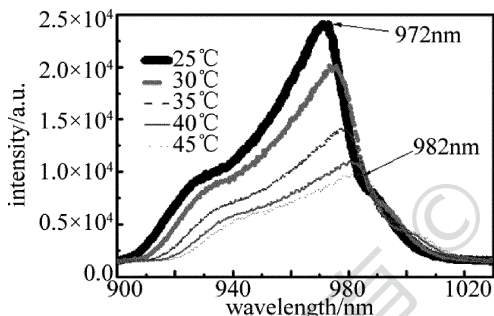


Fig. 3 Edge-emitting spectra of VECSELs at different heatsink temperatures

由图 3 可知,抽运功率相同时,随着热沉温度的升高,边发射谱峰值波长红移,且峰值强度迅速减小。当热沉温度为 45℃时,边发射谱峰值波长 982nm,与 25℃情况相比,红移了 10nm,峰值强度则下降到约为 25℃的 1/4。

图 3 中,随着热沉温度的增加,与之相接触的有源区温度也随之升高,使得增益材料折射率发生改变,导致微腔谐振波长漂移;并且温度的升高半导体材料的禁带宽度减小,使得量子阱发射波长漂移。由此引发量子阱周期增益结构失调,量子阱增益降低,激光波长强度减小。

图 4 是不同热沉温度时 VECSEL 增益芯片边发射谱的峰值波长。通过线性拟合,可以得到边发射谱峰值波长随温度的红移速率为 0.5nm/K。GaAs 基半导体材料发射波长随温度升高的红移速率典型值为 0.3nm/K,两者存在差别的原因在于实验中测量的是

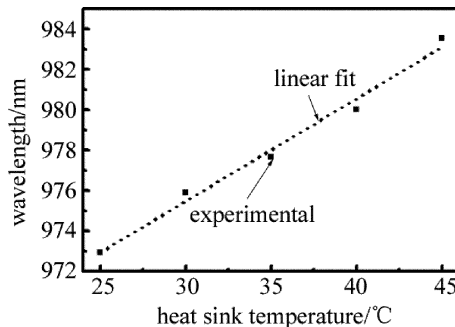


Fig. 4 Peak wavelength of edge-emitting spectra versus temperatures  
热沉温度,而增益芯片内量子阱的真实温度显然高于所测量的热沉温度。

0.5nm/K 的红移速率  $v$  具有较强的实用意义,知道此速率后,如果实际情况下需要 VECSEL 在  $T$  温度下工作,且发射波长为  $\lambda$ ,则在芯片设计中,室温(25℃)下量子阱的发射波长应该为  $[\lambda - v(T - 25)]$ ,即对量子阱的发射波长做  $-v(T - 25)$  的预偏置处理。如此,当激光器工作在  $T$  温度时,VECSEL 发射波长刚好红移至  $\lambda$ ,自发辐射谱最强,激光器增益最大,则 VECSEL 输出功率方可达到最高。

0.5nm/K 的红移速率是对 GaAs 基量子阱和铜热沉得到的,而 GaAs 基量子阱是 1 $\mu$ m 波段 VECSEL 所广泛采用的量子阱,铜热沉也是 VECSEL 中使用的标准热沉,所以此数据对不同结构 VECSEL 也具有指导意义。

### 2.2 面发射谱特性

除了经面内波导出射的边发射谱外,VECSEL 增益芯片中量子阱的自发辐射谱的另一部分会穿过芯片中的多层结构,从外延生长方向,即与量子阱平面垂直的方向发射出来,称为面发射谱。用光谱分析仪测得基质去除后增益芯片的面发射谱,以及用 U-4100 分光光度计测得 VECSEL 增益芯片中 DBR 的反射谱,如图 5 所示。由图可知,VECSEL 增益芯片中 DBR 能够提供高反射率的波长范围为 940nm ~ 1010nm,带宽约为 70nm。反射谱中心波长为 975nm,与设计反射谱中心波长 980nm 基本符合,表明增益芯片在外延生长过程中,DBR 各层参量控制较好。

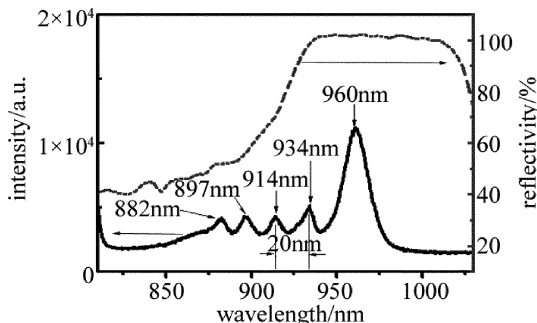


Fig. 5 Surface-emitting spectrum and reflective spectrum of gain chip

图 5 表明,面发射谱有 5 个峰值波长,在反射带宽内,强度最大的峰值波长为 960nm,与设计的激光波长 980nm 相比蓝移约 20nm。面发射谱其它 4 个明显峰值波长分别为 882nm,897nm,914nm 和 934nm,两个峰值波长之间间隔分别为 15nm,17nm,20nm 和 26nm。在面发射谱的传播方向上,增益芯片中存在两个反射面:芯片底部的 DBR 和芯片前端半导体-空气界面。上述两个反射界面构成一个微腔,而面发射谱在其中传播,所以实验中测得的面发射谱实际上是量子阱的自发辐射谱受到微腔腔模调制的结果。以 914nm 峰值与 934nm 峰值为例,其间波长间隔 20nm。计算得到此处微腔腔模的模间间距是 21nm,两者吻合较好。在计算时,微腔腔长取其有效长度<sup>[17]</sup>  $L'$ :

$$L' = L + \frac{1}{|\kappa|} \quad (1)$$

式中, $L$  是微腔实际腔长, $\frac{1}{|\kappa|}$  表示辐射进入 DBR 的穿透距离  $\kappa$  为耦合常数,可以写为<sup>[17]</sup>:

$$\kappa = i \frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}{4 n k_0} \frac{1 - \cos(l\pi)}{l\pi} (n_2^2 - n_1^2) \quad (2)$$

式中, $k_0, \omega, c$  分别是真空中波数、角频率和光速, $\mu_0$  和  $\epsilon_0$  是真空磁导率和真空介电常数, $n_1$  和  $n_2$  分别表示 GaAs 和 AlAs 材料的折射率, $\bar{n}$  是 DBR 的平均折射率, $\bar{n} = \sqrt{n_1^2 + n_2^2} / \sqrt{2}$ ,  $l$  表示项数。当  $l=1$  时可得:

$$\kappa = i \frac{\sqrt{2} (n_2^2 - n_1^2)}{\lambda \sqrt{n_1^2 + n_2^2}} \quad (3)$$

式中, $\lambda$  表示激光波长。

图 6 是 VECSEL 增益芯片在不同热沉温度条件下的面发射谱。与边发射谱类似,随着热沉温度升高,面发射谱峰值波长红移,且峰值强度迅速减弱。由图 6 可得,面发射谱峰值波长的红移速率为 0.1nm/K。面发射谱红移速率与边发射谱红移速率不同,是因为边发射谱的红移是由于半导体材料带隙能随温度上升而减小所致,红移速率取决于材料;而面发射谱中各峰值是因为 VECSEL 增益芯片中微腔腔模的调制形成

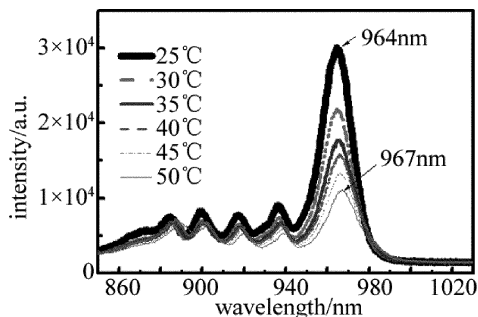


Fig. 6 Surface-emitting spectrum of gain chip at different heatsink temperatures

的,其红移速率取决于微腔长度的改变。本文中所得 0.1nm/K 的面发射谱红移速率实验值与参考文献[1]中报道的理论估算值一致,进一步说明了实验结果的正确性。

需要指出的是,对边发射谱的研究结果可以用于 VECSEL 增益芯片中量子阱的设计,但最终决定 VECSEL 激光器输出模式的是面发射谱,所以通过对面发射谱的研究可以优化 VECSEL 增益芯片中微腔的设计,使面发射谱的最强峰值与 VECSEL 设计波长吻合。具体方法为:根据设计激光波长和微腔长度,计算出 VECSEL 微腔腔模;再结合面发射谱 0.1nm/K 的红移速率,使 VECSEL 在设计工作温度下微腔腔模、量子阱自发辐射谱及 DBR 反射谱三者中心最大限度地重合,此时 VECSEL 材料增益最大、模式增益也最大、量子效率最高、热效应最低,理论上即可获得高功率输出。

### 3 结论

研究了 980nm 波长 VECSEL 增益芯片自发辐射谱的热特性。对反映增益芯片中量子阱自身发光特性的边发射谱,其峰值波长随热沉温度升高的红移速率是 0.5nm/K,该速率取决于激光器的散热条件及量子阱材料。而受到增益芯片中微腔调制的面发射谱峰值波长随热沉温度升高的红移速率只有 0.1nm/K,该速率取决于半导体微腔腔长的变化。上述两种自发辐射谱的热特性中,对边发射谱热特性的研究结果可用于增益芯片中量子阱的设计,对面发射谱热特性的研究结果则可用于对增益芯片中微腔的优化设计,从理论上获得材料增益大、模式增益高、热效应低的高功率 VECSEL 激光输出。

### 参 考 文 献

- [1] KELLER U, TROPPER A C. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Physics Reports*, 2006, 429(2):67-120.
- [2] TROPPER A C, HOOGLANG S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2006, 30(1):1-43.
- [3] LI F, FALLAHI M, MURRAY J T, *et al.* Tunable high-power high-brightness linearly polarized vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(2):021105.
- [4] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* High power (> 0.5W CW) diode pumped vertical-external-cavity surface emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(8):1063-1065.
- [5] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* Design and characteristics of high-power (>0.5W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3):561-573.
- [6] RUDIN B, RUTZ A, HOFFMANN M, *et al.* Highly efficient optical-pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20W

- average output power in a fundamental transverse mode [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2719-2721.
- [7] SIRBU A, RANTAMAKI A, SAARINEN E J, *et al.* High performance wafer-fused semiconductor disk lasers emitting in the 1300nm waveband [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29398-29403.
- [8] HEINEN B, WANG T L, SPARENBERG M, *et al.* 106W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(9): 516-517.
- [9] WU Y, NI Y H, DAI T L, *et al.* Substrate-etched high power external-cavity surface-emitting lasers [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 200-203 (in Chinese).
- [10] ALFORD W J, FETZER G J, EPSTEIN R J, *et al.* Optically pumped semiconductor lasers for precision spectroscopic applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(8): 719-727.
- [11] LEINONEN T, RANTA S, TAVAST M, *et al.* High power (23W) vertical external cavity surface emitting laser emitting at 1180nm [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8606: 867-869.
- [12] YAN Ch L, QIN L, NING Y Q, *et al.* Calculation of energy band structure of GaInAs/GaAs quantum well [J]. *Laser Journal*, 2004, 25(5): 29-31 (in Chinese).
- [13] ZHANG P, SONG Y R, ZHANG X P, *et al.* High power vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(4): 401-403.
- [14] WANG F. Design theory preparation technology and experiment of optically pumped VECSELS [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 1-108 (in Chinese).
- [15] BEDFORD R G, KOLESIK M, CHILLA J L A, *et al.* Power-limiting mechanisms in VECSELS [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 5814: 1-10.
- [16] FANG Q P, ZHAN X H, LIANG Y P, *et al.* Acid etching of GaAs substrate of external-cavity surface-emitting laser [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 675-678 (in Chinese).
- [17] YARIV A, YEH P. *Photonics optical electronics in modern communications* [M]. 6th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 1-795 (in Chinese).