

## 808nm 大孔径垂直腔面发射激光器研究\*

郝永芹<sup>†</sup> 冯源 王菲 晏长岭 赵英杰 王晓华 王玉霞 姜会林 高欣 薄报学

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2010年6月28日收到; 2010年8月5日收到修改稿)

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 中的载流子聚集效应使注入到有源区的工作电流只是通过边缘环形区域很窄的通道, 激光功率密度分布不均匀; 尤其当器件尺寸较大时, 激光光斑呈现环状, 环中间光强很弱. 这是研制电抽运高功率大尺寸 VCSEL 尤为突出的技术难题. 采用新型结构成功研制出 808 nm 波段高功率大孔径 VCSEL, 在注入电流为 1 A 时, 室温下连续输出功率达 0.3 W.

**关键词:** 半导体激光器, 垂直腔面发射激光器, 高功率, 大孔径

**PACS:** 42.55.px, 78.67.De, 85.60.-q

## 1. 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是一种新型的半导体激光器, 其阈值电流低、动态单纵模工作、易于高密度集成<sup>[1]</sup>, 且波长稳定性好、发射圆对称光束、发散角小. 典型的器件结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示. 结构中的主要部分是分布布拉格反射镜 (DBR) 以及中间的多量子阱 (MQW) 有源层, 当电流经焊盘由环形电极注入时, 器件表面发射圆形对称的光束. 因其圆形对称光束及可大面积二维集成等优势在许多领域 (如印刷、光通信和数据存储) 成为一种诱人的光源. 其功率瓶颈问题被攻克后<sup>[3,4]</sup>, 尤其近几年, VCSEL 发展迅猛, 在光通信、抽运等方面的应用日益广泛, 其特性也备受关注<sup>[5,6]</sup>. 目前, 国内外已经掀起研究和制造高质量、高功率 VCSEL 的新一轮热潮<sup>[7-11]</sup>.

808 nm 波段 VCSEL 的研究起步较晚. 目前国际上均采用高密度阵列结构实现 808 nm 波段 VCSEL 的高功率输出, 但在其单管高功率器件研究方面尚未取得重要进展. 现在世界上只有少数几家科研单位、公司开展了这方面的研究. 2004 年, 德国的 U-L-M photonics 公司报道了连续输出达到 1 W 的 808 nm 波段  $14 \times 14$  VCSEL 阵列. 2009 年, 美国 Princeton Optonics 公司采用衬底移除技术集成了

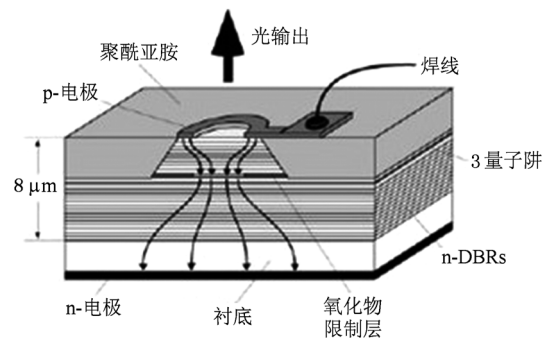


图 1 典型 VCSEL 结构示意图

约  $10^4$  个单元组成的大面积 808 nm 波段 VCSEL 阵列, 输出功率达 120 W<sup>[12]</sup>. 国内尚未见其他研究单位在 808 nm 波段 VCSEL 方面的研究报道.

根据 VCSEL 的结构特点, 提高单管器件的输出功率就要增大其出光孔径. 国外最先报道了出光孔径为 320  $\mu\text{m}$  的 980 nm 底发射 VCSEL 在室温下连续工作输出功率可以达到 890 mW<sup>[4]</sup>. 国内也报道了孔径为 500  $\mu\text{m}$  的 980 nm 底发射 VCSEL 在室温下连续波输出功率达 1.95 W<sup>[7]</sup>. 底发射结构可有效地帮助器件散热, 同时还可以弱化由载流子聚集效应导致的空间烧孔现象, 改善器件的光束质量<sup>[3]</sup>. 但这种在高功率 980 nm 波段 VCSEL 中得到成功验证的大孔径 (100  $\mu\text{m}$  以上) 底发射的器件结构对于 808 nm 波段的 VCSEL 并不适合<sup>[12]</sup>, 因为 GaAs 衬底

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61076039) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0122) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hyq720812@yahoo.com.cn

在该波段存在较严重的光吸收. 目前, 尚未见有关该波段大孔径 VCSEL 研究方面的报道.

本文研究了一种新型结构大孔径 VCSEL 的结构及光电特性. 测试结果表明, 器件实现了室温下连续激射, 波长为 803 nm, 输出功率达 0.3 W.

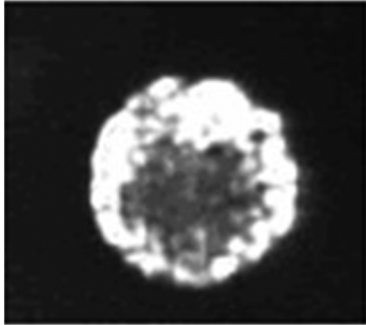


图2 出光孔径为 50 μm 的 VCSEL 近场照片

## 2. 器件结构与制作

对于小孔径 VCSEL (通常  $\Phi < 25 \mu\text{m}$ ), 分析 VCSEL 中电流分布时, 通常假设限制区以下区域电流密度分布是均匀的. 这样的假设可以近似描述器件特性, 但对于大孔径的 VCSEL 不再适用. 载流子传输的泊松方程<sup>[13]</sup>为

$$\nabla \cdot K \nabla \Psi = S, \quad (1)$$

其中  $K$  为电导率,  $\Psi$  为电势,  $S = 0$ . 根据 VCSEL 的实际结构, 选用柱坐标, 解方程 (1) 可以得出电流密度的径向分布

$$J(r, z) = -\frac{1}{\rho_a} \nabla V(r, z), \quad (2)$$

其中  $\rho_a$  是有源区的电阻率. 假定电极电压为  $V_0$ , 则泊松方程的边界条件为

$$\begin{aligned} V &= V_0 \quad (z = 0, r \geq w), \\ \frac{\partial V}{\partial z} &= 0 \quad (z = 0, r \leq w), \\ \frac{\partial V}{\partial r} &= 0 \quad (r = 0), \\ \sigma_i \frac{\partial V}{\partial z} &= \sigma_j \frac{\partial V}{\partial r}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $w$  为 VCSEL 的窗口半径,  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$  为连接处各层的电导. 载流子速率方程为

$$\begin{aligned} D \nabla_i^2 N(r) &= -\frac{J(r)}{ed} + \frac{N(r)}{\tau} + BN^2(r) \\ &+ \nu_g(r)S(r), \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $D$  为载流子扩散系数,  $N(r)$  为载流子密度,  $\tau$  为载流子寿命,  $B$  为自发辐射复合系数,  $\nu_g$  为群速,  $S(r)$  为光子密度,  $e$  为电荷量,  $d$  为量子阱厚度. 由 (4) 式可知, 注入到有源区中心 ( $r = 0$ ) 的电流不明显, 而是随径向离轴增加. 这样的增加在接近有源区的周界时变得最为显著, 因此注入到有源区的工作电流只是通过边缘环形区域很窄的通道. 只要有电流的注入, 有源区内的载流子分布就不可能均匀, 而且随出光孔径的增大, 这种不均匀性将加剧. 加之热聚焦效应的影响, 使 VCSEL 的光场从中心位置移向有源区的边缘. 图 2 为出光孔径为 50 μm 的 VCSEL 近场照片<sup>[14]</sup>.

为此, 提出了一种新型结构器件<sup>[15]</sup>, 图 3(b) 为设计的新型 VCSEL 的结构示意图. 在新结构的设计中, 通过把传统结构中的单环形电极 (图 3(a)) 分解成由多个同心环组成的电极结构, 使出光孔形成若干独立的多发光区, 从而有效抑制载流子的聚集效应. 这样的设计使发光区在结构形式上自适应载流子的聚集效应, 而且使传统结构中几乎不发光的中央区域得到利用, 增大器件的有效发光面积.

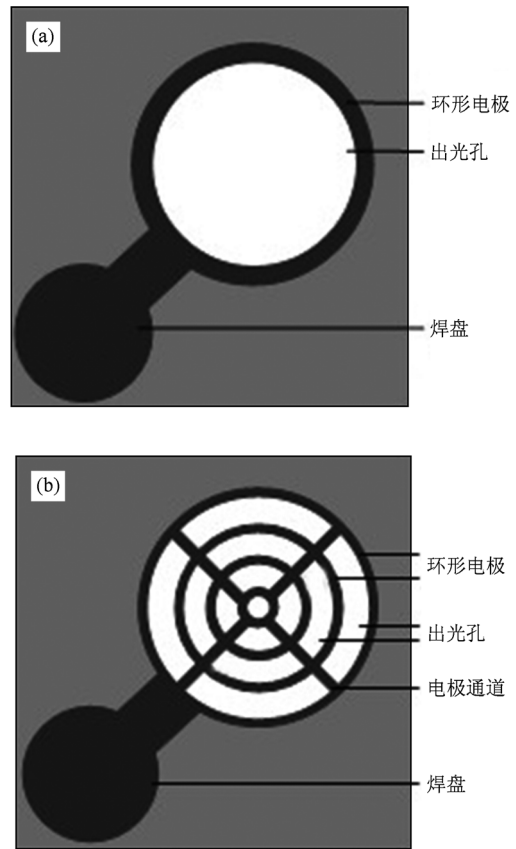


图3 VCSEL 结构示意图 (a) 传统结构, (b) 新型结构

采用分子束外延技术生长 VCSEL 外延片,其结构主要包括  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$  组成的多量子阱有源区、22 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  组成的 p 型掺杂的上 DBR 以及由 41 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  组成的 n 型掺杂的下 DBR. 在 p-DBR 中插入一层 30 nm 的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层,作为待氧化层,该层氧化后可实现对器件的光电限制. 采用光刻及刻蚀技术制作待氧化窗口,样品置于  $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$  气氛下进行氧化,氧化温度为 420 °C,氧化时间为 20 min. 然后镀钝化层,进行第二次及第三次光刻. 接着进行蒸镀电极及合金,在片测试,解理,封装.

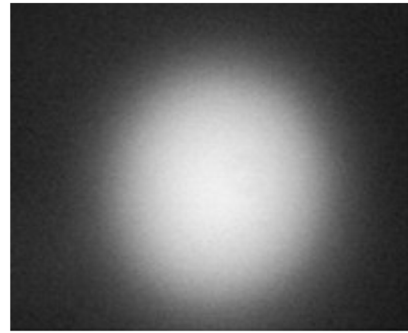


图 6 新型结构 VCSEL 发光的远场照片

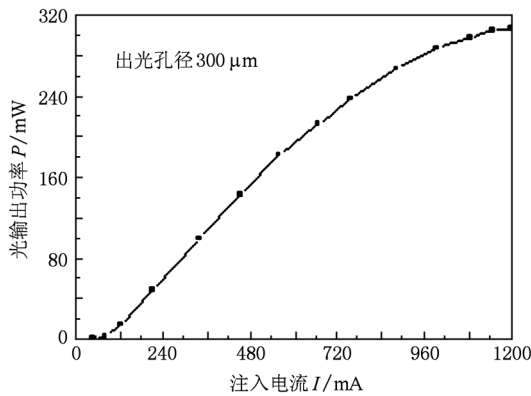


图 4 新型结构 VCSEL 的 P-I 特性曲线

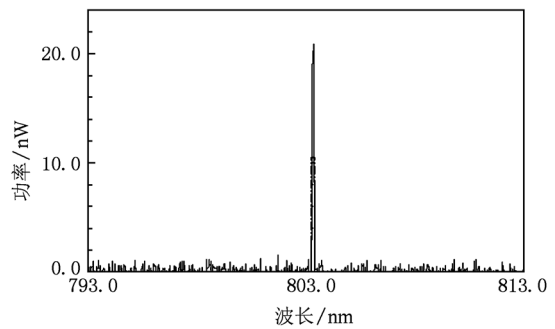


图 7 新型结构 VCSEL 激光光谱

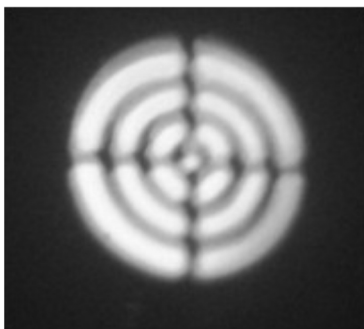


图 5 新型结构 VCSEL 发光的近场照片

### 3. 特性测试与分析

图 4 为出光孔径为 300 μm 的器件室温连续工作状态下输出光功率 P 与注入电流 I 的关系曲线 (P-I 特性曲线). 器件阈值电流为 85 mA, 当注入电流为 1 A 时, 输出功率达到 0.3 W, 实现了较高的光功率输出. 传统的单环形电极结构中, 当出光孔径很大时 (大于 100 μm), 严重的载流子聚集效应使

注入到有源区的工作电流只是通过边缘环形区域很窄的通道, 随之而来的空间烧孔现象则需要更大电流的注入. 而且, 因热聚焦效应, 温度分布在同样的区域内有最大值, 这必然会影响到光场. 所以, 与热聚焦相关的折射率导引以及增益分布 (与载流子浓度分布成正比) 相关的增益导引这两种波导机理使 VCSEL 的光场从中心位置移向有源区的边缘, 引起有源区周围损耗区的光吸收增加和激光阈值增加, 造成器件的输出功率随孔径的增大而降低, 甚至使器件无法激光. 而新型结构使注入的工作电流呈现较均匀分布, 弱化了有源区内的载流子聚集效应, 改善了有源区内的增益分布, 从而实现器件在较大注入时的高功率光输出.

图 5 和图 6 为观察到的器件近场和远场的发光情况. 由此可见, 器件发光均匀, 克服了传统结构器件的激光光斑呈现环状及环中间光强很弱的缺陷, 弱化了载流子的聚集效应, 改善了大出光孔 VCSEL 能量分布的均匀性, 同时增大了器件有效发光面积. 图 7 为新结构 VCSEL 的激光光谱. 从图 7 可以看出, 峰值波长为 803.3 nm, 光谱半峰宽为 0.16 nm, 故器件表现了较好的激光特性.

## 4. 结 论

设计并制作了新型结构 VCSEL, 解决了 808 nm 电抽运大出光孔 VCSEL 的制作难题. 实现了 808 nm 波段大孔径器件在室温下的连续运转, 当注入电流为 1 A 时, 输出功率达 0.3 W. 同时, 器件具有较好的发射光谱及近远场激射特性. 研究表明, 新型

结构既改善了大出光孔 VCSEL 激射光场能量分布的均匀性, 同时使器件实现了较高功率输出. 780—810 nm 波段接近瓦级 VCSEL 的研制成功, 将更加显示其作为新型半导体激光源在自由空间光通信 (FSO) 领域的独特优势, 不仅满足了 FSO 对高功率半导体激光源的需求, 而且使光束收集到成像系统或聚焦成衍射极限光斑都更为容易和有效.

- [1] Chen M, Guo X, Guan B L, Deng J, Dong L M, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5842 (in Chinese) [陈敏、郭霞、关宝璐、邓军、董立闽、沈光地 2006 物理学报 **55** 5842]
- [2] Affolderbach C, Nagel A, Knappe S, Jung C, Wiedenmann D, Wynands R 2000 *Appl. Phys. B* **70** 407
- [3] Grabherr M, Miller M, Jager R 1998 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **34** 1227
- [4] Miller M, Grabherr M, King R, Jager R, Michalzik R, Ebeling K J 2001 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **7** 210
- [5] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1821
- [6] Huang X B, Xia G Q, Wu Z M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3066 (in Chinese) [黄雪兵、夏光琼、吴正茂 2010 物理学报 **59** 3066]
- [7] Li H Q, Zhang J, Cui D F, Xun Y Z, Ning Y Q, Yan C L, Qin L, Liu Y, Wang L J, Cao J L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2986 (in Chinese) [李惠青、张杰、崔大复、许祖彦、宁永强、晏长岭、秦莉、刘云、王立军、曹健林 2004 物理学报 **53** 2986]
- [8] Gao J X, Song G F, Guo B S, Gan Q Q, Chen L H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5827 (in Chinese) [高建霞、宋国峰、郭宝山、甘巧强、陈良惠 2007 物理学报 **56** 5827]
- [9] Chen J, Hangauer A, Strzoda R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 141105
- [10] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 171108
- [11] Petrolati E, Di Carlo A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 091105
- [12] Seurin J F, Xu G Y, Khalfin V, Miglo A, Wynn J D, Pradhan P, Ghosh C L, D'Asaro L A 2009 *Proc. SPIE* **7229** 722903
- [13] Hardley G R, Lear K L, Warren M E, Choquette K D, Scott J W, Corzine S W 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 607
- [14] Wu J, Summers H D, Iordache G 2001 *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics* Chiba, Japan, May 6—11, 2001 p169
- [15] Hao Y Q, Ma J L, Zhong J C, Zhao Y J, Wang X H, Qiao Z L 2009 *Chinese Patent* ZL200610104150.2 (in Chinese) [郝永芹、马建立、钟景昌、赵英杰、王晓华、乔忠良 2009 中国专利 ZL200610104150.2]

## 808nm vertical-cavity surface-emitting laser with large aperture\*

Hao Yong-Qin<sup>†</sup> Feng Yuan Wang Fei Yan Chang-Ling Zhao Ying-Jie Wang Xiao-Hua

Wang Yu-Xia Jiang Hui-Lin Gao Xin Bo Bao-Xue

(State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(Received 28 June 2010; revised manuscript received 5 August 2010)

### Abstract

For the carriers-crowded effect in vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), the injected current passes mainly through the edge of the circular active region, which results in nonuniformity of the output power density and annular facula with a poor central intensity, especially in large aperture VCSEL. How to restrain carriers-crowded effect becomes a technique problem to develop electrically pumped high power large aperture VCSEL. High power 808 nm VCSEL is demonstrated by introducing a novel structure. And an output power of 0.3 W is achieved at 1 A at room temperature under continuous wave operation.

**Keywords:** semiconductor laser, vertical-cavity surface-emitting laser, high power, large aperture

**PACS:** 42.55.px, 78.67.De, 85.60.-q

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61076039) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-07-0122).

<sup>†</sup> E-mail: hyq720812@yahoo.com.cn