

文章编号:1004-4213(2010)01-0001-5

径向桥电极高功率垂直腔面发射激光器*

侯立峰^{1,2}, 钟钢¹, 赵英杰¹, 王玉霞¹, 郝永芹¹, 冯源¹, 姜晓光¹, 谢浩瑞¹

(1 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 中国人民解放军装甲兵技术学院, 长春 130117)

摘要:为改善高功率垂直腔面发射半导体激光器的热特性,提高它的输出功率,研制了新型径向桥电极高功率垂直腔面发射半导体激光器器件.对新型半导体激光器的结构模型进行理论分析表明,采用径向桥式电极可以降低器件 P 型 DBR 电阻,减小焦耳热;降低热阻,提高器件的散热能力.实验制备了出光孔径同为 200 μm 的径向桥电极与常规电极的高功率垂直腔面发射半导体激光器,并对器件的性能进行了实验对比测试.结果表明径向桥电极高功率垂直腔面发射半导体激光器器件的微分电阻为 0.43 Ω ;室温下最大输出功率可达 340 mW,是常规电极垂直腔面发射半导体激光器的 1.7 倍;器件的热阻为 0.095 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$,在 80 $^{\circ}\text{C}$ 时,仍能正常激射,具有良好的热特性,径向桥电极高功率垂直腔面发射半导体激光器的光电特性与温度特性要远好于常规电极的高功率垂直腔面发射半导体激光器器件.

关键词:高功率半导体激光;垂直腔面发射激光器;径向桥;热拐点

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0001

0 引言

与传统的边发射半导体激光器相比,垂直腔面发射半导体激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) 具有较小的远场发散角、圆形光斑、易于实现单纵模工作和二维集成等优点,使其在光通讯、光互连及光集成等方面有着广泛的应用前景^[1-2],因此受到人们的普遍关注.关于 VCSEL 的研究已经成为当前光电子领域最活跃的研究课题之一^[3-4].随着高功率半导体激光器在光泵浦、医疗、材料处理、自由空间通信等领域的广泛应用,近年来高功率 VCSEL 的研究也得到了重视与发展.但目前高功率 VCSEL 的单管与阵列器件的输出功率仍远不及传统的大功率边发射激光器,这主要是由于 VCSEL 的谐振腔普遍采用分布布喇格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 结构, DBR 的引入增大了 VCSEL 内部焦耳热^[5],使面发射激光器件在热特性方面远逊于边发射激光器. VCSEL 器件内部产生的大量的焦耳热使器件的阈值增加,导致器件的输出功率下降,热问题已经成为制约高功率 VCSEL 发展的关键难题之一.

目前国内外研制高功率 VCSEL 普遍采用的是

N 面底出光、P 面加热沉的器件结构^[6-7],这种结构可增大对 VCSEL 内部的主要焦耳热源-P 型 DBR 的散热能力.本文在该种结构基础上,研究并设计了新型径向桥电极高功率 VCSEL,即将 P 面常规的圆形电极,改为径向桥电极.理论分析径向桥电极高功率 VCSEL 结构模型表明,该结构不仅可以降低高功率 VCSEL DBR 电阻,减小焦耳热,而且可降低器件的热阻,增加散热,从而改善器件的热特性,提高器件的输出功率.同时采用相同的材料与工艺,实验制备了出光孔径均为 200 μm 的径向桥电极与常规电极两种高功率 VCSEL 器件并进行了器件性能的对比测试,测试结果表明径向桥电极的高功率 VCSEL 热特性良好,器件的光电性能与温度特性都远优于常规电极的高功率 VCSEL 器件.

1 器件结构模型与制备

研究表明 VCSEL 内部的 P 型 DBR 的电阻远大于 N 型 DBR 的电阻,器件内部的焦耳热主要来源于 P 型 DBR 产生的焦耳热.为了解决高功率 VCSEL 器件的热问题,从减少器件内部生热、增加器件的散热角度出发,提出并设计了高功率 VCSEL 电极的新型径向桥结构,即将 N 面底出光高功率 VCSEL P 面注入电极由常规的圆形电极改为径向桥式电极,如图 1.

* 国家自然科学基金(60676059)和吉林省科技发展计划项目(20080331)资助

Tel:13943033120

Email:houlifeng5988@sina.com

收稿日期:2008-10-29

修回日期:2009-04-17

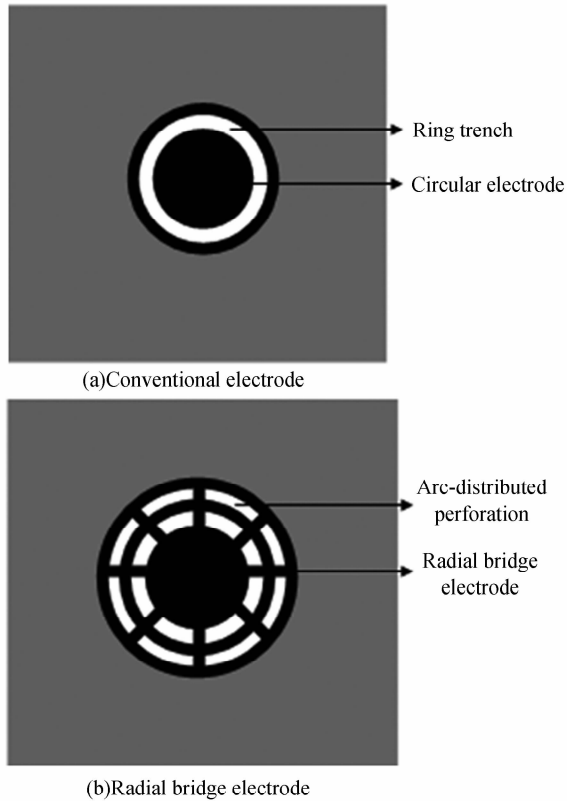


图 1 高功率 VCSEL 电极示意图
Fig. 1 Sketches of high-power VCSEL electrode

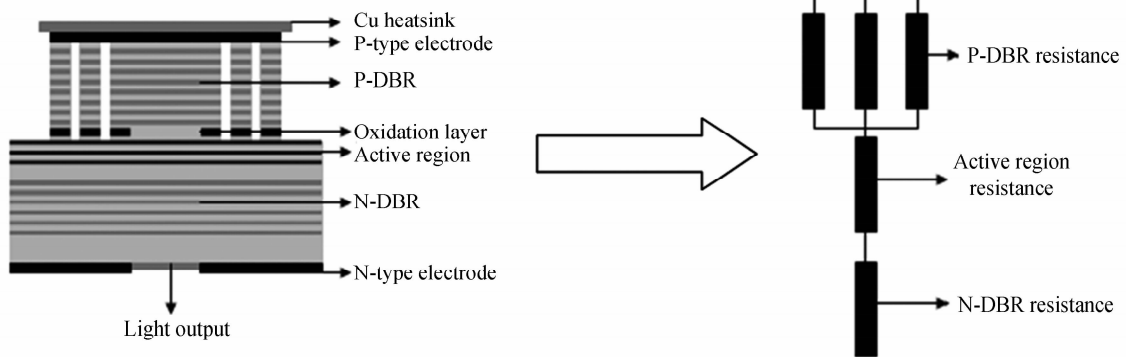


图 2 径向桥电极高功率 VCSEL 结构及其等效电阻示意图
Fig. 2 Sketches of radial bridge electrode high-power VCSEL structure and its equivalent resistance

器件内部的热源中心在有源区,热量由 P-DBR 传导到热沉散出. 设有源区的温度为 T , 热沉温度为 T_0 , 忽略其他散热方式, 依据热传导理论则有

$$T - T_0 = R_t Q \quad (1)$$

式中 R_t 为热传导热阻, Q 为热流. 式(1)可以和电学中的欧姆定律公式 $V = RI$ 相类比, 温差 $T - T_0$ 相当于电位差 V , 热流 Q 相当于电流 I , 则热阻 R_t 相当于电阻 R , 在 VCSEL 器件中热阻 R_t 与体电阻具有相似的性质. 因此采用径向桥式电极, 增大了 P-DBR 区热传导面积, 同体电阻一样, P-DBR 区的热阻也由三个支路的热阻并联而成, 因此器件的总热阻降低, 增强了器件的热传导能力.

为了更好地研究径向桥式电极对改善高功率

常规电极高功率 VCSEL 的电流由圆形电极注入, 圆形电极与环形引导极间的环形沟槽充当氧化窗口; 径向桥电极高功率 VCSEL 电流直接由径向桥式电极注入, 径向桥路间的弧形分布孔充当氧化窗口. 采用该电极结构可降低器件的 P 型 DBR 电阻, 图 2 为径向桥电极高功率 VCSEL 的结构及等效电阻示意图.

由图 2 可以看出: 由于径向桥状导电通道的存在, 中间的圆形电极与两个环形电极相连, 使 P 面的导电面积增大, 势必引起电阻的减小; 同时在制备器件时, 各个弧形氧化孔的腐蚀深度均达到有源区, 通过内部外延桥路有源区附近的 P-DBR 相连, 因此在注入电极与有源区之间形成三个支路, 相当于在常规结构的圆形电极与有源区间的电阻并联两个环形电极与有源区间的电阻, 从而使总的 P 型 DBR 电阻下降. 而 VCSEL 的总电阻为 P 型 DBR、有源区、N 型 DBR 串联电阻之和, 因此器件总的体电阻减小, 器件内部产生的焦耳热降低.

高功率 VCSEL 内部的热量主要靠热传导散热, 采用径向桥式电极结构可以降低热阻, 提高热传导能力. 图 2 为径向桥高功率 VCSEL 的结构图, 设

VCSEL 器件性能方面的作用, 本文采用相同的材料与工艺制备了常规电极和径向桥电极两种高功率 VCSEL 器件. 制备器件的外延片采用 MOCVD 系统生长而成, 其结构包括由其中包含 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱^[8]组成的有源层; 由 31.5 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 组成的 P-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 N-DBR, DBR 反射谱的中心波长设计为 980 nm. 有源区与 P-DBR 之间插入一层 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层以便进行湿法氧化. 具体的制作工艺为: 首先在外延片的台面上按照图 1 所示的两种电极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℃ 下进行氧化,以实现良好的光电限制.然后镀 SiO₂ 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-Ni-Au 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,制成两种电极的高功率 VCSEL 单管器件.

2 器件性能测试与分析

采用半导体激光器综合特性测试仪在室温(24℃)下对两种电极的高功率 VCSEL 器件连续工作的伏安(V-I)特性与光电(P-I)特性进行测试,结果如图 3.

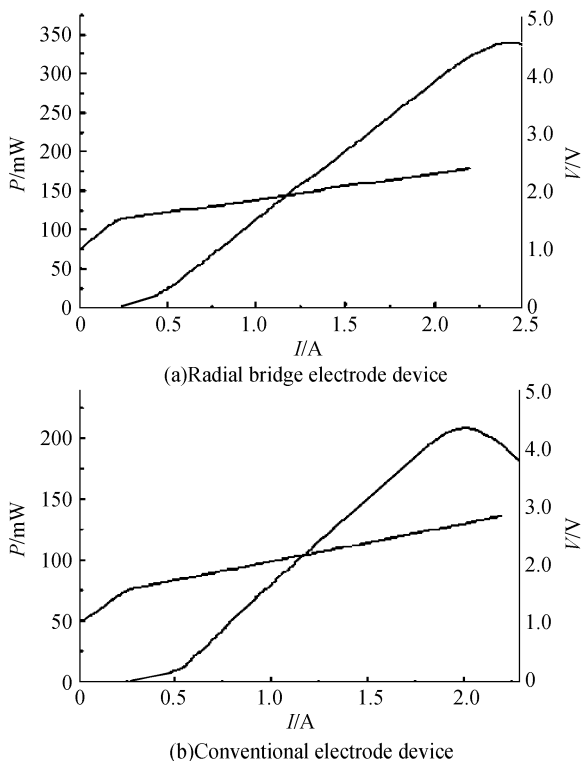


图 3 高功率 VCSEL 单管的 $P-I-V$ 特性曲线
Fig. 3 The $I-P-V$ characteristics curves of high-power VCSEL

由伏安(V-I)特性曲线,可以算得两种管子的微分电阻,其中径向桥电极器件的微分电阻为 0.43 Ω,常规电极器件的微分电阻为 0.64 Ω,径向桥高功率 VCSEL 体电阻比常规结构大幅下降,器件的焦耳热也将随之下降.从光电(P-I)特性曲线可以得出径向桥电极 VCSEL 的阈值电流为 390 mA,而常规电极的 VCSEL 的阈值电流为 500 mA,径向桥电极的器件在驱动电流 2.45 A 时,由于热效应达到热拐点,此时的最大输出功率为 340 mW;而常规电极器件在 2 A 时,即达到热拐点,最大输出功率仅为 208 mW.以上结果表明径向桥电极的高功率

VCSEL 器件与常规电极的器件相比,具有良好的热特性与光电特性.

本文采用自行研制的 VCSEL 温度特性测试装置^[9]对两种电极结构的器件分别在 20℃~80℃ 温度下的(P-I)特性进行测试,测试结果如图 4.

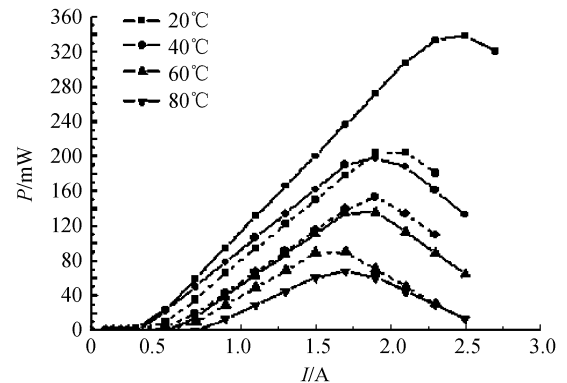


图 4 不同温度下高功率 VCSEL 的 $P-I$ 特性曲线
Fig. 4 The $P-I$ characteristic curves of high-power VCSEL under different temperatures

图 4 中实线为径向桥电极器件,虚线为常规电极器件.由图看出两种电极结构高功率 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.径向桥电极的高功率 VCSEL 具有更好的温度特性,在 80℃ 时仍能工作,60℃ 时最大输出功率可达到近 143 mW,该结构的器件热特性良好.

在高功率 VCSEL 器件内部的散热方式主要以热传导为主,器件散热能力可以用热阻来描述,为研究器件的热特性需要测量 VCSEL 的热阻.依据半导体激光器的热效应理论,式(1)中的热阻 R_t 可以改写为^[10]

$$R_t = \Delta T / \Delta P \quad (2)$$

式(2)可写成

$$R_t = (\Delta \lambda / \Delta P) (\Delta T / \Delta \lambda) \quad (3)$$

式中 $\Delta \lambda / \Delta P$ 表示 VCSEL 的波长随注入电功率变化速率; $\Delta T / \Delta \lambda$ 表示 VCSEL 的波长随温度变化发生红移的速率倒数.图 5 为驱动电流为 1.8 A 时,采

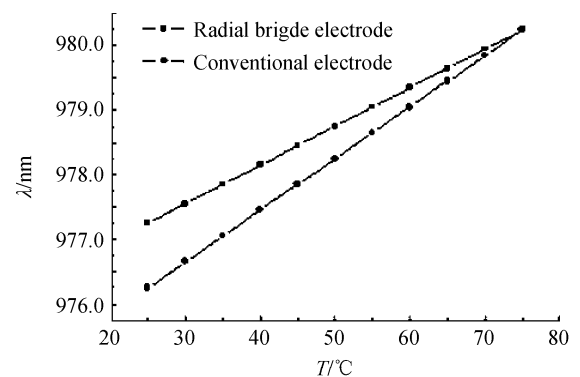


图 5 两种电极高功率 VCSEL 波长随温度的变化
Fig. 5 The wavelength vs the temperatures for two kinds of high-power VCSEL

用温度特性测试装置测得两种结构的 VCSEL 波长随温度的变化关系,由图 5 可看出随温度的增加,波长发生红移,两种器件随温度的红移速率 $\Delta\lambda/\Delta T$ 分别 0.08 nm/°C 和 0.11 nm/°C,表明径向桥电极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电极结构的 VCSEL 波长随注入电功率的变化曲线,如图 6. 随着注入电功率的增大导致器件内部产生的焦耳热增加,引起器件的波长红移.从图 6 中可以算得两种电极结构的 VCSEL 随注入电功率增加的红移速率 $\Delta\lambda/\Delta P$ 分别为 0.007 6 nm/mW、0.013 8 nm/mW,结果表明径向桥电极的 VCSEL 具有较好的热稳定性.

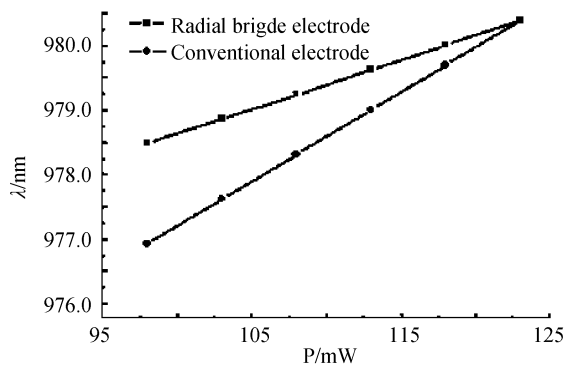


图 6 两种电极高功率 VCSEL 波长随注入功率的变化
Fig. 6 The wavelength vs the input electrical power for two kinds of high-power VCSEL

将测得的 $\Delta\lambda/\Delta T$ 、 $\Delta\lambda/\Delta P$ 代入式(3)中,就可以得到两种电极结构的高功率 VCSEL 的热阻.对于径向桥电极的器件热阻为 0.095 °C/mW,而常规电极器件的热阻为 0.125 °C/mW.径向桥电极高功率 VCSEL 同常规电极高功率 VCSEL 相比具有较强的散热能力,这和理论预期的结果相吻合.

3 结论

在理论分析径向桥电极对改善高功率 VCSEL 器件的热特性与提高器件的输出功率具有重要作用的基础上,制备了相同出光孔径的新型径向桥电极与常规电极两种高功率 VCSEL 器件,并进行了性能对比测试,测试结果表明采用径向桥电极的 VCSEL 结构可以降低高功率 VCSEL 器件的体电阻,减少焦耳热;同时可以减小热阻,增强器件的散热能力,大大改善高功率 VCSEL 器件的热特性与光电特性,提高器件的输出功率.在研制高功率

VCSEL 中采用径向桥电极,同时增大出光孔径、优化热沉工艺或制成激光器阵列器件,相信器件的输出功率会得到更大的提高,径向桥式电极会成为研制高功率、高性能 VCSEL 的一种新途径.

参考文献

- [1] BLIXT P, BABIC D, STREUBEL K, *et al.* Single-mode 1GB/s operation of double-fused vertical-cavity lasers at 1.54 μm [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, **8**(5):700-702.
- [2] WANG Ying-long, ZHENG Yun-long, WU De-qi, *et al.* The influence of the shell on the modal threshold gain of cylindrical and oxide-confined VCSEL[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):16-19.
王英龙, 郑云龙, 武德起, 等. 外包壳对具有氧化孔径层的圆柱形 VCSEL 阈值增益的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):16-19.
- [3] WIEDENMANN D, KING R, JUNG C, *et al.* Design and analysis of single-mode oxidized VCSEL's for high-speed optical interconnects[J]. *IEEE J Select Topics in Quantum Electron*, 1999, **5**(3):503-511.
- [4] CHOW W W, CHOQUETTE K D, CRAWFORD M H, *et al.* Design, fabrication, and performance of infrared and visible VCSELs[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(9):1810-1823.
- [5] ZHAO Y G, MCINERNEY J G. Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, **31**(9):1668-1678.
- [6] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(2):210-216.
- [7] WANG Qing, CAO Yu-lian, HE Guo-rong, *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.
- [8] LIU Li-xin, ZHAO Hong-dong, NIU Han-ben. Influences of N-DBR and double oxide-confined regions on the characteristics of electrical, optical and thermal fields in VCSEL [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):325-329.
刘立新, 赵红东, 牛憨笨. N-DBR 和双氧化限制层对 VCSEL 电、光、热特性的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):325-329.
- [9] ZHANG Yong-ming, ZHONG Jing-chang, ZHAO Ying, *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.
- [10] WIPIEJEWSKI T, PETERS M G, THIBEAULT B J, *et al.* Thermal resistance of etched-pillar vertical-cavity surface-emitting laser diodes[C]. *SPIE*, 1996, **2691**:171-182.

High-power VCSEL with Radial Bridge Electrodes

HOU Li-feng^{1,2}, ZHONG Gang¹, ZHAO Ying-jie¹, WANG Yu-xia¹,
HAO Yong-qin¹, FENG Yuan¹, JIANG Xiao-guang¹, XIE Hao-rui¹

(1 National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and
Technology, Changchun 130022, China)

(2 Armor Technique Institute of PLA, Changchun 130117, China)

Abstract: The novel high-power vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) with radial bridge electrode is fabricated in order to improve the thermal characteristics and increase the out power of high power VCSEL. The analysis on the model of the high-power VCSEL shows the radial bridge electrode can reduce the electric and thermal resistance and the Joule heat of VCSEL. The radial bridge electrode and the conventional electrode high power VCSEL both with 200 μm aperture are made and tested comparatively. The testing results show that the differential resistance of the VCSEL is 0.43 Ω and the out power is 340 mW, 1.7 times higher than the conventional device, which can operate at higher up to 80 $^{\circ}\text{C}$, and its thermal resistance is 0.95 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$. The temperature and opto-electric characteristics of radial bridge electrode high power VCSEL are much better than those of the conventional electrode high power VCSEL.

Key words: High-power semiconductor laser; VCSEL; Radial bridge; Thermal rollover



HOU Li-feng was born in 1971. He is now a Ph. D. degree candidate at Changchun University of Science and Technology, and his main research interests focus on VCSELs.



ZHONG Jing-chang was born in 1938. He is now a professor at Changchun University of Science and Technology, and his research interests focus on physical electronics and photo-electronics.