

文章编号 1004-924X(2004)05-0449-05

## 高功率底发射 VCSELs 的制作与特性研究

孙艳芳<sup>1,2</sup>, 金珍花<sup>1,2</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 秦莉<sup>1</sup>, 晏长岭<sup>1</sup>, 路国光<sup>1,2</sup>,  
套格套<sup>1,2</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>, 崔大复<sup>3</sup>, 李惠青<sup>3</sup>, 许祖彦<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院 物理所, 北京 100080)

**摘要:** 研究制作了大面积底发射氧化限制面发射激光器, 并分析了器件特性。通过增加有源区面积, 改进制作工艺, 采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作钝化膜和多层复合  $\text{HfO}_2$  作增透膜等方法, 提高了激光器输出功率。分析了最大输出功率与有源区直径和注入电流之间的依赖关系。结果表明: 有源区直径分别为  $500\ \mu\text{m}$  和  $600\ \mu\text{m}$  的单管, 室温下均达到连续输出功率  $1.95\ \text{W}$ , 这也是目前国际上所实现的单管室温连续输出最高功率; 实验所得最大输出功率与有源区直径和注入电流之间的依赖关系与理论计算所得结果一致。并特别讨论了直径  $200\ \mu\text{m}$  的器件的近场和远场光强分布, 获得单横模工作。

**关键词:** VCSELs; 底发射;  $980\ \text{nm}$ ; 输出功率; 近场和远场

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs

SUN Yan-fang<sup>1,2</sup>, JIN Zhen-hua<sup>1,2</sup>, NING Yong-qiang<sup>1</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, YAN Chang-ling<sup>1</sup>, LU Guo-guang<sup>1,2</sup>,  
TAO Ge-tao<sup>1,2</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>, CUI Da-fu<sup>3</sup>, LI Hui-qing<sup>3</sup>, XU Zu-yuan<sup>3</sup>

(1. *Lab. of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract:** High power bottom emitting vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) emitting at  $980\ \text{nm}$  was fabricated and characterized. Through enlarging the active diameter, improving the fabrication technology and using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{HfO}_2$  as passivation layer and antireflection coating respectively, the output power was greatly increased. The dependence of maximum output power on device diameter and injected current was investigated, which is in good agreement with theoretical simulation. A continuous-wave (CW) output power as high as  $1.95\ \text{W}$  for devices with diameters of  $500\ \mu\text{m}$  and  $600\ \mu\text{m}$  has been achieved, which is the highest value reported for a single device. The detailed analysis of the nearfield and farfield images of a  $200\ \mu\text{m}$  diameter device exhibits a homogeneous current distribution and a single transverse mode operation.

收稿日期: 2004-07-12; 修订日期: 2004-08-24.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10104016); 吉林省基金 (No. 200220604)

**Key words:** VCSELs; bottom-emitting; 980 nm; output power; nearfield and farfield

## 1 引言

1977 年日本东京工业大学以 Kenichi Iga 教授为首的研究小组首次提出了垂直腔面发射激光器(VCSELs)的概念<sup>[1]</sup>。当时他们主要是想通过采用缩短腔长的办法来获得稳定的动态单纵模工作的半导体激光器,以提高光通信的能力。他们于 1984 年实现了这种激光器的室温连续脉冲工作<sup>[2]</sup>,又于 1988 年实现了它的室温连续(CW)工作<sup>[3]</sup>。在经历了短短的 20 几年的发展之后,如今,小直径 VCSELs 的应用市场已经蓬勃发展起来,它们广泛应用于光通讯、光学扫描、集成光并联等方面。同时,随着医疗、材料制备、激光泵浦等方面对高功率半导体激光器的需求日益增长,开发 VCSELs 的高功率应用潜能势在必行。

高功率 VCSELs 中,980 nm 激光是一个非常重要的波段。980 nm 是掺铒光纤放大器的泵浦源,在光通信中有极为重要的应用。980 nm 还是掺镱光纤激光器的泵浦源。另外可以利用它来替代边发射半导体激光器泵浦固体激光器<sup>[4]</sup>,获得蓝绿光输出<sup>[5]</sup>。2001 年德国 ULM 大学实现了波长为 980 nm、直径为 320  $\mu\text{m}$  的 VCSELs 单管室温连续工作最大输出功率为 0.89 W,室温脉冲工作最大峰值功率为 10 W;波长为 980 nm、19 个单管组成的二维面阵室温连续工作最大输出功率为 1.55 W,功率密度达到了 1.25  $\text{KW}/\text{cm}^2$ <sup>[6]</sup>。为了实现高光输出功率的目的,本组采用了增加有源区面积的方法,2004 年首次实现了波长为 980 nm、直径分别为 500  $\mu\text{m}$  和 600  $\mu\text{m}$  的 VCSELs 单管室温连续工作光输出功率达到 1.95 W,室温脉冲工作最大峰值功率达到 10.5 W。

## 2 结构与制作过程

图 1 为 VCSELs 的结构图。VCSELs 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长而成。有源区包括 3 个 8 nm 厚的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  量子阱和 10 nm 厚的 GaAs 材料构成的势垒,激光波长约为 980 nm。有源区夹在  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  空间层间,有源区及空间层构成一个波长的谐振腔。

p-DBR 由 30 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  构成,反射谱中心波长为 980 nm,理论上达到 99.9% 的反射率。为降低覆盖层的串联电阻,P 面掺 C ( $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ) 以减少电压降,同时不会增加吸收损耗。n 型 DBR 包括 20 对  $\text{Si}$  ( $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ) 掺杂的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ ,提供 99.3% 的反射率。在 p 型 DBR 与空间层之间有一 30 nm 厚的 AlAs 层,这一层经选择氧化后变成低折射率的坚固的隔离氧化物  $\text{Al}_x\text{O}_y$ ,形成由氧化物包围的窗口,这样就可以减少横向电流扩展效应,产生对有源层的高效电流限制<sup>[7]</sup>。

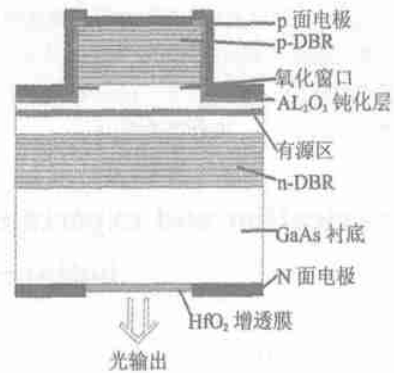


图 1 底发射 VCSELs 的结构图  
Fig. 1 Schematic layer structure of bottom VCSELs

p 面溅射一层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  替代常见的  $\text{SiO}_2$  作为钝化层以防止短路。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  导热性能好,对水汽敏感程度低,可以更好的提高器件性能。在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面选择刻蚀出圆形台面。p 面欧姆接触采用 Ti/Pt/Au 结构,其中 Pt 是阻挡层,起着阻挡 Au 向激光器有源区扩散的作用,有利于提高激光器的稳定性和可靠性。为降低吸收损耗,n 面减薄到 180  $\mu\text{m}$  左右,采用双面对准工艺形成出光窗口,蒸镀多层  $\text{HfO}_2$  基 980 nm 增透膜,以提高输出窗口的透射率。n 面的欧姆接触通过在衬底上蒸镀 AuGeNi/Au 形成。有源区的生热是 VCSELs 的主要热源,因此为达到有效散热的目的,采用底发射结构,将 p 面装配在金刚石热沉上。

## 3 实验结果与讨论

输出功率  $P$  可以表示为

$$P = \eta \times hv / q \times \{ I - I_{th} \} \times \{ 1 - T / T_{off} \}, \quad (1)$$

其中,  $\eta$  是微分量子效率,  $hv$  是光子能量,  $q$  是基本电荷,  $I$  是外加电流, 阈值电流

$$I_{th} = J_{th} \times \pi \times (D/2)^2, \quad (2)$$

$J_{th}$  是阈值电流密度,  $D$  是激光有源区激活区直径。截止温度  $T_{off} = 170$  K, 器件的上升温度  $T$  表示为

$$T = R_{therm} ( V_k + I \times R_d ) \times I - P, \quad (3)$$

$V_k$  代表折点电压,  $R_d$  代表微分电阻。热阻  $R_{therm}$  与平均热导  $\kappa$  及激光有源区激活区直径  $D$  成反比, 即:

$$R_{therm} = (2 \kappa D)^{-1}, \quad (4)$$

图 2 给出了利用公式 (1) - (4) 计算得到的光输出功率与激光有源区直径及外加电流的依赖关系。

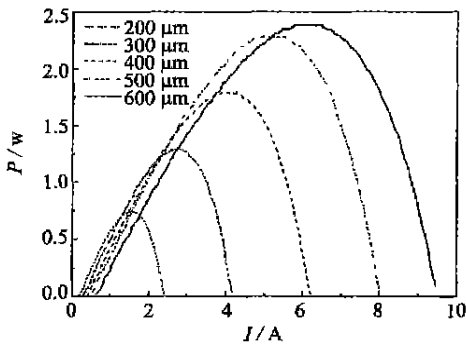


图 2 理论计算输出功率与有源区直径和注入电流之间的关系

Fig. 2 Theoretical dependence of output power on active diameter of device and current

从图 2 可以清楚看出, 在给定的阈值电流密度和热导条件下, 光输出功率首先随着外加电流的增加而增加; 接着, 光输出功率达到最大值; 然后, 光输出功率呈下降趋势。同时, 随着有源区直径的增大光输出功率明显提高。但随有源区直径的增加光输出功率提高幅度变缓。

由公式 (4) 可知器件热阻与有源区直径成反比, 因此随着有源区直径的增加, 器件热阻先迅速降低, 后趋于平缓。图 3 为 器件发射波长与有源区直径和注入电流之间的关系。由图可知, 随着注入电流的加大, 激光波长红移<sup>[8]</sup>。而且在相同电流注入区间内, 不同有源区直径的器件波长红移速率不同。例如: 在 1A 到 2A 区间内, 有源区直径为 200  $\mu\text{m}$  的器件波长红移速率最快为

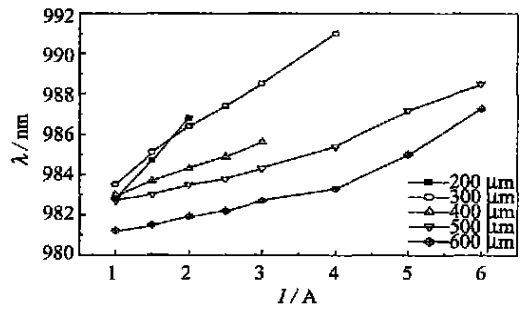


图 3 器件发射波长与有源区直径和注入电流之间的关系

Fig. 3 Dependence of wavelength on active diameter of device and current

4 nm/A, 随着有源区直径的增加, 波长红移速率逐渐变慢, 当有源区直径增加到 600  $\mu\text{m}$  时, 波长红移速率仅为 0.8 nm/A。显然, 有源区直径越小, 波长红移越快, 在其它电流区间也得到相同结果。对于相同材料结构的器件, 波长随温度的变化  $\lambda / T$  为常数<sup>[9]</sup>, 因此, 相同电流区间内, 有源区直径越小, 波长红移越快, 内部温升越高, 热阻越大, 器件越容易达到饱和。相反, 有源区直径越大, 波长红移较慢, 温升相对较缓, 热阻较小, 不易饱和, 更容易加大电流, 提高光输出功率。另一方面, 有源区直径越大, 所能注入电流越大, 总的温升越大, 消耗的输入功率也就越大, 消耗的输入功率大致与有源区面积成正比, 正比于直径的平方<sup>[10]</sup>, 器件的转换效率

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{diss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{diss}}{P_{in}}, \quad (5)$$

$P_{out}$  代表光输出功率,  $P_{in}$  代表输入功率,  $P_{diss}$  代表消耗的输入功率。因此, 随有源区直径的增加转换效率迅速降低, 光输出功率提高速率变缓。图 4 为实验测得的光输出功率与有源区直径和注入电流之间的关系。正如上述, 有源区直径为 200  $\mu\text{m}$  的器件在注入电流仅为 2.5 A 时便达到饱和, 最高光输出功率为 0.58 W。随着注入电流的加大, 300  $\mu\text{m}$  器件在 3.8 A 的注入电流下出现饱和, 最高光输出功率为 1.1 W。400  $\mu\text{m}$  的器件在 5 A 下光输出功率达到了 1.59 W, 光输出功率明显提高, 但提高幅度有所下降。由于受测试仪器的限制, 外加电流只能加到 6 A, 因此无法测出大直径器件的最大光输出功率的饱和点。实验测试直径为 500  $\mu\text{m}$ 、600  $\mu\text{m}$  的器件的光输出功率在 6 A

下均达到了 1.95 W。由于器件效率下降较快，600  $\mu\text{m}$  器件的光输出功率与 500  $\mu\text{m}$  器件相比没有明显提高。

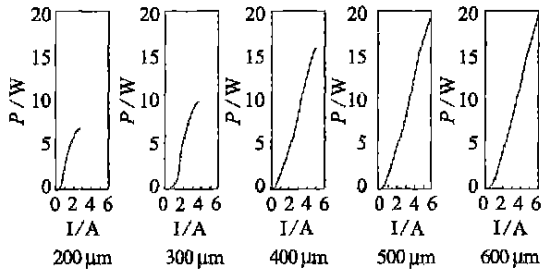


图 4 光输出功率与有源区直径和注入电流之间的关系  
Fig. 4 Output power dependent of active diameter and current in experiment

图 5 为 200  $\mu\text{m}$  的器件阈值时的近场图(a-b)和远场图(c-d)。从图(a) CCD 拍摄的照片中可以看到,不同于顶发射器件近场的环形分布,底发射器件电流分布比较均匀。这是因为 p 面采用大面积圆形电极,使得电流注入均匀,中心附近电流密度近似为常数。同时,p 面与金刚石热沉相接,此种方法可以有效地降低有源区生热对器件的影响。因此,有源区边缘电流密度与中心电流密度相差不大,所以整个窗口全部激射。将图(a)用 matlab 处理后得到图(b),可知阈值条件下光束分布近似高斯模型,为基模输出。从远场图(c)可见光束以中心轴为对称中心均匀分布,中心光强较强。由图(d)可得光束发散角小于 15°。

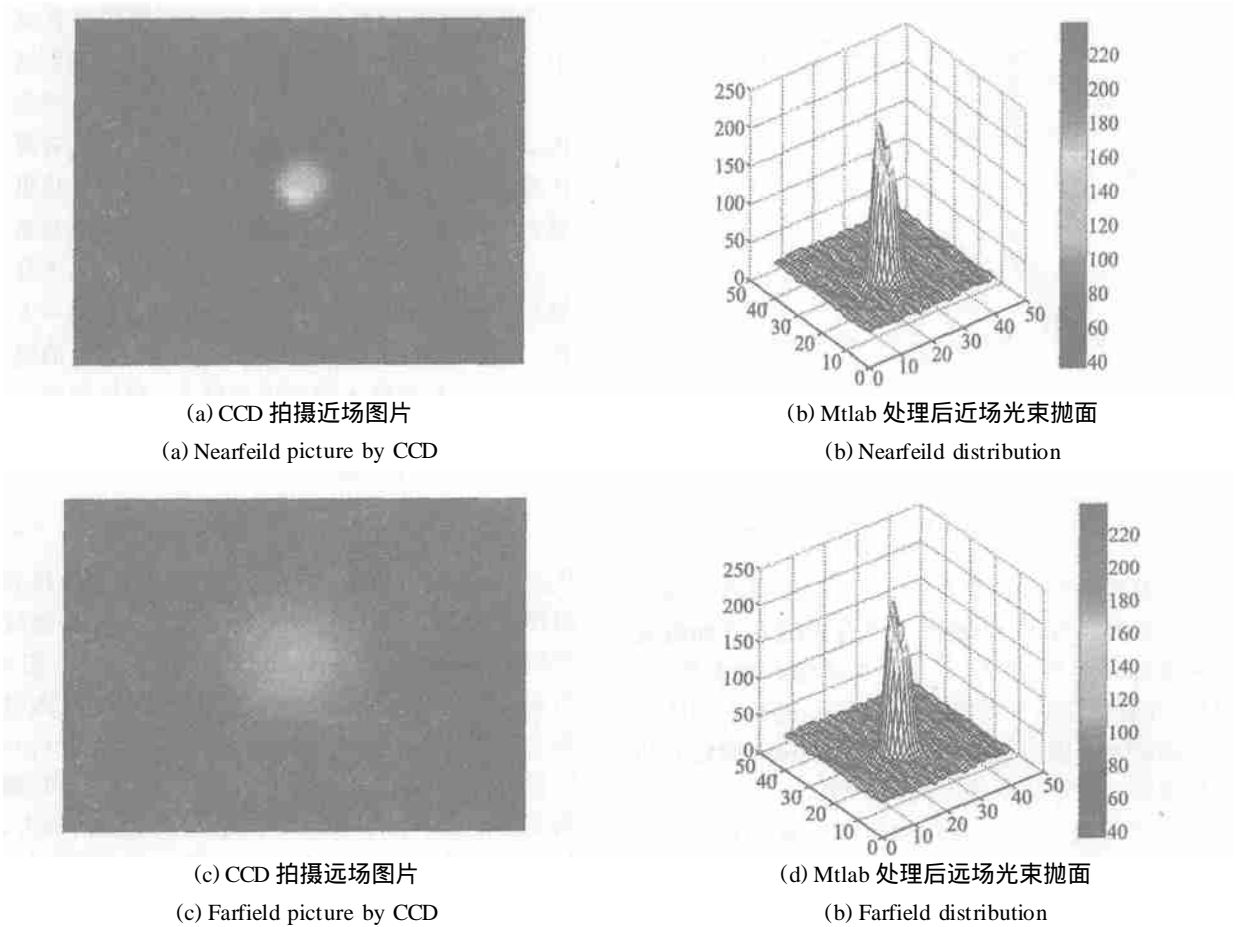


图 5 直径 200  $\mu\text{m}$  的器件阈值时的近场(a-b)和远场图片(c-d)

Fig. 5 Nearfield intensity patterns(a-b) and farfield(c-d) of a 200  $\mu\text{m}$  diameter device at threshold current

## 4 结 论

采用氧化物限制方法制作的底发射面发射激光器,获得了优良的器件特性。有源区直径为 500  $\mu\text{m}$ 、600  $\mu\text{m}$  的单管室温下均获得了最高连续光输出功率 1.95 W,是目前国际上所实现的单管室温连续输出最高功率值。随着有源区直径的增加,器件热阻先迅速下降后趋于平缓。在相同电流区间内,有源区直径较小的器件波长红移速率

较快,内部温升较快,较小电流下就会出现饱和。相反,有源区直径较大的器件波长红移速率较缓,内部温升较慢,更容易加大注入电流,从而提高光输出功率。另一方面,器件的转换效率随有源区直径的增加而下降,光输出功率随有源区直径的增大而增长,但增长幅度随有源区直径的增加变缓。研究了直径 200  $\mu\text{m}$  的器件的近场和远场分布,结果表明底发射器件电流分布均匀,阈值时光强分布为高斯型,为基模输出。

### 参考文献:

- [1] 伊贺健一,小山二三夫. 面发射激光器基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2002.  
IGA K KOYAMA F. *Fundamentals and applications of vertical cavity surface emitting lasers* [M]. Beijing: Science Press,2002. (in Chinese)
- [2] IGA K, ISHIKAWA S, OHKOUCHI S, *et al.* Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/ GaAs surface emitting injection laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984,45(4):348-350.
- [3] KOYAMA F, KINOSHITA S, IGA K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989,55(3):221-222.
- [4] 周城,叶子青,郑权,等. 半导体泵浦全固体蓝光激光器的研究进展[J]. 光学精密工程,2002,10(3):295-299.  
ZHOU CH, YE Z Q, ZHENG Q, *et al.* Investigation of the LD pumped all solid-state blue laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(3):295-299. (in Chinese)
- [5] RAFAILOV E U, SIBBETT W, MOORADIAN A. Efficient frequency doubling of a vertical-extended-cavity surface-emitting laser diode by use of a periodically poled KTP crystal[J]. *Optics Letters*, 2003,28(21):2091-2093.
- [6] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2001:7210-7216.
- [7] CHOW W W, CHOQUETTE K D, CRAWFORD M H, *et al.* Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997,33(10):1810-1824.
- [8] DABBICCO M, SPAGNOLO V, FERRARA M, *et al.* Experimental determination of the temperature distribution in trench-confined oxide vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003,39(6):701-707.
- [9] YAN CH, NING Y, QIN L, *et al.* A high Power InGaAs/ GaAsP vertical-cavity surface-emitting laser and its temperature characteristics[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2004,19:685-689.
- [10] WIPIJEWSKI T, PETER M G, THIBEAULT B J, *et al.* Size-dependent output power saturation of vertical-cavity surface-emitting laser diodes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996,8(1):10-12.

作者简介:孙艳芳(1978-),女,辽宁阜新人,博士研究生,2002年毕业于长春理工大学光学物理系,现为长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究方向为半导体光电子器件。