

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

于洪岩 尧舜 张红梅 王青 张杨 周广正 吕朝晨 程立文 郎陆广 夏宇 周天宝 康联鸿 王智勇 董国亮

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

Yu Hong-Yan Yao Shun Zhang Hong-Mei Wang Qing Zhang Yang Zhou Guang-Zheng Lü Zhao-Chen Cheng Li-Wen Lang Lu-Guang Xia Yu Zhou Tian-Bao Kang Lian-Hong Wang Zhi-Yong Dong Guo-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 064207 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181822

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[高速850 nm垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长](#)

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 75(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

[1550 nm垂直腔面发射激光器的特征参量随温度的变化](#)

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2018, 75(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

[1550nm垂直腔面发射激光器自旋反转模型中关键参量数值的实验确定](#)

Experimental determination of key parameters in the spin-flip model of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2016, 73(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.65.124203>

[基于两正交互耦1550 nm垂直腔面发射激光器获取多路随机数](#)

Multi-channel physical random number generation based on two orthogonally mutually coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 75(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

[可变偏振光注入下1550nm垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性](#)

Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection

物理学报. 2016, 73(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.65.164204>

940 nm 垂直腔面发射激光器的设计及制备

于洪岩¹⁾ 尧舜^{1)†} 张红梅¹⁾ 王青¹⁾ 张杨²⁾ 周广正¹⁾ 吕朝晨¹⁾
程立文³⁾ 郎陆广¹⁾ 夏宇²⁾ 周天宝²⁾ 康联鸿²⁾ 王智勇¹⁾ 董国亮²⁾

1) (北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

2) (华芯半导体科技有限公司, 泰州 225300)

3) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2018年10月9日收到; 2018年11月23日收到修改稿)

利用 PICS3D 计算得到 InGaAs/GaAsP 应变补偿量子阱的增益特性, 得到量子阱的各项参数, 再通过传输矩阵理论和 TFCalc 膜系设计软件分别仿真出上下分布式布拉格反射镜的白光反射谱. 采用金属有机化合物气相沉积技术外延生长了垂直腔面发射激光器结构, 之后通过干法刻蚀、湿法氧化以及金属电极等芯片技术制备得到 8 μm 氧化孔径的 VCSEL 芯片. 最终, 测试得到其光电特性实现室温下阈值电流和斜效率分别为 0.95 mA 和 0.96 W/A, 在 6 mA 电流和 2 V 电压下输出功率达到 4.75 mW, 并测试了 VCSEL 的高温特性.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 分布式布拉格反射镜, 量子阱, 金属有机化合物气相沉积

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.68.20181822

1 引言

从 940 nm 半导体激光器研制以来, 有很多研究者专注于高功率和高亮度的研究. 2007 年, Fiebig 等^[1] 实现了 940 nm 半导体激光器超过 100 W 的准连续输出. 2011 年, Berk 等^[2] 研制了 940 nm 半导体激光器抽运的准连续激光器, 实现 200 W 的输出功率. 然而, 近年来由于三维 (3D) 摄像头的迅速发展, 940 nm 垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 成为了新的研究热点^[3,4]. 940 nm VCSEL 由于具有转换效率高、斜效率高、易于集成及分辨率高和避免红暴的特性成为了 3D 摄像头的理想光源, 并有望被应用到虚拟现实、增强现实及汽车辅助驾驶中. 多样的应用需求吸引了更多的研究者投入到 VCSEL 的研究中, 其中一些公司例如 Avago, Finisar, Princeton Optronics 和 Lumentum 已经积累了大

量的 VCSEL 方面的专利^[5-8]. 尤其是 Princeton Optronics 公司, 一直在 940 nm VCSEL 方面处于领先地位, 已经达到了室温下斜效率 1.1 W/A. 在国外高校中, 乌尔姆大学以及查尔姆斯理工大学在 VCSEL 领域也做了大量的研究^[9-12]. 在国内, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在大功率 980 nm VCSEL 方面取得了突出成果^[13-15], 北京工业大学在高速 850 nm VCSEL 方面也积累了大量的经验^[16-19]. 但目前国内 940 nm VCSEL 的研究还处于萌芽状态, 相对于应用在光通信的 850 nm VCSEL 来说, 由于波长的增加, 需要 In 含量更多的阱层材料以减小禁带宽度, 实现 940 nm 波长的光输出, 从而导致失配更加严重. 因此必须对量子阱进行改进设计, 以满足 940 nm VCSEL 的应用需求. 而相对大功率的 980 nm VCSEL 而言, 940 nm VCSEL 的氧化孔径要小几十分之一. 所以综上所述, 需要对 940 nm VCSEL 的外延结构进行改进设计以制作得到 VCSEL 芯片.

† 通信作者. E-mail: yaoshun_bjut@126.com

基于 940 nm VCSEL 的不同应用要求, 斜效率成为了最为重要的指标之一. 本文中, 有源区采用 InGaAs/GaAsP 应变补偿多量子阱 (MQWs), 相较普遍采用的 InGaAs/AlGaAs MQWs, 应变补偿 MQWs 由于应变补偿的作用具有以下两个优点; 第一, 可以生长 In 含量更大的阱层材料, 以提高 MQWs 的微分增益和满足更高的工作温度要求; 第二, 可以生长更多对数的 MQWs 以提高 VCSEL 的光功率. 通过 PICS3D 对 MQWs 增益特性进行计算, 以得到合适的量子阱中 In 的组分、阱层厚度及势垒中 P 的组分和垒层厚度. 分布式布拉格反射镜 (DBRs) 由高低折射率的两种材料堆叠组成, 并且在两种材料交界处加入渐变层以减小两种材料间的势垒尖峰, 从而达到减小 DBRs 的串联电阻的作用, DBRs 的反射率可达到 99% 以上. DBRs 的反射谱由 TFCalc 软件进行仿真计算. 根据仿真结果, 通过金属有机化合物气相沉积 (MOCVD) 对 MQWs 和 DBRs 进行生长, 在对这两部分优化生长后再对 VCSEL 全结构进行生长, 并通过芯片工艺制备得到 VCSEL 芯片.

2 设计及生长 MQWs 和 DBRs

有源区作为 VCSEL 的核心区域可以将电输入转化为光输出, 激光的激射波长、功率、阈值和斜效率都受有源区参数的影响. MQWs 的峰值增益波长与 VCSEL 全结构白光反射谱的腔模凹陷相对应, 否则可能导致不激射. 由于 VCSEL 工作时会导致温度上升出现波长红移现象, 所以将 MQWs 的峰值增益波长设计为 928 nm. 有源区由 5 对应变补偿量子阱组成, 其中阱层为 4.4 nm 的 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$, 垒层为 6.2 nm 的 $\text{GaAs}_{0.88}\text{P}_{0.12}$, 在 300 K 下, 计算得到阱层材料的压应变量为 1.1%, 垒层材料的张应变量为 -0.4%, 在应变补偿的作用下其应变量为 0.7%^[20,21]. 光功率可以通过增加量子阱对数的方法得到提高, 但是应力作用会限制生长量子阱的临界厚度, 而应变补偿量子阱可以在一定程度上增加其临界厚度, 以生长相对更多的量子阱. 通过 PICS3D 模拟的 MQWs 增益谱如图 1 所示, 其峰值增益波长在 928 nm 附近. 利用 MOCVD 对 MQWs 进行外延生长, 并通过光致发光光谱仪测得 MQWs 的光致发光 (PL) 光谱 (激光光源为 532 nm 的 Nd:YAG 激光器) 如图 2 所示, 可知其

PL 峰值波长在 927.9 nm 附近, 与 PICS3D 模拟的峰值增益波长匹配完好, 半高全宽 (FWHM) 为 17.1 nm 左右, 说明 MQWs 的生长质量较好. 图 3 为高分辨率 X 射线衍射 (HRXRD) 曲线, MQWs 的周期厚度可以通过以下方程进行计算:

$$D = \frac{\lambda}{2(\sin\theta_{L+1} - \sin\theta_L)}, \quad (1)$$

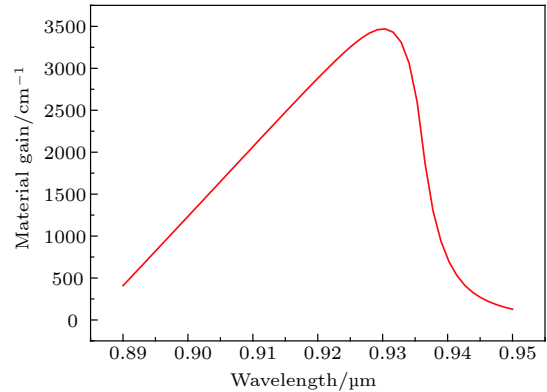


图 1 MQWs 材料增益特性曲线

Fig. 1. Material gain characteristics curve of MQWs.

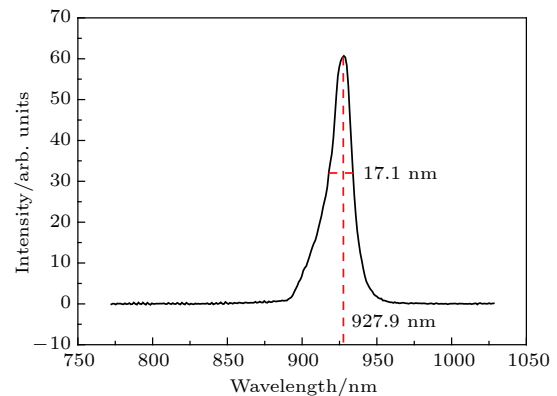


图 2 MQWs 的 PL 光谱

Fig. 2. The PL spectrum of MQWs.

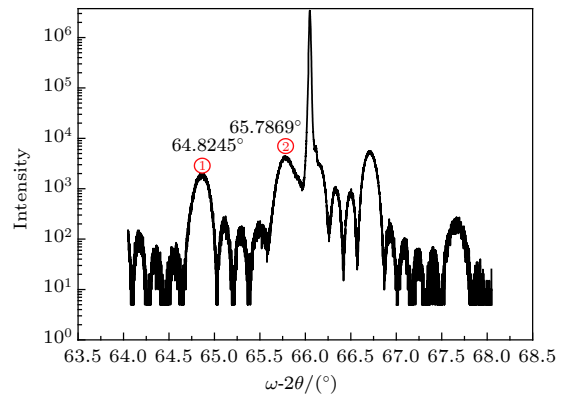


图 3 MQWs HRXRD 曲线

Fig. 3. The HRXRD curve of MQWs.

其中 λ 为 X 射线 (Cu 靶) 波长, θ 为衍射峰角度. 根据 (1) 式可计算得到外延生长 MQWs 的周期厚度为 10.858 nm, 与设计的周期厚度匹配程度较好.

位于谐振腔两侧的分别为 n-和 p-DBRs, 由于 VCSEL 的谐振腔腔长较短, 通过采用 DBRs 结构作为反射镜可以获得高反射率, 并起到减小腔镜损耗的作用. n-DBRs 由 28 对 AlAs/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 和 3.5 对 Al_{0.90}Ga_{0.10}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 组成, 位于谐振腔的下侧, p-DBRs 由 23 对 Al_{0.90}Ga_{0.10}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 组成, 位于谐振腔的上侧. 为降低 DBRs 的串联电阻, n-和 p-DBRs 的各层材料之间均插入 20 nm 的渐变层, 每层材料和渐变层的光学厚度之和为 $\lambda/4$ ($\lambda = 940$ nm). Al_xGa_{1-x}As 材料的折射率 n 由以下方程计算得到 [20]:

$$n(\lambda) = \sqrt{A_0 \left[f(x) + \frac{f(\chi_{S0})}{2} \left(\frac{E_0}{E_0 + \Delta_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + B_0}, \quad (2)$$

其中

$$f(x) = \frac{2 - \sqrt{1+x} - \sqrt{1-x}}{x^2}; \quad (3)$$

$$x = \frac{hc}{\lambda E_0}; \quad (4)$$

$$\chi_{S0} = \frac{hc}{\lambda(E_0 + \Delta_0)}, \quad (5)$$

在此方程中 Al_xGa_{1-x}As 的室温常量为: λ 是波长, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s 是普朗克常数, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s 是真空中光速, hc/λ 是光子能量;

$$A_0(x) = 6.3 + 19.0x; \quad (6)$$

$$B_0(x) = 9.4 - 10.2x; \quad (7)$$

$$E_0(x) = 1.425 + 1.155x + 0.37x^2 \text{ [eV]}; \quad (8)$$

$$E_0(x) + \Delta_0(x) = 1.765 + 1.115x + 0.37x^2 \text{ [eV]}. \quad (9)$$

通过计算可得, 在 940 nm 波长下 Al_{0.12}Ga_{0.88}As, Al_{0.90}Ga_{0.10}As 和 AlAs 的折射率 n 分别为 3.4795, 3.0342 和 2.9761; Al_{0.12}Ga_{0.88}As, Al_{0.90}Ga_{0.10}As 和 AlAs 的物理厚度为 67.54, 77.45 和 78.96 nm. 由于有 20 nm 渐变层的插入, 为保持高低折射率材料和渐变层的光学厚度之和为 $\lambda/4$, Al_{0.12}Ga_{0.88}As, Al_{0.90}Ga_{0.10}As 和 AlAs 的物理厚度应分别减小 18.64, 21.37 和 21.70 nm.

DBRs 的反射谱可以由以下传输矩阵进行计

算 [22,23]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中右侧第一个矩阵为第 j 层的特性矩阵, δ_j 和 η_j 分别为相位厚度和光学导纳; η_{k+1} 为出射介质的光学导纳. 当光垂直入射时, δ_j 和 η_j 可表示为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi} \right) d_j, \quad (11)$$

$$\eta_j = n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi}, \quad (12)$$

其中 λ 为入射波长; n_j , α_j 和 d_j 分别为第 j 层的折射率、吸收系数以及物理厚度. 反射率 R 可以通过以下方程计算得到:

$$R = \frac{(\eta_0 B - C)(\eta_0 B - C)^*}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}. \quad (13)$$

图 4 为 p-和 n-DBRs 的 PL 反射谱 (白光光源) 的模拟和实验结果, 中心波长为 938.7 nm, 并且 p-和 n-DBRs 的反射率分别约为 99.0% 和 99.7%. 模拟结果和实验结果高度符合.

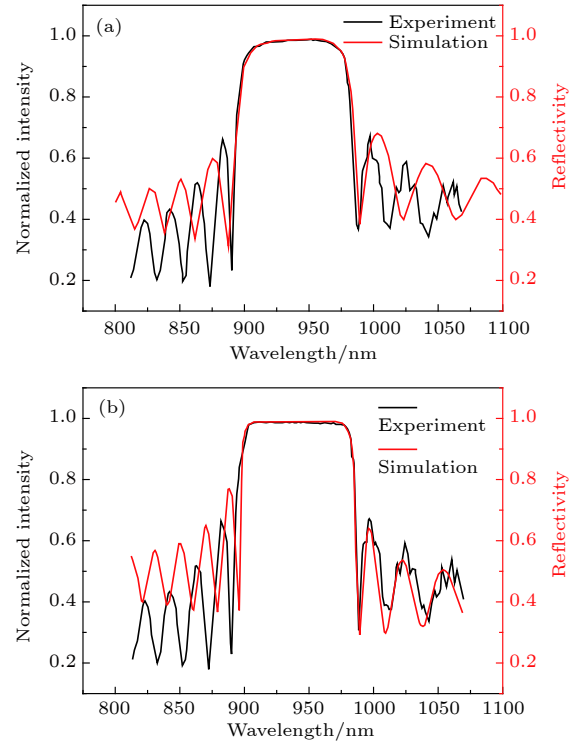


图 4 (a) p-DBRs PL 反射谱; (b) n-DBRs PL 反射谱

Fig. 4. (a) The PL reflection spectra of p-DBRs; (b) the PL reflection spectra of n-DBRs.

3 VCSEL 的制备与测试结果

图 5 为 VCSEL 的结构示意图, Spacer 层位于有源区的两侧, 氧化层为 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$. 顶部的 p 型接触层和底部的缓冲层均为 GaAs. 实验使用的为美国 Veeco 公司生产的 K475i 型 MOCVD 设备. VCSEL 外延结构生长在 4 寸 GaAs 衬底上. 图 6 为 VCSEL 外延片的 PL 白光反射谱, 其 F-P 腔模波长为 939.5 nm. 在外延生长之后, 通过干法刻蚀、湿法氧化、金属电极等工艺制备得到了 VCSEL 芯片. 在干法刻蚀过程中, 使用 BCl_3 和 Cl_2 将台面刻蚀, 刻蚀深度约为 3500 nm. 在湿法氧化过程中, 首先将氧化炉提前加热 15 min, 随后在 425 °C 下用 200 sccm (1 sccm = 1 mL/min) 的氮气进行氧化, 氧化速率为 0.40 $\mu\text{m}/\text{min}$, 氧化孔径大小为 8 μm . 在金属电极工艺中, 将 AuGeNi 合金溅射到 VCSEL 顶层制备得到 p 型欧姆接触层, 而 Ti/Pt/Au 被蒸镀到衬底的背面制备得到 n 型欧姆接触层, 随后在氮气氛围下在 350 °C 下进行快速退火形成良好的欧姆接触. 图 7 为 VCSEL 的台面和氧化层 SEM 照片, 可以清楚地看到刻蚀台面情况及氧化层的氧化深度. VCSEL 芯片金相

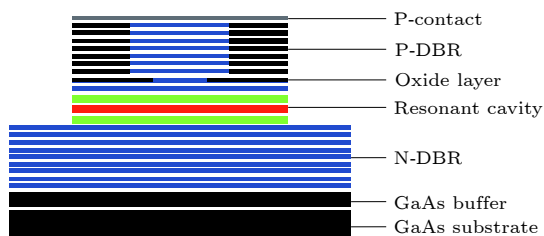


图 5 VCSEL 结构示意图

Fig. 5. Schematic diagram of VCSEL structure.

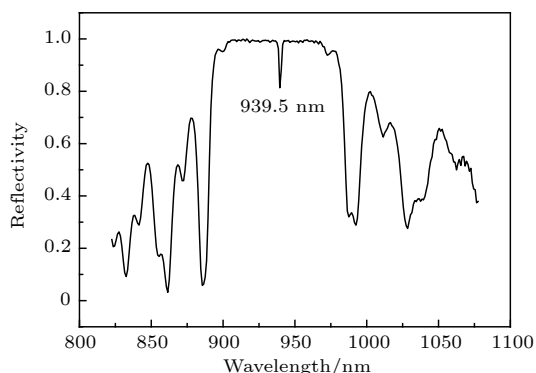


图 6 VCSEL 白光反射谱

Fig. 6. White light illuminant reflection spectrum of VCSEL.

显微镜照片如图 8 所示, 芯片为异面电极结构, 其中氧化孔径为 8 μm (红外光源电感耦合器件 (CCD) 可见).

生长完成的外延片被分为两个区域进行光电特性测试, 如图 9 所示. 根据实验经验, 生长过程中的误差会导致边缘区域误差相对更大, 所以区域 1 的光电特性相对更好, 而区域 2 则代表了外延片上的平均水平. 这里选择区域 1 中的 5 颗 VCSEL 芯片进行 $L-I-V$ 测试. 测试结果如图 10 所示, 这 5 颗 VCSEL 芯片有很好的—致性, 室温下阈值电流为 0.95 mA, 斜效率为 0.96 W/A, 在 6 mA 和 2 V 工作条件下其输出功率达到 4.75 mW.

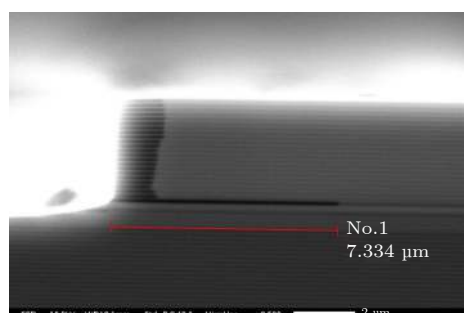


图 7 VCSEL 台面和氧化孔径图片

Fig. 7. The SEM image of VCSEL mesa and oxide aperture.

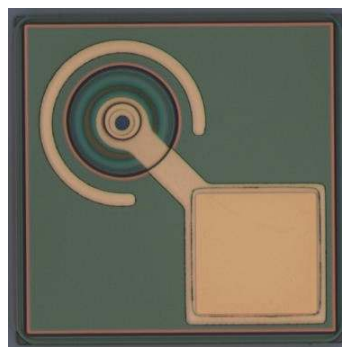


图 8 VCSEL 金相显微镜图片

Fig. 8. Microscopy image of VCSEL chip.

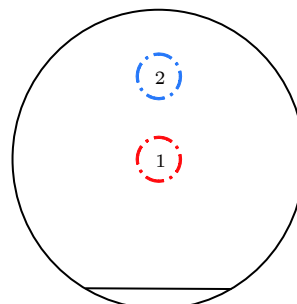


图 9 VCSEL 外延片区域示意图

Fig. 9. Diagrammatic of VCSEL wafer.

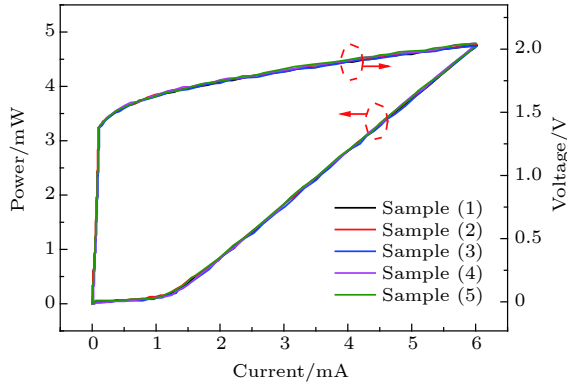


图 10 VCSEL 区域 1 的 $L-I-V$ 特性

Fig. 10. The $L-I-V$ characteristics of VCSEL in area 1.

在区域 2 中选取一颗 VCSEL 芯片进行测试, 图 11 所示为该芯片室温下不同电流下的光谱图, 激光波长为 944.5 nm. 在不同电流下其 FWHM 均保持在 1 nm 左右.

图 12 为区域 2 中 940 nm VCSEL 的变温 $L-I-V$ 特性曲线. 在 0—40 °C 温度区间, 阈值电流一直保持在 1 mA, 在 50 和 60 °C 阈值电流增加到 1.2 mA, 在 80 °C 时, 其阈值电流为 1.9 mA. 斜效率在 25 °C 时最大, 为 0.81 W/A, 在 0—50 °C 期间变化不明显, 在 80 °C 时, 斜效率最低, 为 0.57 W/A. 在光功率方面, 在 0, 25, 80 °C 时, 分别为 3.588, 3.850 和 2.323 mW. 在 0—50 °C 时由于采用应变补偿量子阱的原因使得电子很好地限制在量子阱中, 使得阈值电流、斜效率以及光功率变化很小. 但是随着温度的不断提高, 可以发现在 80 °C 时各项参数衰减严重, 主要原因是量子阱中电子获得能量泄漏, 导致微分增益下降, 并且在高温下其 DBRs 反射镜的反射率有一定下降, 并且损耗加大, 最终导致了其各项参数的降低. 图 13 为 VCSEL

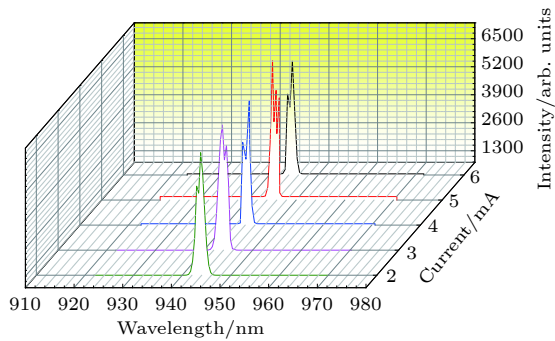


图 11 室温下不同电流的光谱图

Fig. 11. Emission spectra for VCSELs at various injection current at room temperature.

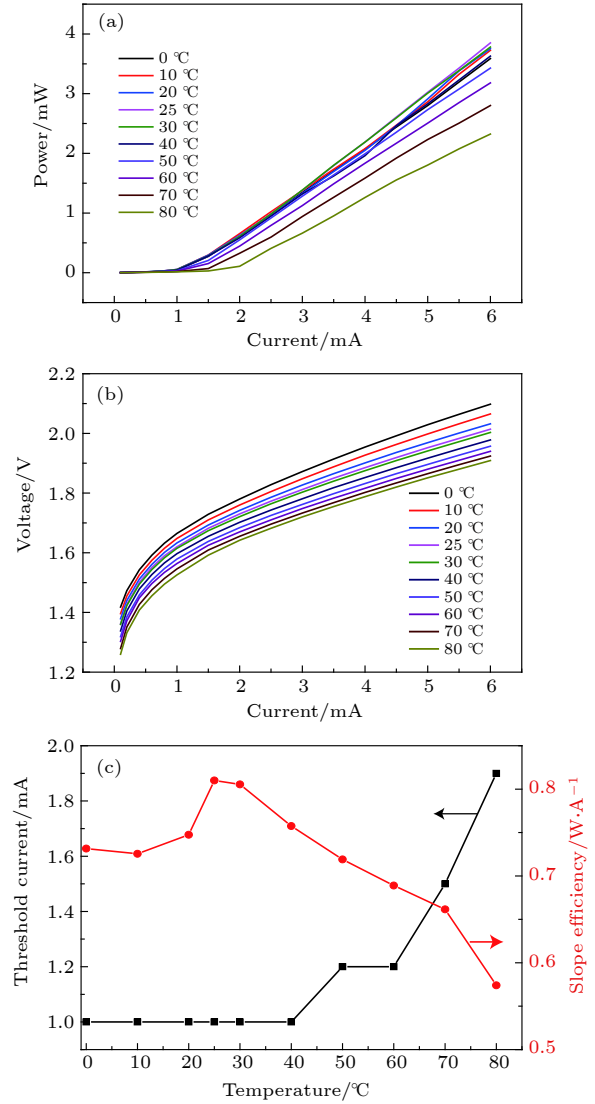


图 12 VCSEL 的 $L-I-V$ 特性曲线 (a) 光功率特性; (b) 电压电流特性; (c) 阈值电流和斜效率随温度变化

Fig. 12. The $L-I-V$ characteristics of VCSELs at various temperature: (a) Output power versus injection current; (b) voltage versus injection current; (c) the evolution of the threshold current and slope efficiency as a function of temperature.

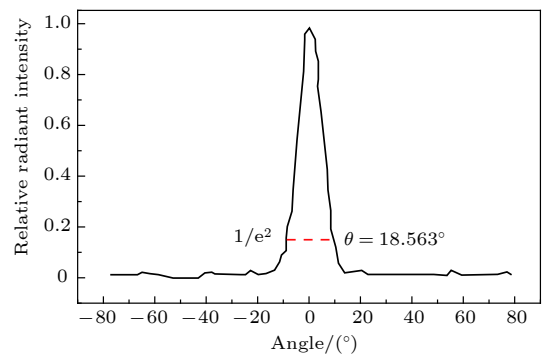


图 13 VCSEL 远场光斑与发散角

Fig. 13. Far field spot and divergence angle of VCSEL.

在 6 mA 工作电流下的远场光斑与发散角, 可以看出为对称高斯光束输出, 发散角为 18.563° .

4 总 结

本文研制了以 InGaAs/GaAsP 应变补偿量子阱作为有源区的 940 nm VCSEL, 通过自主 MOCVD 外延和芯片制备工艺得到 VCSEL 芯片. 在室温下, 其斜效率和阈值电流分别为 0.96 W/A 和 0.95 mA, 在 6 mA 和 2.0 V 工作条件下光功率达到 4.75 mW. 测试了同一片外延片的其他区域的 VCSEL 芯片的变温特性, 阈值电流和斜效率在 0—50 °C 范围内变化不明显, 在高温 80 °C 时, 阈值电流和斜效率分别为 1.9 mA 和 0.57 W/A, 光功率为 2.323 mW. 未来, 通过改进工艺, 以及优化关键参数会制备得到斜效率更大的 VCSEL 芯片, 以满足各类应用场景的需求.

参考文献

- [1] Fiebig C, Erbert G, Pittroff W, Wenzel H, Maaßdorf A, Einfeldt S, Tränkle G 2007 *Proc. SPIE* **6456** 64560K
- [2] Berk Y, Karni Y, Klumel G, Dan Y 2011 *The International Society for Optical Engineering* San Francisco, USA, February 2–5, 2011 p7918
- [3] Grunnet-Jepsen A, Swaminathan K, Keselman L M 2017 *US Patent* 14998253
- [4] Moench H, Gronenborn S, Gu X, Gudde R, Herper M, Kolb J, Miller M, Smeets M, Weigl A 2017 *SPIE Photonics West OPTO* San Francisco, USA, February 2–7, 2017 p7
- [5] Wang T K, Su C Y 2017 *US Patent* 14841569
- [6] Barve A V, Yuen A 2017 *US Patent* 15638813
- [7] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, Miglo A, Li D Z, Wang Q, Sundaresh M, Wilton S, Matheussen J, Ghosh C 2014 *SPIE Photonics West OPTO* San Francisco, USA, February 2–7, 2014 p14
- [8] Graham L A, Johnson R H, Guenter J K 2016 *US Patent* 14589392
- [9] Larsson A G, Haglund E P, Haglund E, Roelkens G, Gustavsson J, Baets R, Kumasi S 2017 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition* Los Angeles, USA, March 19–23, 2017 pW3E6
- [10] Pusch T, Lindemann M, Gerhardt N C, Hofmann M R, Michalzik R 2015 *Electron. Lett.* **51** 1600
- [11] Gadallah A 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1040
- [12] Haglund E, Gustavsson J S, Sorin W V, Bengtsson J, Fattal D, Haglund Å, Tan M, Larsson A 2017 *Proc. SPIE* **10113** 101130B
- [13] Wang Z F, Ning Y Q, Li T, Cui J J, Zhang Y, Liu G G, Zhang X, Qin L, Liu Y, Wang L J 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 239
- [14] Li T, Ning Y Q, Sun Y F, Cui J J, Qin L, Yan C L, Zhang Y, Peng B, Liu G G, Liu Y, Wang L J 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** S156
- [15] Li T, Ning Y Q, Sun Y F, Cui J, Hao E J, Qin L, Tao G T, Liu Y J, Wang L J, Cui D F 2007 *Chin. J. Las.* **34** 641 (in Chinese) [李特, 宁永强, 孙艳芳, 崔锦江, 郝二娟, 秦莉, 套格套, 刘云, 王立军, 崔大复 2007 *中国激光* **34** 641]
- [16] Lü Z C, Wang Q, Yao S, Zhou G Z, Yu H Y, Li Y, Lang L G, Lan T, Zhang W J, Liang C Y, Zhang Y, Zhao C F, Jia H F, Wang G H, Wang Z Y 2018 *Acta Opt. Sin.* **38** 514001 (in Chinese) [吕朝晨, 王青, 尧舜, 周广正, 于洪岩, 李颖, 郎陆广, 兰天, 张文甲, 梁辰余, 张杨, 赵春风, 贾海峰, 王光辉, 王智勇 2018 *光学学报* **38** 514001]
- [17] Zhou G Z, Yao S, Yu H Y, Lü Z C, Wang Q, Zhou T B, Li Y, Lan T, Xia Y, Lang L G, Cheng L W, Dong G L, Kang L H, Wang Z Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 104205 (in Chinese) [周广正, 尧舜, 于洪岩, 吕朝晨, 王青, 周天宝, 李颖, 兰天, 夏宇, 郎陆广, 程立文, 董国亮, 康联鸿, 王智勇 2018 *物理学报* **67** 104205]
- [18] Yu H Y, Yao S, Zhou G Z, Wang Q, Lan T, Lü Z C, Li Y, Lang L G, Zhou T B, Cheng L W 2018 *Opt. Quantum Electron.* **50** 171
- [19] Guo X, Dong J, He X Y, Hu S, He Y, Lü B S, Li C 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 133105
- [20] Adachi S 1998 *J. Appl. Phys.* **58** R1
- [21] Pearsall T P 1982 *GaInAsP Alloy Semiconductors* (New York: Wiley) p3
- [22] Chuang S L 2009 *Physics of Photonic Devices* (New York: Wiley) pp45–52
- [23] Surhone L M, Timpledon M T, Marseken S F 2010 *Thin-film Optics* (Hong Kong: Betascript) pp146–155

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

Yu Hong-Yan¹⁾ Yao Shun^{1)†} Zhang Hong-Mei¹⁾ Wang Qing¹⁾ Zhang Yang²⁾
 Zhou Guang-Zheng¹⁾ Lü Zhao-Chen¹⁾ Cheng Li-Wen³⁾ Lang Lu-Guang¹⁾ Xia Yu²⁾
 Zhou Tian-Bao²⁾ Kang Lian-Hong²⁾ Wang Zhi-Yong¹⁾ Dong Guo-Liang²⁾

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

2) (*Sino-Semiconductors Technologies Co., Ltd., Taizhou 225300, China*)

3) (*College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*)

(Received 9 October 2018; revised manuscript received 23 November 2018)

Abstract

A high slope efficiency vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is described. The InGaAs/GaAsP strain compensated multiple quantum wells (MQWs) are designed by PICS3D. The wavelength redshift occurs due to the thermal effect, the lasing wavelength of MQWs is designed to be around 928 nm. The active region consists of five compressively strained 4.4 nm thick In_{0.16}Ga_{0.84}As quantum wells separated and surrounded by 6.2 nm thick GaAs_{0.88}P_{0.12} tensile strained compensation layers to obtain the high quantum efficiency and ensure the stress release. Subsequently, the MQWs are grown by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and the photoluminescence (PL) spectrum is measured using an Nd:YAG laser (532 nm excitation), of which the peak wavelength is approximately 928 nm and the full width at half maximum is nearly 17.1 nm. The resonant cavity is surrounded by p- and n-DBRs. The n-DBRs are designed to be a 28-period AlAs/Al_{0.12}Ga_{0.88}As and 3.5-period Al_{0.90}Ga_{0.10}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As, and the p-DBR is designed to be a 23-period Al_{0.90}Ga_{0.10}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As. The thickness of each a material is $\lambda/4n$ ($\lambda = 940$ nm, n represents refractive index), and 20 nm graded layer is inserted in the interface between two types of materials. The p-/n-DBRs' experiment PL reflection spectra (using a white illuminant) are carried out, the central wavelength is around 938.7 nm, and the reflectivity values of p-/n-DBRs are nearly 99.0% and 99.7%, respectively. The VCSELs are grown by MOCVD technique, and treated by dry etching, wet oxidation, metal electrode technology and other processes. In the process of dry etching, the top mesa is treated by inductively coupled plasma with BCl₃ and Cl₂ chemistry. In order to expose the oxide layer the wet oxidized process is carried out, and the etching depth is nearly 3500 nm. An oxidation furnace is heated for 15 min prior to oxidation. Then the oxide aperture is shaped by the wet nitrogen oxidation furnace at 425 °C with an N₂ flow of 200 sccm, and the oxide rate is approximately 0.40 $\mu\text{m}/\text{min}$ for Al_{0.98}Ga_{0.02}As. The diameter of oxide aperture is made into an 8 μm diameter. In the process of metal electrode technology, AuGeNi alloy is sputtered on the top surface to form p-type ohmic contact, and Ti/Pt/Au is evaporated on the back surface of substrate to form an n-type ohmic contact. Rapid thermal annealing at 350 °C in a nitrogen atmosphere is carried out subsequently to obtain a good-quality ohmic contact. Finally, we test the VCSELs' L - I - V characteristics and spectra in different areas. In area 1, room-temperature lasing at around 940 nm is achieved with a threshold current of 0.95 mA, a slope efficiency of 0.96 W/A, and an output power of 4.75 mW. In area 2, threshold current is 1 mA, a slope efficiency is 0.81 W/A at 25 °C and threshold current is 1.9 mA, slope efficiency is 0.57 W/A at 25 °C. The output power values reach up to 3.850 mW and 2.323 mW at 25 °C and 80 °C, respectively.

Keywords: vertical cavity surface emitting lasers, distributed Bragg reflector, quantum well, metalorganic chemical vapor deposition

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.68.20181822

† Corresponding author. E-mail: yaoshun_bjut@126.com