

文章编号: 0258-7025(2009)08-1946-05

新型结构垂直腔面发射激光器的研制

赵英杰¹ 郝永芹¹ 李广军² 冯 源¹ 侯立峰^{1,2}

(¹长春理工大学大功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

²中国人民解放军装甲兵技术学院, 吉林 长春 130117

摘要 为改善垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的热特性,提高其光电性能,研制了新型辐射桥结构的 VCSEL,即采用辐射桥状的电流注入通道取代以往传统结构 VCSEL 的环形电流注入通道。研究表明辐射桥结构可以降低 VCSEL 器件的体电阻和热阻,改善器件的模式特性。在同一外延片上,采用相同的工艺制备了辐射桥结构与传统结构两种 VCSEL 器件,并对两种器件的光电性能进行了对比测试。结果表明,辐射桥结构 VCSEL 比传统结构的 VCSEL 微分电阻降低 25%,输出功率提高到 1.6 倍;辐射桥结构的 VCSEL 具有良好的温度特性与模式特性,80 °C 时仍能正常激射,60 °C 时最大输出功率可达 17 mW,器件的热阻可达 1.95 °C/mW;器件单模工作,其总体性能远优于传统结构的 VCSEL 器件。

关键词 激光技术;垂直腔面发射激光器;辐射桥;热阻

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1946

Fabrication of New Structure Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

Zhao Yingjie¹ Hao Yongqin¹ Li Guangjun¹ Feng Yuan¹ Hou Lifeng^{1,2}

(¹National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University
of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
²Armor Technique Institute of PLA, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract Using radiate bridge channels in place of ring channels for current injection, a new radiate bridge structure vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) was fabricated in order to improve the thermal characteristic and its photo-electricity. The study on the new structure shows that the radiate bridge structure can reduce the electric and thermal resistance of VCSEL, and improve the device modes. The radiate bridge structure and the traditional structure VCSEL are made using the same process on the same wafer, and their performance are tested contrastively. The results show that the differential resistance of new structure VCSEL is 25% lower and the out power is 1.6 times higher than the traditional structure VCSEL. The characteristic of temperatures and modes is good, it can still operate at 80 °C, the maximum output power can reach 17 mW at 60 °C, and its thermal resistance is 1.95 °C/mW. It operates with single mode all along, its performance is much better than traditional structure VCSEL.

Key words laser technique; vertical cavity surface emitting laser; radiate bridge; thermal resistance

1 引 言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)具有极低的阈值、较小的远场发散角、调制频率高、易于实现单纵模工作和二维集成等优点^[1,2],在光纤通信、光集成元件、并行光信号处理、光互连与光存储^[3]等

方面有着广泛的应用前景。随着湿法氧化工艺在 VCSEL 研制中的引入,VCSEL 实现了较高的电光转换效率^[4,5]与较低的阈值^[6,7],在很多领域大有取代边发射半导体激光器之势,成为一种新兴光源。但由于 VCSEL 的谐振腔普遍采用分布布拉格反射

收稿日期: 2008-11-07; 收到修改稿日期: 2008-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60676059)和吉林省科技发展计划(20080331)资助项目。

作者简介: 赵英杰(1954—),男,副研究员,主要从事半导体激光与电子技术方面的研究。

E-mail: zhaoyingjie2005@tom.com

镜(DBR)结构,DBR的引入增大了 VCSEL 器件的体电阻和热阻,使 VCSEL 内部焦耳热增加,器件的散热性能变差^[8,9]。VCSEL 内部的大量生热造成器件的阈值升高,输出功率降低,工作寿命缩短^[10,11]。垂直腔面发射激光器的热特性要远逊于传统的边发射激光器。热问题已经成为制约 VCSEL 发展的重要问题。

由于在 VCSEL 器件内部 P-DBR 层的电阻与热阻远大于 N-DBR 层,因此 DBR 层的生热主要来自 P-DBR 层^[12,13]。为了降低 P-DBR 层的电阻与器件热阻,改善 VCSEL 的热特性,提高 VCSEL 的光电性能,设计并制备了新型辐射桥结构的 VCSEL。为了研究辐射桥结构在改善 VCSEL 性能方面的作用,在同一外延片

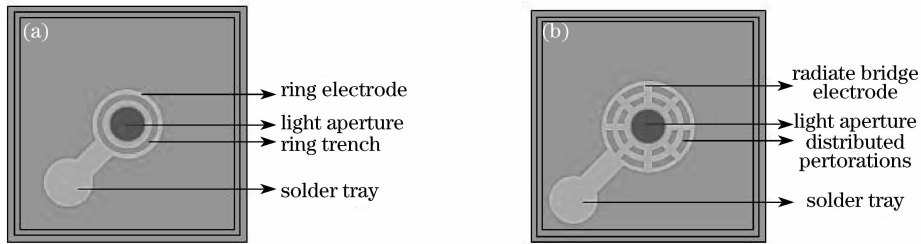


图 1 传统结构(a)与辐射桥结构(b)VCSEL 示意图

Fig. 1 Sketches of traditional structure (a) and radiate bridge structure (b) VCSEL

传统结构 VCSEL 的电流经焊盘由环形电极通道注入,出光孔与环形电极间的环形沟槽充当氧化窗口;辐射桥结构的 VCSEL 电流经焊盘由辐射桥状电极通道注入,辐射桥路间的分布孔充当氧化窗口。这种结构对改善器件性能具有以下优势:首先,由于辐射桥状导电通道的存在,使 P-DBR 导电面积远大于环形沟槽时的导电面积,由于导电面积的增大,势必引起电阻的减小;另外作为氧化窗口,各个分布孔的腐蚀深度均达到有源区,P-DBR 形成多个支路,因此其电阻是各支路电阻的并联,导致器件总的体电阻减小,从而减小器件的焦耳热;其次在辐射桥结构 VCSEL 器件内部形成发散的桥路结构,避免了填充聚酰亚胺等绝热材料固定台周,使桥路间的分布孔氧化窗口形成天然的散热通道,增加了器件的散热面积。忽略其他散热方式,VCSEL 的散热是由热源中心到热沉的一维传导散热,器件的热阻

可写为 $Z_c = \frac{h}{\sigma A}$ ^[14],其中 h 为有源区到热沉的距离,

σ 为热导率, A 为有效散热面积。由于辐射桥结构相比传统结构增大了有效散热面积,因此采用辐射桥结构可降低器件热阻,改善器件的热特性。最后由于聚酰亚胺属于光密物质,折射率大于半导体材料,对谐振腔光导引会产生负面影响,不利于好的激

光模式输出,取消聚酰亚胺填充还有利于激光输出模式的改善。

2 结构设计与制作

2.1 器件的结构设计

为解决 VCSEL 器件的热问题,改善器件的光电特性,提出了 VCSEL 辐射桥结构的设计构想,即将 VCSEL P 面的注入电极通道由传统的环形结构改为辐射桥结构,如图 1 所示。

光模式输出,取消聚酰亚胺填充还有利于激光输出模式的改善。

2.2 器件的制备

为了更好地研究新型辐射桥结构 VCSEL 对改善器件性能方面的作用,在同一外延片上采用相同的工艺制备了传统结构和辐射桥结构两种 VCSEL 器件。外延片是采用分子束外延技术(MBE)生长而成的,其结构包括由 3 个 $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 量子阱和 4 个 $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$ 势垒组成的有源层;由 36.5 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;由 23 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;为形成掩埋的 $\text{AlGaAs}/\text{Al}_x\text{O}_y$ 结构,在 P-DBR 的第一对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层中插入 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层,顶层为 GaAs 接触层。整个外延片厚约 $8.6 \mu\text{m}$,中心波长为 977 nm。在外延片的台面上按照图 1 所示的两种结构采用光刻与反应离子刻蚀技术刻蚀出氧化窗口,刻蚀深度为 $4 \mu\text{m}$ 。外延片置于 $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气氛下进行氧化,氧化温度为 $420 \text{ }^\circ\text{C}$,氧化时间 50 min,以实现良好的光电限制的目的。然后镀 SiO_2 钝化层,一次套刻形成直径 $40 \mu\text{m}$ 的出光孔,二次套刻形成电极图形,蒸镀电极,最后进行合金,制作欧姆接触。然后再将外延片上的器件进行解

理、制备热沉并封装,制成两种结构的 VCSEL 单管器件。

3 器件性能测试与讨论

选择同一外延片制备的两种结构的 VCSEL 单管器件,进行性能对比测试。

室温下连续工作测得两种结构单管的伏安特性曲线如图 2 所示。由伏安特性曲线,可以算得两种管子的微分电阻,其中辐射桥结构的微分电阻为 7.5Ω ,传统结构的微分电阻为 10Ω ,辐射桥结构器件的微分电阻比传统结构下降了 25%,器件的焦耳热也将随之下降。

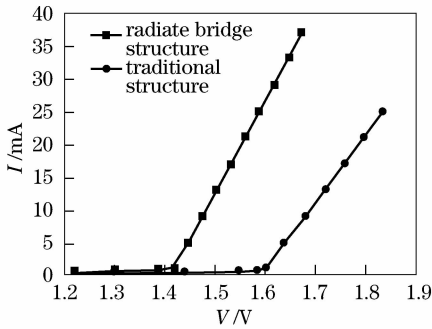


图 2 两种结构 VCSEL 的 V-I 特性曲线

Fig. 2 V-I characteristics curves of VCSEL

图 3 为室温下连续工作测得两种结构单管的光电(P-I)特性曲线。由图 3 可得出辐射桥结构的 VCSEL 室温下连续工作的阈值电流为 11 mA,在驱动电流 49.5 mA 时,峰值功率可达到 28.8 mW;而传统结构的 VCSEL 室温下连续工作的阈值电流为 15 mA,在驱动电流 40.5 mA 时,峰值功率仅为 17.8 mW。表明辐射桥结构的器件与传统结构的器件相比,具有良好的光电特性。

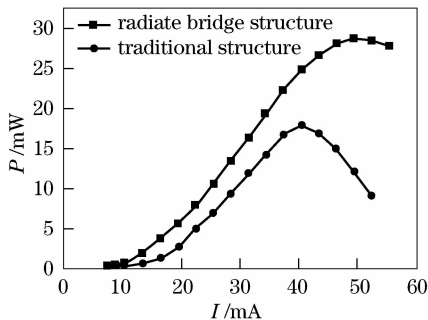


图 3 两种结构 VCSEL 的 P-I 特性曲线

Fig. 3 P-I characteristics curves of two structure VCSEL

采用 VCSEL 温度特性测试装置^[15]对两种结构 VCSEL 随外界温度变化时其相关性能的变化进行测量。

图 4 表示两种器件分别在 $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的 P-I 特性曲线。该曲线表明两种结构 VCSEL 单管的最大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。辐射桥结构的 VCSEL 具有更好的温度特性,说明该结构的器件热特性良好,在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时仍能工作, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时最大输出功率可达到近 17 mW,其温度特性要远好于传统结构的器件。

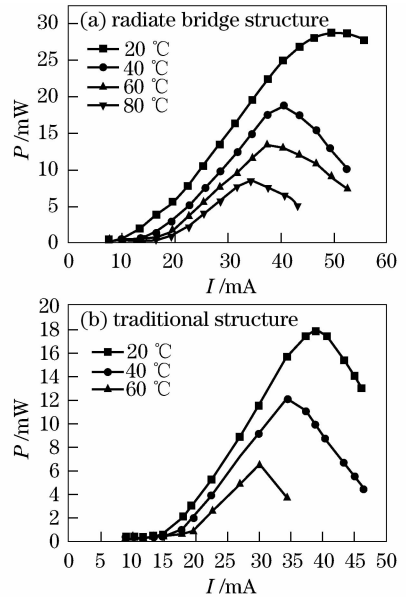


图 4 不同温度下两种结构 VCSEL 的 P-I 特性曲线

Fig. 4 P-I characteristics curves of two structure VCSEL at different temperature

图 5(a)表示在驱动电流为 8 mA 时,两种结构的 VCSEL 激光波长随温度的变化关系。可以看出随着温度的增加,波长发生红移,两种结构的器件随温度的红移速率 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ 分别为 $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,表明辐射桥结构的器件波长随温度变化较小,温度特性好。

由已知输入的驱动电流和器件的伏安特性曲线,在常温下可以测得两种结构的 VCSEL 激光波长随注入电功率的变化曲线,如图 5(b)所示。随着注入电功率的增大导致器件内部产生的焦耳热增加,引起器件的激光波长红移。从图 5(b)可以算得两种结构的 VCSEL 随注入电功率增加的红移速率 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta P}$ 分别为 $0.117 \text{ nm}/\text{mW}$, $0.180 \text{ nm}/\text{mW}$,结果表明辐射桥结构的 VCSEL 具有较好的热稳定性。

依据半导体激光器的热效应理论,激光器的热

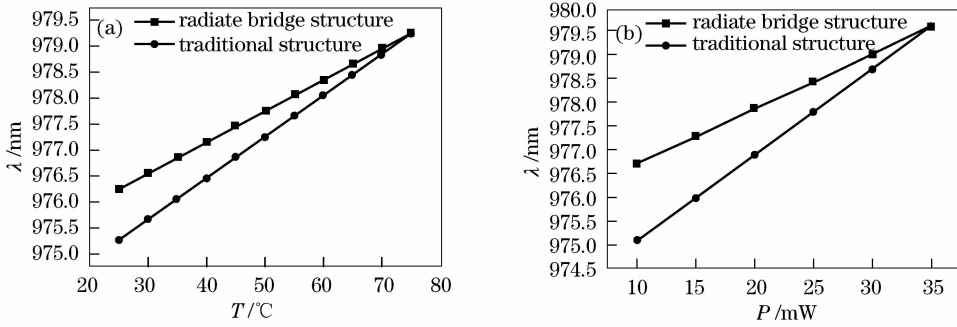


图 5 两种结构 VCSEL 波长随温度(a)与注入功率(b)的变化

Fig. 5 Wavelength versus temperatures (a) and the injection electrical power (b) of two structure VCSEL

特性可以用热阻来描述^[16]

$$Z_t = \frac{\Delta T}{\Delta P}, \tag{1}$$

(1)式可改写为

$$Z_t = \frac{\Delta \lambda}{\Delta P} \frac{\Delta T}{\Delta \lambda}. \tag{2}$$

将测得的 $\frac{\Delta \lambda}{\Delta T}$, $\frac{\Delta \lambda}{\Delta P}$ 代入(2)式中,就可以得到两种不同结构的 VCSEL 单管的热阻。对于辐射桥结构的器件 $\frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = 0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $\frac{\Delta \lambda}{\Delta P} = 0.117 \text{ nm}/\text{mW}$,

则其热阻 Z_t 为 $1.95 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mW}$,同理可得传统结构器件的热阻为 $2.25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mW}$ 。表明辐射桥结构同传统结构相比可以降低器件的热阻,改善器件的热特性,和理论预期的结果相吻合。

图 6 为辐射桥结构 VCSEL 的发射光谱及光场分布图,图中可以得出 VCSEL 发射中心波长为 977 nm ,具有较好的单色性。器件的三维、二维和一维光场分布均匀,输出光束近似高斯光束,具有良好的模式特性。

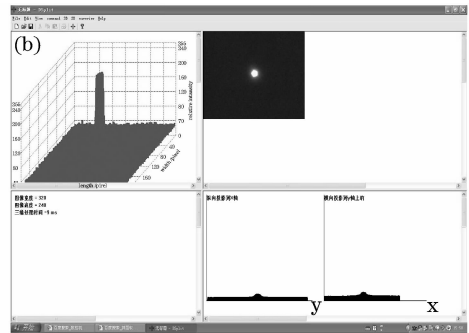
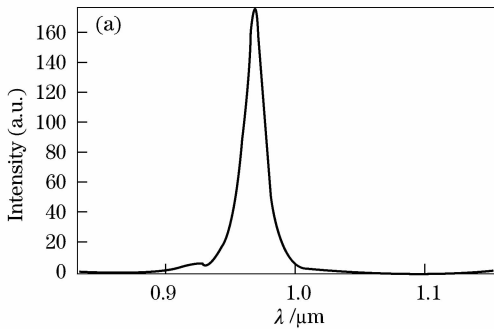


图 6 辐射桥结构 VCSEL 的发射光谱(a)及光场分布图(b)

Fig. 6 Spectrum (a) and the nearfield distribution (b) of radiate bridge structure VCSEL

4 结 论

研制了新型辐射桥结构的垂直腔面发射半导体激光器。对同一外延片采用相同工艺制备的两种结构 VCSEL 的对比测试表明,辐射桥结构的 VCSEL 与传统面发射激光器相比,可以降低 P 型分布布拉格反射镜体电阻,减小器件的焦耳热;形成良好的发散散热通道,增大散热面积,减小热阻,改善 VCSEL 器件的热特性与激光输出模式,进而降低功耗。该结构是提高器件的电光转换效率,探索获取高性能 VCSEL 器件的新途径。这种结构适用于在目前已知的垂直腔面发射半导体激光器 P 面出光(正装),

N 面出光(倒装)和扩展腔多种面发射半导体激光器中应用。

参 考 文 献

- 1 K. Iga, F. Koyama, S. Kinoshita. Surface emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, 24 (9):1845~1855
- 2 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(5):641~645
李 特,宁永强,孙艳芳等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量 [J]. *中国激光*, 2007, 34(5):641~645
- 3 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedbacks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004,

- 31**(12):1450~1454
李孝峰, 潘 炜, 罗 斌 等. 多次外光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(12):1450~1454
- 4 Ma Jianli, Hao Yongqin, Zhong Jingchang *et al.*. Study on stability of selective oxidation in vertical cavity surface emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1055~1058
马建立, 郝永芹, 钟景昌 等. 垂直腔面发射激光器中选择性氧化工艺稳定性研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(8):1055~1058
- 5 Hao Yongqin, Liu Wenli, Zhong Jingchang *et al.*. A new process in fabrication of vertical-cavity surface emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):443~446
郝永芹, 刘文莉, 钟景昌 等. 垂直腔面发射激光器制作新工艺[J]. 中国激光, 2006, **33**(4):443~446
- 6 D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar *et al.*. Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(1):97~99
- 7 M. H. MacDougall, P. D. Dapkus, V. Pudikov *et al.*. Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers with AlAs oxide-GaAs distributed Bragg reflectors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(3):229~231
- 8 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
- 9 M. G. Peters, B. J. Thibeault, D. B. Young *et al.*. Bond gap engineered digital alloy interfaces for lower resistance vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(25):3411~3414
- 10 Te Li, Yongqiang Ning, Yanfang Sun *et al.*. Temperature dependent characteristics of 980 nm two-dimensional bottom emitting VCSEL arrays[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1):156~158
- 11 M. Tomoyuki, N. Tomohiro, K. Yoshihiro *et al.*. Thermal resistance reduction of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers by thickness-modulated distributed Bragg reflector [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(8):6772~6776
- 12 Hou Shihua, Zhao Ding, Sun Yongwei *et al.*. Thermal characteristics of VCSELs [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(4):805~811
侯识华, 赵 鼎, 孙永伟 等. 垂直腔面发射激光器的热学特性 [J]. 半导体学报, 2005, **26**(4):805~811
- 13 Zhao Ding, Lin Shiming. Analysis of stable heat characteristics in VCSEL[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(1):21~24
赵 鼎, 林世鸣. VCSEL 稳态热特性分析[J]. 光电子 • 激光, 2004, **15**(1):21~24
- 14 C. Wilmsen, H. Temkin, A. Larry. Vertical-cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization, and Applications[M]. New York: Cambridge University Press, 1999
- 15 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
- 16 R. Pu, C. W. Wilmsen, K. M. Geib *et al.*. Thermal resistance of VCSELs bonded to integrated circuits [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12):1554~1556