

# 基于 AlN 膜钝化层的高功率垂直腔面发射激光器

钟 钢<sup>1</sup> 侯立峰<sup>2\*</sup> 王晓曼<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022  
<sup>2</sup>中国人民解放军装甲兵技术学院电子工程系, 吉林 长春 130117)

**摘要** 高功率垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)内部的自生热是影响器件功能的重要因素,为改善器件的散热性能,采用 AlN 膜做钝化层研制了基于 AlN 膜钝化层的 980 nm 高功率 VCSEL 器件。对高功率 VCSEL 进行模拟仿真与理论分析表明,采用 AlN 膜钝化层可以改善器件内部的温度分布,降低器件的热阻,提高器件的散热能力;采用相同的外延片与工艺实验制备了出光孔径同为 200  $\mu\text{m}$  的 AlN 膜钝化层和传统的 SiO<sub>2</sub> 膜钝化层的高功率 VCSEL 器件;对两种不同的钝化层的器件性能进行了实验对比测试,结果表明 AlN 膜钝化层的高功率 VCSEL 器件室温下的最大输出功率可达 470 mW,比同温度下 SiO<sub>2</sub> 膜钝化层的高功率 VCSEL 器件的最大输出功率高 140 mW。AlN 膜钝化层的高功率 VCSEL 在外界温度 80  $^{\circ}\text{C}$  时,仍能正常激射,具有良好的温度适应性与光电性能。

**关键词** 激光器;高功率半导体激光;垂直腔面发射激光器;AlN 膜;钝化层

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0902002

## High-Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with AlN Film Passivation Layer

Zhong Gang<sup>1</sup> Hou Lifeng<sup>2</sup> Wang Xiaoman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>2</sup>Department of Electronics and Engineering, Armor Technique Institute of the People's Liberation Army, Changchun, Jilin 130117, China

**Abstract** Self-heating in high-power vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) is an important influence factor for device characteristics. In order to improve device heat dissipation, a 980 nm high-power VCSEL on AlN film passivation layer is fabricated. The analog simulation and analysis on the high-power VCSEL show that the AlN film passivation layer can improve the temperature distribution inside high-power VCSEL, reduce the thermal resistance of VCSEL and enhance the ability of heat dissipation. The AlN film passivation layer and the SiO<sub>2</sub> film passivation layer high power VCSELs both with 200  $\mu\text{m}$  aperture have been made by the same processes on the same epitaxial wafer. The two kinds of high power VCSELs have been tested comparatively, and the testing results show that the output power of the VCSEL on AlN film passivation layer is 470 mW at room temperature, which is 140 mW higher than that of the device on the SiO<sub>2</sub> film passivation layer. It can operate at higher temperature up to 80  $^{\circ}\text{C}$  and has much better temperature and opto-electric characteristics.

**Key words** lasers; high-power semiconductor laser; vertical-cavity surface-emitting laser; AlN film; passivation layer

**OCIS codes** 140.7260; 250.7260; 140.6810

## 1 引 言

半导体激光器内部的自生热是影响激光器性能

的重要因素,对于高功率垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL),自生热对器件性能的影响更为显著。

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(60676059)资助课题。

作者简介: 钟 钢(1971—),男,博士,工程师,主要从事半导体激光技术与电子技术等方面的研究。

E-mail: zhonggang@yahoo.com

\* 通信联系人。E-mail: houlifeng5988@sina.com

这主要是由于 VCSEL 器件的谐振腔普遍采用分布布拉格反射镜 (DBR) 结构, DBR 的引入增大了 VCSEL 内部焦耳热<sup>[1]</sup>, 器件内部产生的大量焦耳热使器件的阈值增加, 导致器件的输出功率下降, 所以高功率 VCSEL 的散热问题是研制高性能、高质量高功率 VCSEL 必须要考虑的问题之一。

高功率 VCSEL 的钝化层作用是使注入电流只能经过电极注入有源区, 实现对电流的良好限制, 从而保证有源区的材料产生激射。作为高功率 VCSEL 的钝化层一般都是选用绝缘性能良好的介质膜来充当, 目前国内外制备 VCSEL 器件, 采用最多的是 SiO<sub>2</sub> 介质膜<sup>[2]</sup>, 这主要是由于 SiO<sub>2</sub> 材料的电阻率高、绝缘性好, 但 SiO<sub>2</sub> 材料的热导率较低, 一般只有 1 W/(m·K), SiO<sub>2</sub> 钝化层的散热性较差。为了增加高功率 VCSEL 的散热能力, 提高器件的性能, 本文采用 AlN 膜代替 SiO<sub>2</sub> 膜作为高功率 VCSEL 器件的钝化层。因为 AlN 材料的热导率较高, 一般可达到 300 W/(m·K), 与 Cu 的热导率接近, 大约是 SiO<sub>2</sub> 材料热导率的 300 倍, 同时 AlN 材料的电阻率较高, 是良好的绝缘介质膜, 此外 AlN 材料还具有电性能优良、机械性能好、化学性能稳定等优点, 因此 AlN 膜是高功率 VCSEL 钝化层的最佳材料。理论分析表明采用 AlN 膜做钝化层, 可降低器件的热阻, 改善器件内部的热场分布。从工艺实现上看, 采用 AlN 膜钝化层的器件制备工艺要比 SiO<sub>2</sub> 膜钝化层的器件工艺简单。

## 2 器件设计与分析

980 nm 高功率 VCSEL 的结构是目前国内外普遍采用的 N 面底出光、P 面加热沉的器件结构<sup>[3~5]</sup>, 如图 1 所示。

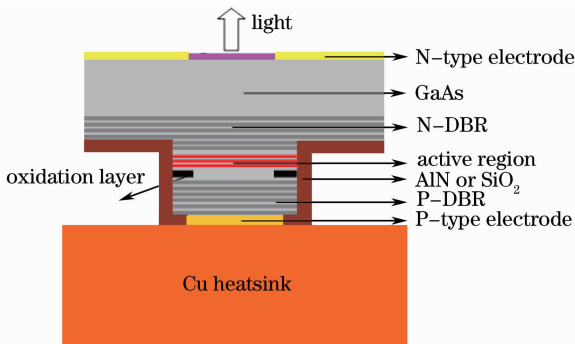


图 1 高功率 VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Sketches of high-power VCSEL structure

对图 1 所示的高功率 VCSEL 器件结构, 分析钝化层分别为 AlN 膜和 SiO<sub>2</sub> 膜时对器件散热能力

的影响。

### 2.1 对器件热阻的影响

高功率 VCSEL 器件内部的自生热主要是以传导方式向外散热, 辐射、对流等散热方式可以忽略, 因此热传导时器件的热阻是衡量器件散热能力的一个重要参量。只考虑传导散热, 而高功率 VCSEL 内部的热源一般在有源区与 P-DBR 之间的氧化层附近, 如图 1 所示。设计的高功率 VCSEL 台面直径为  $\phi 300 \mu\text{m}$ , 圆形的 P 面电极直径为  $\phi 200 \mu\text{m}$ 。当采用 AlN 膜作器件的钝化层时, 由于 AlN 材料的热导率与热沉 Cu 的热导率相近, Ti-Pt-Au 电极是热良导体, 所以整个散热区域的直径为  $\phi 300 \mu\text{m}$ 。若采用 SiO<sub>2</sub> 膜作为器件的钝化层, 由于 SiO<sub>2</sub> 材料的热导率很低, 可以看成是绝热材料, 因此器件有效散热区域就是圆形电极所覆盖的区域, 此时的散热区域的直径仅为  $\phi 200 \mu\text{m}$ 。由于 P 面台面的直径为  $\phi 300 \mu\text{m}$ , 可以将热源的有效直径等同于器件散热区域的直径, 依据公式<sup>[6]</sup>

$$R_t = \frac{4}{\pi d^2} \frac{h}{K_t}, \quad (1)$$

式中  $h$  为热源到热沉的距离,  $K_t$  为器件 P-DBR 的热导率, 不同的钝化层  $h, K_t$  取值相同。  $d$  为散热区域的直径, AlN 膜作钝化层时  $d = 300 \mu\text{m}$ , SiO<sub>2</sub> 膜作钝化层时  $d = 200 \mu\text{m}$ , 依据 (1) 式可以算出采用 AlN 膜作钝化层器件的热阻是采用 SiO<sub>2</sub> 膜作钝化层器件热阻的 4/9, 热阻大大降低, 器件的散热性能大大增强。

### 2.2 对器件内部热场分布的影响

根据热传导理论, 在圆柱坐标系下高功率 VCSEL 内部的温度分布满足热传导方程<sup>[7]</sup>

$$\nabla^2 T(r, z) + \frac{Q(r, z)}{k} = 0, \quad (2)$$

式中  $k$  代表材料的热导率。热量  $Q$  主要来源于两部分:

1) DBR 产生的焦耳热, 即

$$Q(r, z) = J^2(r, z)\rho_i, \quad (3)$$

式中  $J(r, z)$  为注入电流密度,  $\rho_i$  为 DBR 的电阻率;

2) 有源区非辐射复合的热量, 即

$$Q_{\text{eff}} = \frac{V}{d_a} [J_{\text{th}} + (J - J_{\text{th}})(1 - \eta)], \quad (4)$$

式中  $V$  为器件外加电压,  $d_a$  为有源层厚度,  $\eta$  为器件光电转换效率,  $J_{\text{th}}$  为阈值电流密度。

根据高功率 VCSEL 的特点, 可以写出边界条件:

1) 设热沉体积较大, 因此恒温条件成立, 热沉

温度与外界环境温度相同；

2) 器件内部产生的热量完全传至热沉,其他散热可以忽略；

3) 在热传导区域内,热量沿 Z 方向是均匀传播的,整个传导区内半导体材料的热导率保持恒定。

如图 1 所示,假设所设计器件的外加电压为 2 V, 阈值电流为 2 A, P-DBR 的电阻率为  $0.0023 \Omega \cdot \text{m}$ , AlN 膜与  $\text{SiO}_2$  膜的热导率分别为 300 和  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。P 面圆台面的高度为  $5 \mu\text{m}$ ,

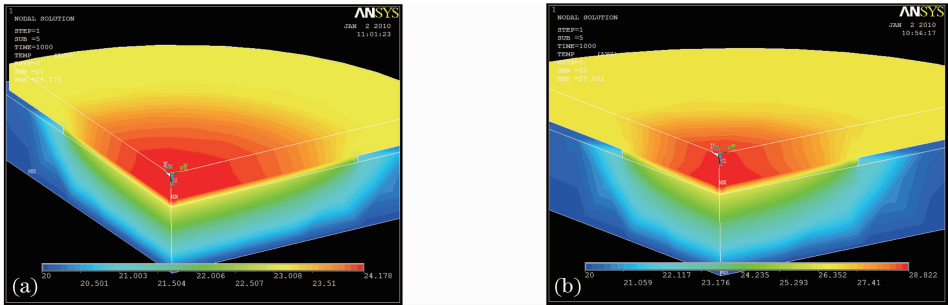


图 2 高功率 VCSEL 内部温度分布图。(a)  $\text{SiO}_2$  膜钝化层器件；(b) AlN 膜钝化层器件

Fig. 2 Sketches of temperature distribution inside high-power VCSELs. (a)  $\text{SiO}_2$  passivation layer; (b) AlN passivation layer

图 2 为采用 ANSYS 软件计算机模拟出的  $\text{SiO}_2$  膜钝化层器件和 AlN 膜钝化层器件两种高功率 VCSEL 内部温度分布图。两种器件热沉的温度都为环境温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 则依图可以看出  $\text{SiO}_2$  膜钝化层的高功率 VCSEL 的热源中心温度为  $28.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其内部温升可达  $8.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 而 AlN 膜钝化层的高功率 VCSEL 内部热源中心的温度为  $24.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其内部温升只有  $4.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , AlN 膜钝化层的器件具有良好的内部热场分布, 其散热能力要好于  $\text{SiO}_2$  膜钝化层的器件, 温度特性良好。

### 3 器件制备工艺与测试

为了更好地研究 AlN 膜钝化层在提高高功率 VCSEL 器件散热能力、改善器件热特性等方面的作用, 采用相同的材料与工艺制备了 AlN 膜钝化层与  $\text{SiO}_2$  膜钝化层的两种  $980 \text{ nm}$  高功率 VCSEL 器件。制备器件的外延片采用金属氧化物化学气相沉积 (MOCVD) 系统生长而成, 其结构包括由 3 个  $\text{In}_{0.17}\text{-Ga}_{0.83}\text{As}$  量子阱和 4 个  $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$  势垒组成的有源层; 由 30 对  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  组成的 P-DBR; 由 28 对  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  组成的 N-DBR, DBR 反射谱的中心波长设计为  $982.7 \text{ nm}$ 。有源区与 P-DBR 之间插入一层  $30 \text{ nm}$  的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层以便进行湿法氧化。具体的制

而 GaAs 衬底高度和 Cu 热沉高度分别为  $150, 200 \mu\text{m}$ , 且器件生热的主要部分有源层与 P-DBR 均处于 P 面圆台面内, 所以在计算时可将整个高度为  $5 \mu\text{m}$  的 P 面圆柱台面看成是热源中心。令 Cu 热沉温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 与外界环境温度相同, 器件的注入电流为  $2.5 \text{ A}$ , 电光转换效率为  $20\%$ , 则依据 (2)~(4) 式结合以上 3 个边界条件, 采用 ANSYS 软件模拟得到 AlN 膜钝化层器件和  $\text{SiO}_2$  膜钝化层器件内部的温度分布, 如图 2 所示。

作工艺如下: 首先在外延片采用光刻与湿法刻蚀技术刻蚀出氧化窗口, 刻蚀深度以刚超过高铝氧化层为宜。然后将外延片置于  $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$  气氛下, 在高温  $420 \text{ }^\circ\text{C}$  下进行氧化, 以实现良好的光电限制。然后采用 Discovery-18 磁控溅射镀膜机蒸镀厚度为  $200 \text{ nm}$  的 AlN 膜绝缘钝化层或  $\text{SiO}_2$  膜绝缘钝化层, 采用套刻工艺形成电极窗口, 大面积溅射 Ti-Pt-Au 制作 P 型电极; 将 N 面减薄并抛光, 采用对准光刻将 N 面出光孔与 P 面的台面对齐, 蒸发 Au-Ge-Ni 制作 N 电极, 同时在出光窗口镀增透膜, 以提高输出功率; 最后将解理的管芯 P 面使用 In 焊料烧结在无氧铜热沉上, 制成钝化层材料不同的两种高功率 VCSEL 单管器件。

采用半导体激光器综合测试仪在室温 ( $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下对  $\text{SiO}_2$  膜钝化层  $980 \text{ nm}$  高功率 VCSEL 和 AlN 膜钝化层  $980 \text{ nm}$  高功率 VCSEL 连续工作的伏安 ( $V-I$ ) 特性与光电 ( $P-I$ ) 特性进行测试, 结果分别如图 3 与图 4 所示。

由  $V-I$  特性曲线可以看出, AlN 膜钝化层高功率 VCSEL 器件与  $\text{SiO}_2$  膜钝化层高功率 VCSEL 器件相比微分电阻明显降低, 因此器件内部产生的焦耳热较低。从  $P-I$  特性曲线可以得出 AlN 膜钝化层的  $980 \text{ nm}$  高功率 VCSEL 的阈值电流为  $390 \text{ mA}$ , 微分量子效率为  $0.3 \text{ W}/\text{A}$ ; 而  $\text{SiO}_2$  膜钝

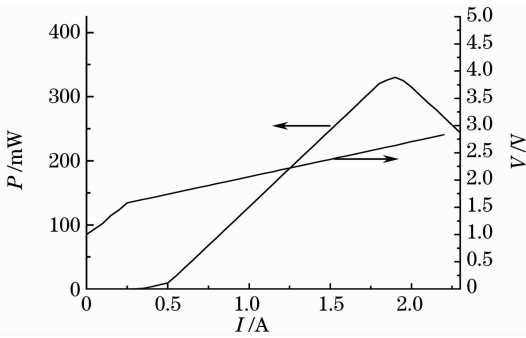


图3 SiO<sub>2</sub>膜钝化层VCSEL的P-I-V特性曲线  
Fig. 3 P-I-V characteristics curves of high-power VCSEL on SiO<sub>2</sub> film passivation layer

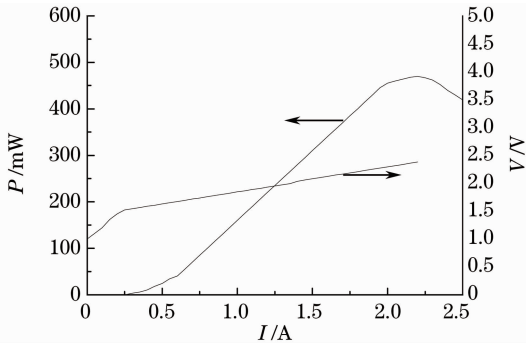


图4 AlN膜钝化层VCSEL的P-I-V特性曲线  
Fig. 4 P-I-V characteristics curves of high-power VCSEL on AlN film passivation layer

化层的980 nm高功率VCSEL的阈值电流为500 mA,微分量子效率为0.2 W/A。AlN膜钝化层的高功率VCSEL器件在驱动电流为2.2 A时,由于热效应达到热拐点,此时的最大输出功率为470 mW;而SiO<sub>2</sub>膜钝化层器件在驱动电流为1.9 A时,即达到热拐点,最大输出功率仅为330 mW,AlN膜钝化层的高功率VCSEL室温下最大的输出功率比SiO<sub>2</sub>膜钝化层的最大输出功率高140 mW。按文献[8]的实验方法,可以测得AlN膜钝化层的高功率VCSEL器件的热阻为0.095 °C/mW,而SiO<sub>2</sub>膜钝化层高功率VCSEL器件的热阻为0.125 °C/mW。以上结果均表明,AlN膜钝化层的高功率VCSEL器件具有良好的热特性与光电特性。

采用VCSEL温度特性测试装置<sup>[9]</sup>对两种钝化层的高功率VCSEL器件分别在20 °C,40 °C,60 °C和80 °C温度下连续状态的P-I特性进行测试,测试结果如图5所示。

由图5看出,两种钝化层高功率VCSEL单管的输出功率随着温度的升高而降低,这是由于VCSEL器件内部的热效应造成的。AlN膜钝化层

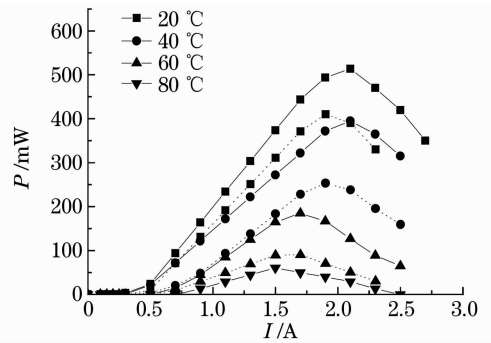


图5 不同温度下两种钝化层高功率VCSEL的P-I特性曲线(实线为AlN膜钝化层器件,虚线为SiO<sub>2</sub>膜钝化层器件)

Fig. 5 P-I characteristic curves of high-power VCSEL under different temperatures [AlN (solid line), SiO<sub>2</sub> (dashed line)]

的高功率VCSEL具有更好的温度特性,在80 °C时仍能工作,且最大输出功率可达到近65 mW,该器件的散热性能良好。

## 4 结 论

提出了采用AlN绝缘介质膜替代SiO<sub>2</sub>膜作为980 nm底面出光高功率VCSEL钝化层的新方案,计算机模拟与理论分析表明,采用AlN膜作钝化层可以降低高功率VCSEL器件的热阻,改善高功率VCSEL器件内部的温度分布,并提高器件的散热性能。采用相同的工艺实验制备了相同出光孔径的AlN膜钝化层器件与SiO<sub>2</sub>膜钝化层器件,并进行了性能对比测试。测试结果表明,AlN膜钝化层器件具有良好的光电特性,室温下最大输出功率比相同结构的SiO<sub>2</sub>膜钝化层器件高140 mW。通过对器件温度特性的测试表明,AlN膜钝化层高功率VCSEL器件具有良好的温度性能,在80 °C时仍能工作,器件的散热性能良好。AlN膜钝化层对改善高功率VCSEL的热特性,提高器件的输出性能具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Y. G. Zhao, J. G. McInerney. Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(9): 1668~1678
- 2 Jin Zhenhua, Sun Yanfang, Ning Yongqiang et al.. 980 nm high power bottom emitting VCSELs[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(1): 61~64  
金珍花, 孙艳芳, 宁永强等. 980 nm大功率垂直腔底发射激光器[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(1): 61~64
- 3 M. Miller, M. Grabherr, R. King et al.. Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 210~216

- 4 Sun Yanfang, Jin Zhenhua, Ning Yongqiang *et al.*. Fabrication and experimental characterization of high-power bottom-emitting VCSELs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 449~453  
孙艳芳, 金珍花, 宁永强 等. 高功率底发射 VCSELs 的制作与特性研究[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(5): 449~453
- 5 Wang Qing, Cao Yulian, He Guorong *et al.*. Densely packed high power VCSEL arrays[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(11): 1803~1805  
王 青, 曹玉莲, 何国荣 等. 高密度排列大功率垂直腔面发射激光器阵列[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(11): 1803~1805
- 6 F. P. Incropera, D. P. DeWitt. *Fundamentals of Heat Transfer* [M]. New York: Wiley, 1981
- 7 Yu Changming. *Heat Conduction and Its Numerical Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1981  
俞昌铭. *热传导及其数值分析* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981
- 8 Hou Lifeng, Zhong Gang, Zhao Yingjie *et al.*. The high-power VCSEL with radial bridge electrodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 1~5  
侯立峰, 钟 钢, 赵英杰 等. 径向桥电极高功率垂直腔面发射激光器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 1~5
- 9 Zhang Yongming, Zhong Jingchang, Zhao Yingjie *et al.*. Temperature characteristics of 850 nm oxide confined VCSELs [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(5): 1024~1027  
张永明, 钟景昌, 赵英杰 等. 850 nm 氧化限制型 VCSEL 的温度特性[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(5): 1024~1027