

文章编号: 1000-7032(2019)05-0630-05

高温稳定 25 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器

周广正, 兰 天, 李 颖, 王智勇*

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 通过在 N 型分布布拉格反射镜 (DBR) 中采用高热导率 AlAs 材料, 且增加 AlAs 层所占的厚度比例, 在保持 DBR 反射率基本不变的情况下, 大幅度增加了 N 型 DBR 的热导率, 提高了器件高温工作性能。制作了氧化限制型顶发射 VCSEL 器件, 不同温度条件下的直流测试结果表明: 25 °C 时热反转功率超过 8 mW; 85 °C 时热反转电流为 11 mA, 功率达 5 mW, 表现出较好的高温工作特性。远场发散角小于 17°。0 ~ 70 °C 的温度条件下眼图都较清晰, 表明器件满足高温 25 Gbit/s 工作要求。

关键词: 分布布拉格反射镜; 垂直腔面发射激光器; 量子阱; 金属有机物化学气相沉积

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20194005.0630

High Temperature-stable 25 Gbit/s 850 nm Vertical-cavity Surface-emitting Lasers

ZHOU Guang-zheng, LAN Tian, LI Ying, WANG Zhi-yong*

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding Author, E-mail: zywang@bjut.edu.cn

Abstract: By using the material of AlAs with high thermal conductivity in the n-type distributed Bragg reflector (DBR) and increasing the thickness ratio of the AlAs layer, the thermal conductivity of N-side DBR was greatly increased and the high temperature performance of the device was improved. VCSELs devices were produced, and the results of DC test under different temperature conditions showed that the maximum thermal rollover optical output power was 9 mW at 25 °C, and the maximum optical output power of 5 mW was achieved at a thermal rollover current of 11 mA at 85 °C, showing high DC performance of high temperature operation. The far field divergence angle was less than 17°. Eye diagrams were clear under different temperature conditions varying from 0 °C to 70 °C, indicating that the devices met the requirements of high temperature 25 Gbit/s operation.

Key words: distributed Bragg reflector; vertical cavity surface emitting lasers; quantum well; metal-organic chemical vapor deposition

1 引 言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有高调制速率、低阈值电流、圆形光斑易与光纤耦合和高温稳定等优势, 广泛应用于短距离数据通信和并行

高速光纤通信。在高性能计算机中基于 VCSEL 的光互联已经替代了机架内的电互联。在计算机内部温度很容易达到 80 °C 以上, 非水冷的 VCSEL 芯片将大幅减少超级计算机的水冷成本^[1]。由于 VCSEL 器件很小, 而有源区和 DBR 中产生

的热量需经过 N 型 DBR 和衬底导入热沉, 因此散热性较差; Westbergh 等^[2]通过采用高热导率 AlAs 作为 DBR 中的低折射率层, 可以有效传导有源区产生的热量。李惠等^[3]通过模拟分析, 从数值结构比较得出, 采用二元系的 Bottom-DBR 的 VCSEL 器件相比三元系 Bottom-DBR 的器件, 热性能可以有很大的提高。竹内哲也^[4]中使高热导率层的厚度大于 $\lambda/4$, 低热导率层小于 $\lambda/4$, 且保持总厚度等于 $\lambda/2$, 从而减小了 DBR 的热阻。本文中 N 型 DBR 采用 AlAs/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 材料, 且通过增加高热导率材料 AlAs 和减小低热导率材料 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 的厚度, 增大了 N 型 DBR 的热导率, 提高了器件高温工作性能。工作时器件内部温度很高, 而量子阱增益谱随温度变化较大, 需要精确设计量子阱峰值增益波长和 VCSEL 整体结构 F-P 腔模波长, 才能使得输出功率较高, 并且能在环境温度 80 °C 以上高温条件下正常工作^[5-7]。通过后期芯片制作, 最后制备了可用于高温工作的 25 Gbit/s VCSEL 器件。

2 结构与理论分析

Al_xGa_{1-x}As 材料的热导率如图 1 所示^[8], 由于 GaAs 材料对 850 nm 波长的光具有强烈的吸收作用, 所以 DBR 高折射率层材料经常选择适当组分 Al_xGa_{1-x}As, 本文选择了 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 作为高折射率层, 其禁带宽度为 1.574 eV, 对应波长为 788 nm, 避免了对 850 nm 波长的光造成强烈的吸收。由于高 Al 组分材料容易被氧化, 所以在最下面的 28 对 N 型 DBR 中使用热导率较高的 AlAs 材料作为 DBR 的低折射率层, 与之相邻的 3 对 N 型 DBR 仍用 Al_{0.12}Ga_{0.88}As/Al_{0.90}Ga_{0.10}As 材料。

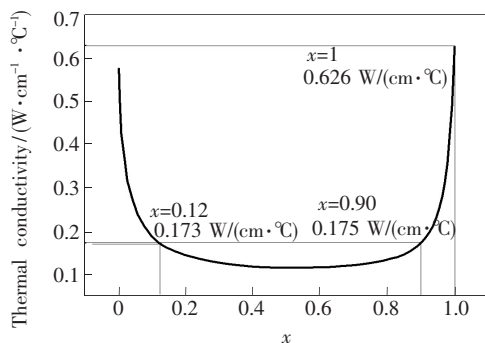


图 1 Al_xGa_{1-x}As 材料热导率随组分的变化

Fig. 1 Thermal conductivity of Al_xGa_{1-x}As varying with component

第一次刻蚀只刻到上面的 3 对 N 型 DBR, 下面含有 AlAs 材料的 DBR 没有暴露, 可以正常进行下一步的氧化工艺。

由于 DBR 高低折射率层的厚度并不需要严格满足 $\lambda/4$ ^[4], 最下面的 28 对 N 型 DBR 可以增加 AlAs 层的厚度而减小 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 层的厚度, 从而进一步提高 DBR 的热导率。图 2 模拟了 28 对不同 AlAs 层厚度 DBR 的反射率谱, 且保持 AlAs 层和 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 层厚度和为 $\lambda/2$ 。可以看出反射率谱形状基本一致, 且高反射率带中心波长都保持在 850 nm, 不会对 VCSEL 整体结构的反射率谱产生明显的影响。图 3 为 850 nm 处的反射率随 AlAs 厚度变化的曲线。可以看出随着 AlAs 层厚度的增大反射率减小, 综合考虑选取 AlAs 的厚度为 0.2875λ , 相应的 Al_{0.12}Ga_{0.88}As 层厚度为 0.2125λ 。

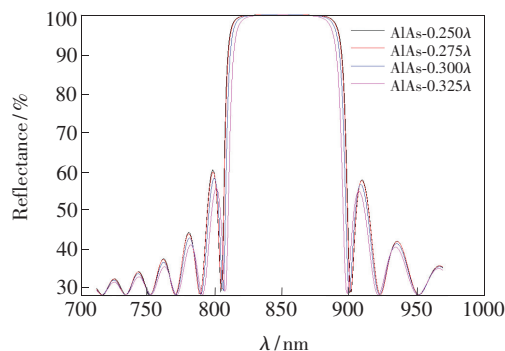


图 2 不同 AlAs 层厚度的 DBR 反射率谱

Fig. 2 Reflectance spectra of DBR with different thickness of AlAs layer

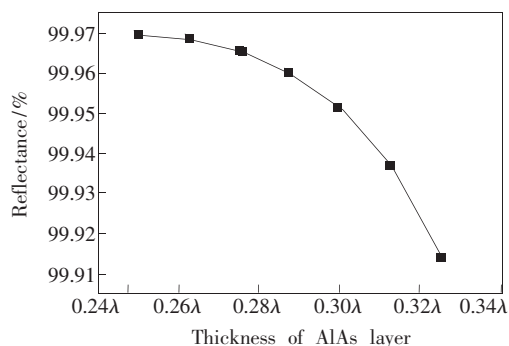


图 3 DBR 中心波长的反射率随 AlAs 厚度变化曲线

Fig. 3 Center wavelength reflectance of DBR varying with the thickness of AlAs layer

表 1 对比了不同结构 DBR 热导率和反射率 (不考虑渐变层)。其中总热导率

$$\rho_{\text{tot}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m d_i/\rho_i}, \quad (1)$$

其中 d_i 为第 i 层的厚度, ρ_i 为第 i 层的热导率, m 为 DBR 总层数。

从表 1 可以看出, 结构 2 通过采用高热导率 AlAs 材料, 总热导率 ρ_{tot} 大幅增加; 由于折射率差增大, 所以中心波长的反射率也有所增大。结构

3 通过增加高热导率材料 AlAs 的厚度, ρ_{tot} 由 $778.67 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $843.64 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, 而中心波长反射率只减小了不到 0.01% 。通过对 DBR 材料的选择和结构优化, 大幅提高了 DBR 的散热性能。

表 1 不同 DBR 结构的热导率和反射率

Tab. 1 Thermal conductivity and reflectance of different DBR structures

| DBR structure | DBR material | Thickness of each layer d/nm | | Thermal conductivity $\rho / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | Total thermal conductivity $\rho_{\text{tot}} / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ | Reflectance at center wavelength/% |
|---------------|---|---------------------------------------|---------------------|---|--|------------------------------------|
| 1 | $\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As} \times 28$ | 68.59 | (0.25 λ) | 0.175 | 483.31 | 99.882 |
| | $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As} \times 28$ | 60.03 | (0.25 λ) | 0.173 | | |
| 2 | $\text{AlAs} \times 28$ | 69.90 | (0.25 λ) | 0.626 | 778.67 | 99.969 |
| | $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As} \times 28$ | 60.03 | (0.25 λ) | 0.173 | | |
| 3 | $\text{AlAs} \times 28$ | 80.39 | (0.2875 λ) | 0.626 | 843.64 | 99.960 |
| | $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As} \times 28$ | 51.02 | (0.2125 λ) | 0.173 | | |

3 结果与讨论

实验采用 Veeco 公司的 K475i 型 MOCVD 设备进行外延生长, 反应室压力为 5.6 kPa , 温度为 $650 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$, III 族源为三甲基镓 (TMGa)、三甲基铝 (TMAl) 和三甲基铟 (TMIn), V 族源为砷烷 (AsH_3), n 型掺杂源为 Si_2H_6 , p 型掺杂源为四溴化碳 (CBr_4)。采用偏 $\langle 110 \rangle 2^\circ$ 的 GaAs (100) 衬底, 生长了 VCSEL 的整体结构, 包括 N 型 GaAs 接触层, 28 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{AlAs}$ 加 3.5 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ 材料的 N 型 DBR, InGaAs/AlGaAs 材料的应变量子阱, 两个 $\text{Al}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$ 限制层, 厚度 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化层; 22.5 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ 材料的 P 型 DBR 和 GaAs 帽层。并且单独生长了量子阱结构来确认量子阱光致发光 (PL) 光谱特性。采用 Nanometrics RPMblue 光致荧光光谱仪对量子阱进行测试, 光源为 532 nm 激光器, 量子阱光致荧光光谱峰值波长为 829 nm 。并利用该设备测试了 VCSEL 外延片白光反射谱, F-P 腔模波长为 847 nm , F-P 腔模波长与 PL 峰值波长差值为 18 nm ^[9-10]。后期芯片工艺制作了孔径为 $7 \mu\text{m}$ 的氧化限制型顶发射 VCSEL 器件。

VCSEL 器件完成后封装成 TO 形式, 在变温工作台测试了不同温度下的直流特性。850 nm VCSEL 单管不同温度下的功率-电流 ($P-I$) 曲线如

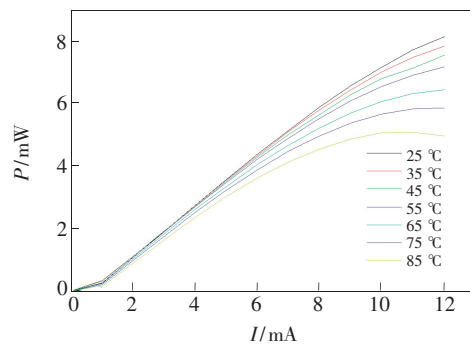


图 4 不同温度下的 $P-I$ 曲线

Fig. 4 $P-I$ curves at different temperature

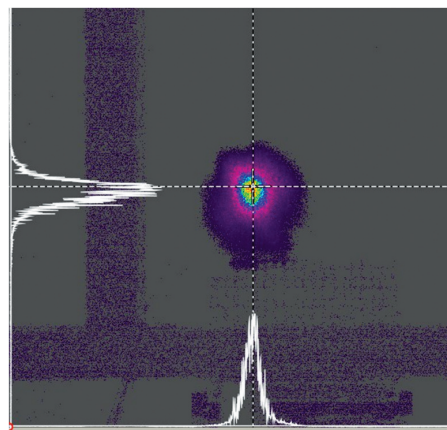


图 5 室温 6 mA 下的远场分布

Fig. 5 Far field distribution at 6 mA at room temperature

图 4 所示, 可以看出 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时热反转功率超过 8 mW ; $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 时热反转电流为 11 mA , 功率达 5 mW ,

表现出较好的高温工作特性。室温 6 mA 下的远场分布如图 5 所示, x 方向的发散角为 14.37° , y 方向的发散角为 16.97° , 远场分布的不对称性可能是由于电流不均匀注入导致。

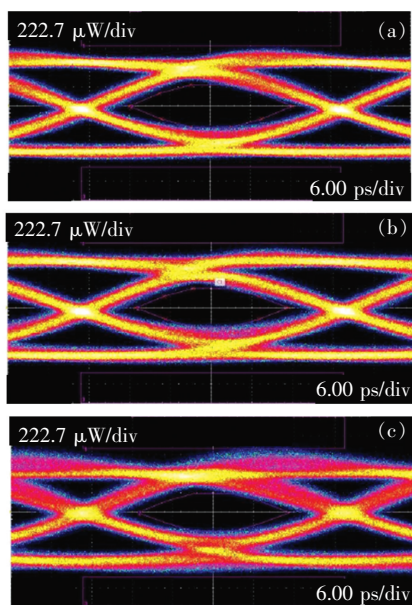


图6 不同温度下的 25 Gbit/s 眼图特性。(a) 0 °C; (b) 25 °C; (c) 70 °C。

Fig.6 25 Gbit/s eye diagrams at different temperature. (a) 0 °C. (b) 25 °C. (c) 70 °C.

图 6 为不同温度、6 mA 偏置电流下的眼图特性,可以看出不同温度工作条件下眼图都比较清晰,表现出较好的高温工作性能^[11-12]。70 °C 时噪声和抖动变大,可能是由于温度升高输出功率下降,导致相对强度噪声增大^[13]。

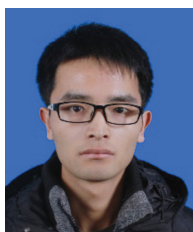
4 结 论

本文通过在 N 型 DBR 中采用高热导率 AlAs 材料,且增加 AlAs 层所占的厚度比例,在保持 DBR 反射率基本不变的情况下,总热导率 ρ_{tot} 由 $483.31 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $843.64 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,提高了器件高温工作性能。采用 MOCVD 设备外延生长了波长为 850 nm VCSEL; PL 峰值波长 829 nm,白光反射谱 FP 腔模波长为 847 nm。制作了 VCSEL 器件,不同温度条件下的直流测试结果表明:25 °C 时热反转功率超过 8 mW;85 °C 时热反转电流为 11 mA,功率达 5 mW,表现出较好的高温直流工作特性。远场发散角小于 17° 。0 ~ 70 °C 的温度条件下眼图都较清晰,表明器件满足高温 25 Gbit/s 工作要求。还需要进行老化实验等,验证 VCSEL 器件的可靠性和稳定性。

参 考 文 献:

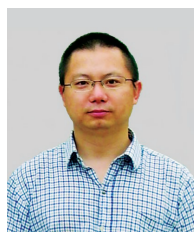
- [1] MOSER P, WOLF P, MUTIG A, *et al.*. 85 °C error-free operation at 38 Gb/s of oxide-confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(8):081103-1-3.
- [2] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KÖGEL B, *et al.*. Impact of photon lifetime on high-speed VCSEL performance [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(6):1603-1613.
- [3] 李惠, 贾晓卫, 魏泽坤, 等. 高速光通讯面发射激光器的热分析及优化 [J]. *发光学报*, 2017, 38(11):1516-1522.
LI H, JIA X W, WEI Z K, *et al.*. Thermal analysis and structure optimization of high-speed optical communication-VCSEL [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(11):1516-1522. (in Chinese)
- [4] 竹内哲也. 包含多层反射器的光学设备和垂直腔面发射激光器:中国, CN101132118 [P]. 2008-02-27.
TAKEUCHI T. Optical device including multilayer reflector and vertical cavity surface emitting laser: China, CN101132118 [P]. 2008-02-27. (in Chinese)
- [5] 张永明, 钟景昌, 赵英杰, 等. 850 nm 氧化物限制型 VCSEL 的温度特性 [J]. *半导体学报*, 2005, 26(5):1024-1027.
ZHANG Y M, ZHONG J C, ZHAO Y J, *et al.*. Temperature characteristics of 850 nm oxide confined VCSELs [J]. *Chin. J. Semicond.*, 2005, 26(5):1024-1027. (in Chinese)
- [6] 张星, 张奕, 张建伟, 等. 894 nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用 [J]. *物理学报*, 2016, 65(13):134204-1-9.
ZHANG X, ZHANG Y, ZHANG J W, *et al.*. 894 nm high temperature operating vertical-cavity-surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2016, 65(13):134204-1-9. (in Chinese)
- [7] 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 增益-腔模失配型高温工作垂直腔面发射半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5):0502001-1-8.

- ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.*. Gain-cavity mode detuning vertical cavity surface emitting laser operating at the high temperature [J]. *Chin. J. Lasers*, 2013, 40(5):0502001-1-8. (in Chinese)
- [8] AFROMOWITZ M A. Thermal conductivity of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44(3):1292-1294.
- [9] BLOKHIN S A, BOBROV M A, MALEEV N A, *et al.*. Anomalous lasing of high-speed 850 nm InGaAlAs oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers with a large negative gain-to-cavity wavelength detuning [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(6):061104-1-5.
- [10] CHI K L, YEN J L, WUN J M, *et al.*. Strong wavelength detuning of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for high-speed (>40 Gbit/s) and low-energy consumption operation [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6):470-479.
- [11] LARISCH G, MOSER P, LOTT J A, *et al.*. Large bandwidth, small current density, and temperature stable 980-nm VCSELs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2017, 53(6):2400908-1-8.
- [12] 吕朝晨, 王青, 尧舜, 等. 4×15 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5):0514001-1-7. LV Z C, WANG Q, YAO S, *et al.*. 4×15 Gbit/s 850 nm vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2018, 38(5):0514001-1-7. (in Chinese)
- [13] COLDREN L A, CORZINE S W, MAŠANOVIĆ M L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.



周广正(1991 -), 男, 安徽滁州人, 博士研究生, 2015 年于北京工业大学获得学士学位, 主要从事垂直腔面发射激光器的研究。

E-mail: zhouguangzheng@emails.bjut.edu.cn



王智勇(1970 -), 男, 北京人, 博士, 研究员, 1998 年于北京工业大学获得博士学位, 主要从事大功率高光束质量半导体激光技术的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn