

高功率密度多结级联 905 nm 垂直腔面发射激光器*

潘冠中 荀孟† 赵壮壮 孙昀 蒋文静 周静涛 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2022 年 5 月 6 日收到; 2022 年 6 月 23 日收到修改稿)

本文针对激光雷达等三维传感应用, 设计并制备了 905 nm 波长的高功率密度 5 结级联垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL). 制备的 5 结级联 VCSEL 单管 (氧化孔径 8 μm) 的功率转换效率高达 55.2%; 其最大斜率效率为 5.4 W/A, 约为相同孔径单结 VCSEL 的 5 倍. 窄脉冲条件下 (脉冲宽度为 5.4 ns, 占空比 0.019%), 5 结级联 19 单元 VCSEL 阵列 (单元孔径 20 μm) 的峰值输出功率达到 58.3 W, 对应的峰值功率密度高达 1.62 kW/mm². 对不同孔径器件 (8—20 μm) 的光电特性进行了测试和分析. 结果显示, 这些器件的最大斜率效率均大于 5.4 W/A, 最大功率转换效率均大于 54%. 这些高性能 VCSEL 器件可作为激光雷达等三维传感应用的理想光源.

关键词: 905 nm 垂直腔面发射激光器, 多结级联, 高功率密度, 三维传感**PACS:** 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg**DOI:** 10.7498/aps.71.20220888

1 引言

近年来, 三维 (three dimensional, 3D) 传感技术在消费电子、医疗、工业等领域的应用越来越重要^[1]. 传统的图像传感技术依赖环境光, 在昏暗的环境下和光束直接照射的情况下性能较差. 3D 传感技术不仅可以克服环境光的干扰, 而且能够采集深度信息, 实现环境分析, 具有更高的安全性和准确性^[2]. 因此, 3D 传感技术已经被广泛应用到人脸识别、激光雷达、机器人等诸多应用场景.

在 3D 传感技术中, 红外光源作为光发射器, 是必不可少的元件. 常用的红外光源主要包括红外发光二极管 (infrared light emitting diode, IR LED)^[3], 半导体边发射激光器 (edge emitting laser, EEL)^[4] 和垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)^[5]. 由于 IR LED 发射的是非相干光, 其发散角较大, 且光谱较宽 (约 30—40 nm), 与之匹配的滤波器带宽较大, 导致大量

环境光进入到探测器中, 造成信噪比降低. 与 IR LED 相比, EEL 和 VCSEL 都是相干光源, 具有较窄的光谱 (大约几个 nm), 从而可以获得较高的信噪比. 相对于传统的单结低功率 VCSEL, EEL 在功率转换效率 (power conversion efficiency, PCE)、人眼安全、以及远程测距等方面更有优势, 是目前激光雷达的主流光源. 但是, EEL 的制备和封装工艺较为复杂, 且无法在片测试, 制备成本较高. 与 EEL 平行于衬底出光不同, VCSEL 垂直于衬底出光, 不仅可以实现在片测试, 而且可以容易集成二维阵列, 通过控制阵列单元数目就可以实现出光功率的缩放, 对优化输出功率提供了很大的灵活性. 此外, VCSEL 还具有高可靠性、低制造成本、圆形光斑、温度稳定性高等优势. 因此, VCSEL 越来越受重视, 并正在逐渐成为激光雷达等 3D 传感应用的首选光源^[6–11].

然而, 由于传统 VCSEL 的增益区域较短, VCSEL 单管的输出功率通常小于 EEL 单管的输

* 国家自然科学基金 (批准号: 62104251, 62174178)、中国博士后科学基金 (批准号: BX20200358, 2021M703442)、中国科学院前沿科学重点研究计划 (批准号: ZDBS-LYJSC031) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2022115) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xunmeng@ime.ac.cn

出功率. 在许多 3D 传感应用中, 特别是中远程激光雷达, 高峰值脉冲功率、高功率密度和高功率转换效率是对光源的基本要求. 通常, 将 VCSEL 单管的出光孔径增大, 或将多个 VCSEL 单管集成到一个阵列中, 通过增加阵列发光单元的数目, 来提高输出功率^[12]. 但这些方法会增大 VCSEL 器件的发光面积, 不仅会降低光功率密度, 且会对后期的光束准直带来困难.

相比于传统的单结 VCSEL 器件, 多结级联 VCSEL 在外延生长过程中, 将多个有源区在同一个谐振腔内通过隧道结串联起来, 从而可以获得较大的增益^[13]. 在不增加芯片面积的情况下, 多结级联 VCSEL 的光输出功率相对于同孔径单结 VCSEL 的输出功率呈倍数提升, 不仅可以获得较高的功率密度, 而且能够大大地提高 VCSEL 器件的 PCE. 此外, 增益的提高可以降低多结 VCSEL 的工作电流, 从而减小驱动电路的功耗和成本, 也可以实现电压和电流的折中优化以提高驱动电路的兼容性.

目前, 多结级联技术已广泛应用在边发射半导体激光器中. Muller 等^[14]于 2007 年提出了激光波长为 940 nm 的 3 结级联激光器, 在脉冲电流下 (脉冲宽度 100 μ s, 占空比 1%) 得到的最大输出功率为 615 W, 斜率效率为 3.38 W/A. Boucher 等^[15]于 2009 年提出了 1550 nm 长波长的 3 结级联激光器, 峰值输出功率大于 37 W, 斜率效率是单结激光器的 2.5 倍. 多结级联 VCSEL 的相关研究主要集中在 20 世纪末和 21 世纪初. Kotaki 等^[16]在 1984 年最先提出了波长 1.22 μ m 的双结级联 VCSEL, 其阈值电流相比于单结器件减小了 1.4—

2.5 倍. Schmid 等^[17]于 1998 年在多结级联 VCSEL 中实现了大于 100% 的微分量子效率. 随后, 该课题组在 2001 年实现了 3 结级联 VCSEL, 在 9 mA 的电流下得到 7.2 mW 的输出功率, 微分量子效率达到 130%, 功率转换效率为 16%^[18]. Kim 等^[19]开展了关于 1.55 μ m 的多结级联 VCSEL 的研究, 设计的 3 结 VCSEL 在脉冲条件下实现了大于 100% 的微分量子效率. 近期, 本课题组研制了双结级联 905 nm VCSEL, 斜率效率 2.27 W/A, 接近单结 VCSEL 的 2 倍^[20]. 如今, 随着中远程激光雷达等应用对 VCSEL 器件提出了更高的功率需求, 许多 VCSEL 制造商如 Lumentum、Osram 等也加大了多结级联 VCSEL 的研发力度.

本文针对激光雷达等 3D 传感应用, 设计并制备了 905 nm 波长的高功率密度 5 结级联 VCSEL 器件, 并对多结 VCSEL 的设计、器件结构和输出特性进行了详细的分析和讨论.

2 器件设计和制备

本文设计的 5 结级联 VCSEL 器件的结构示意图如图 1(a) 所示, 由实际器件图中的 A-A' 方向截取得到. 采用金属有机物化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 首先在 GaAs 衬底上生长 40 对 N 型 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ / $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 分布布拉格反射镜 (N type distributed Bragg reflectors, N-DBRs). 接着, 在 N-DBRs 上方外延生长 5 个有源区, 每个有源区包含 3 对 6 nm 厚的 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 量子阱层和 8 nm 厚的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒层. 有源区之间通过厚度为 25 nm

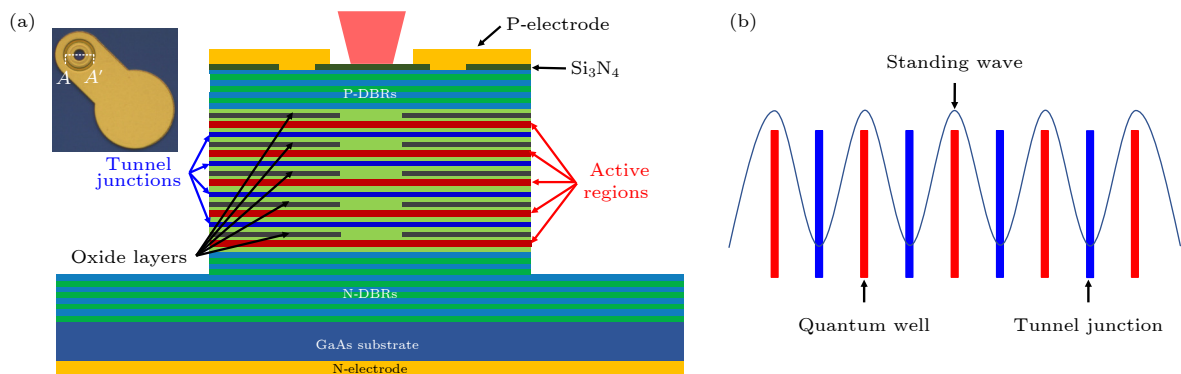


图 1 (a) 5 结级联 VCSEL 的结构示意图, 插图为制备得到的实际器件; (b) 驻波场中量子阱和隧道结的位置示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of five-junction cascade VCSEL structure, the inset is the top view of a fabricated device; (b) position diagram of quantum well and tunnel junction in standing wave.

的重掺杂 GaAs 隧道结连接起来. 需要注意的是, 由于隧道结掺杂浓度很高, 为了减小隧道结的光吸收损耗, 需要将隧道结置于驻波场的波节上; 而为了增大光增益, 需要将量子阱放置在驻波场的波腹处, 如图 1(b) 所示. 每个有源区上方均放置一层 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 高铝组分层, 利用湿法氧化将其外围氧化为绝缘的 AlO_x , 就可以将每个有源区的注入电流限制在氧化孔内, 从而减少电流扩展, 提高器件的微分量子效率. 湿法氧化的条件如下: 炉温 420°C , N_2 流量 0.95 L/min , 水温 95°C . 待整个有源区生长完成后, 在其上方生长 15 对 P 型 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 分布布拉格反射镜 (P type distributed Bragg reflectors, P-DBRs), 最后外延生长欧姆接触层.

器件的制作过程如下. 首先, 在出光孔外围制作环形 Ti/Pt/Au 欧姆接触 P 电极. 然后, 采用感应耦合等离子体 (inductive coupled plasma, ICP) 刻蚀至 N-DBR, 将 VCSEL 台面所有的高铝层暴露出来. 接着, 采用湿法氧化法将高铝层外围氧化, 形成氧化孔. 接下来, 在 P 电极上方电镀 $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚金, 改善横向散热, 有利于提高器件的温度特性.

然后, 将衬底减薄至 $150\text{ }\mu\text{m}$, 并在其表面蒸发 AuGeNi/Au 形成 N 型电极. 最后, 对器件进行快速热退火, 形成良好的欧姆接触. 为了更好地分析 5 结级联 VCSEL 的光电性能, 不仅制备了不同孔径的器件, 同时还采用相同的工艺制备了 905 nm 单结 VCSEL 器件作为对比. 该单结 VCSEL 器件除了需要较多的 P-DBR 对数 (18 对) 来保证正常激射, 其外延层组分、器件结构和制备工艺均和 5 结级联 VCSEL 器件相同.

3 实验结果及讨论

在室温连续 (continuous wave, CW) 条件下, $8\text{ }\mu\text{m}$ 氧化孔径的 5 结级联 VCSEL 单管的光功率-电流 (light-current, $L-I$) 特性、电压-电流 (voltage-current, $V-I$) 特性、功率转换效率 (PCE)、以及光谱如图 2(a)—(d) 所示. 相同孔径的单结 VCSEL 的测试特性曲线也呈现在图中作为对比. 从 $L-I$ 特性曲线可以发现, 5 结 VCSEL 和单结 VCSEL 的阈值电流分别为 0.6 mA 和 0.8 mA , 相应的 P 型 DBR 的对数分别为 15 对和 19 对. 虽然 5 结 VCSEL

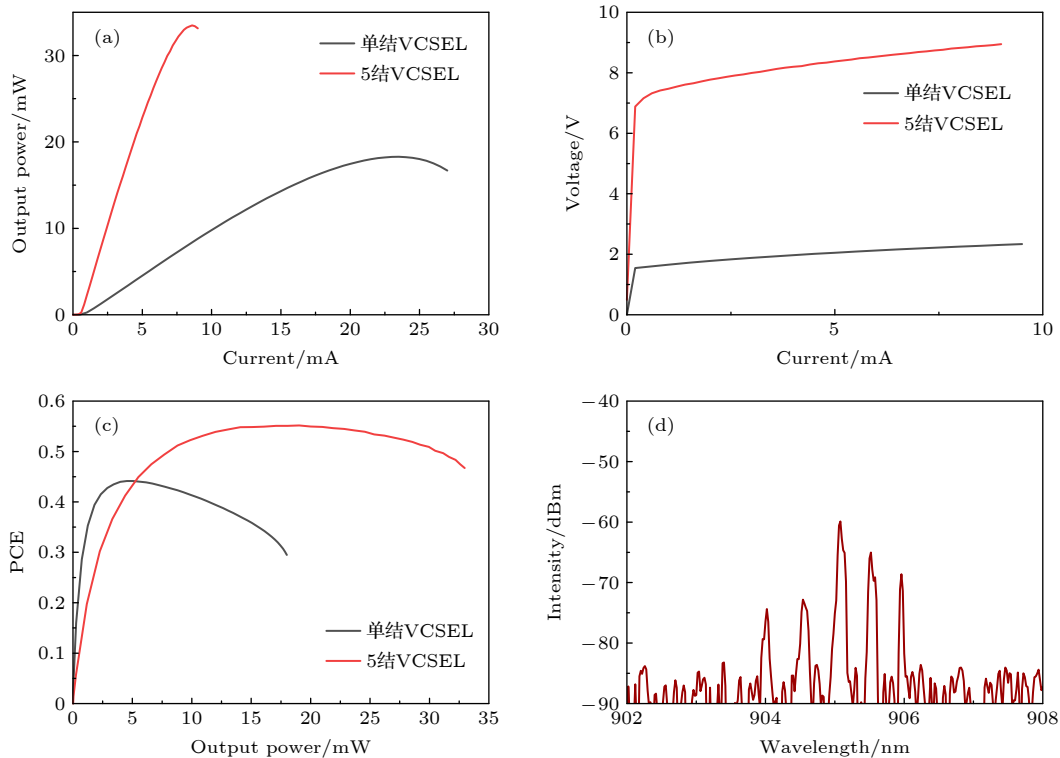


图 2 氧化孔径 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的 5 结 VCSEL 与单结 VCSEL 在室温 CW 条件下的测试结果 (a) $L-I$ 曲线; (b) $V-I$ 曲线; (c) PCE- L 曲线; (d) 5 结 VCSEL 在 1 mA 下的光谱

Fig. 2. Measured results of 5-junction VCSEL and single junction VCSEL with $8\text{ }\mu\text{m}$ oxide aperture under CW condition at room temperature: (a) $L-I$ curves; (b) $V-I$ curves; (c) PCE- L curves; (d) spectrum of 5-junction VCSEL measured at 1 mA .

的 P-DBR 对数少,但是由于 5 个有源区级联可以大大提高光增益,从而减小了器件阈值. 单结 VCSEL 和 5 结级联 VCSEL 的饱和功率分别为 18.3 mW 和 33.5 mW. 在线性区域内,相同电流下 5 结 VCSEL 的输出功率是单结的 5 倍以上. 例如当注入电流 $I = 4$ mA 时,单结 VCSEL 输出功率只有 3.4 mW,而 5 结级联 VCSEL 输出功率为 18.1 mW,是单结功率的 5.3 倍. 另外,单结 VCSEL 的最大斜率效率只有 1.1 W/A,而 5 结级联 VCSEL 的最大斜率效率为 5.4 W/A,是单结斜率效率的近 5 倍. 除此之外,当输出功率均为 10 mW 时,单结 VCSEL 需要的驱动电流为 10 mA,而 5 结级联 VCSEL 需要的驱动电流仅为 2.4 mA,这有益于减小驱动电路的功耗和成本.

图 2(b) 对比了单结 VCSEL 和 5 结级联 VCSEL 的 V - I 特性. 由于 5 结级联 VCSEL 比单结 VCSEL 多了 4 个有源区和 4 个隧道结以及额外的一些匹配层,其开启电压要大于单结 VCSEL 的开启电压. 从图 2(b) 可以发现,单结 VCSEL 的开启电压只有 1.54 V,而 5 结级联 VCSEL 的开启电压高达 6.89 V,但比其光子能带电压 6.85 V 仅大了 40 mV,没有引入太多的额外电压,证明隧道结的设计、掺杂浓度和生长质量较好. 另外,从图 2(b) 可以看出,5 结 VCSEL 的串联电阻约为 157 Ω ,大于单结 VCSEL 的串联电阻 90 Ω . 这也是因为在 5 结 VCSEL 内,多个有源区、隧道结和匹配层的存在,使串联电阻增大. 图 2(c) 展示了两种器件的 PCE,单结的最大 PCE 只有 44.1%,且随着功率的增大而迅速降低;5 结 VCSEL 的最大 PCE 为 55.2%,且在 9—30 mW 区间均保持在 50% 以上,这意味着 5 结 VCSEL 可以在较大的功率下仍然保持较高的 PCE,这对于实际应用是至关重要的. 图 2(d) 所示的是 5 结 VCSEL 在 1 mA 时的光谱,其激射波长在 905 nm 附近,符合预期设计. 由于在 8 μm 氧化孔径下,VCSEL 为多横模激射,因此在光谱图中显示为多个峰值. 综合上述测试结果,5 结级联 VCSEL 相对于单结 VCSEL 器件,在功率、斜率效率及 PCE 等方面具有较大的扩展能力,在许多大功率应用方面具有更大的优势.

图 3 是在室温下测得的单结 VCSEL 和 5 结级联 VCSEL 在不同耗散功率下的基模峰值波长的变化情况. 耗散功率 (P_{diss}) 定义为输入功率减去输出的光功率 (P_{out}), $P_{\text{diss}} = I \times V - P_{\text{out}}$. 其中,

I 为工作电流, V 为工作电压. 从图 3 可以发现,随着耗散功率的增加,两种器件基模光谱均发生红移,且 5 结 VCSEL 红移速率要比单结 VCSEL 红移速率大. 通过对测量数据进行线性拟合,可以得到 5 结 VCSEL 和单结 VCSEL 随耗散功率的红移速率 ($\Delta\lambda/\Delta P_{\text{diss}}$) 分别为 0.1739 nm/mW 和 0.1390 nm/mW. 由于 5 结 VCSEL 和单结 VCSEL 量子阱材料、DBR 材料均相同,其基横模光谱随温度的红移速率 $\Delta\lambda/\Delta T$ 相同,均为 0.0638 nm/ $^{\circ}\text{C}$ [21]. 对于 VCSEL 器件,其热阻 R_{th} 的计算公式为 $R_{\text{th}} = \Delta T/\Delta P_{\text{diss}} = (\Delta\lambda/\Delta P_{\text{diss}})/(\Delta\lambda/\Delta T)$. 通过计算得到,5 结 VCSEL 的热阻为 2.73 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$,单结 VCSEL 的热阻为 2.18 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$. 5 结 VCSEL 的热阻大于单结 VCSEL 的热阻,这是因为多个氧化层的引入,热量更难向衬底和侧向传导. 因此,对于多结 VCSEL 器件,一般采用窄脉冲驱动方式来降低其内部产热从而获得较大的峰值输出功率.

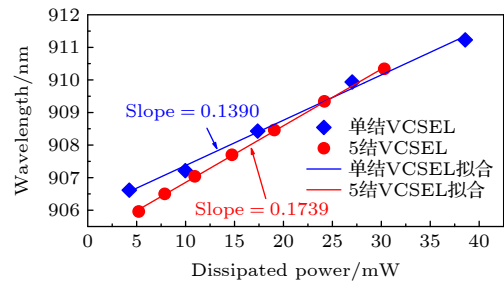


图 3 单结 VCSEL 和 5 结 VCSEL 器件的基模光谱随耗散功率的变化关系

Fig. 3. Variation of fundamental mode spectra of single junction VCSEL and 5-junction VCSEL devices with dissipated power.

接下来,在 CW 条件下测试了 8 μm 孔径 5 结级联 VCSEL 在不同环境温度下的特性曲线,如图 4 所示. 显然,器件输出功率随着环境温度的升高而降低. 当温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,器件的最大输出功率为 33.5 mW,器件阈值为 0.6 mA. 当温度增加到 85 $^{\circ}\text{C}$ 时,最大输出功率降低到 17.5 mW,阈值增大到 1.0 mA. 当温度进一步增加到 125 $^{\circ}\text{C}$ 时,器件依然能正常工作,最大功率超过 6.0 mW,如图 4(a) 所示. 随着温度的增加,器件开启电压略微减小,如图 4(b) 所示,这是由于温度升高,本征载流子浓度升高,同时费米能级带隙减小导致的. 随着温度的增加,虽然器件的电压略微减小,但由于器件的功率降低,且阈值增大,导致器件的 PCE 随着温

度的升高而下降, 如图 4(c) 所示. 将不同温度下器件的最大 PCE 和最大 SE 提取出来, 如图 4(d) 所示. 随着温度的升高, 器件的最大 PCE 和最大 SE

都在下降. 当温度上升到 85 °C 时, 器件的最大 PCE 依然保持在 42.7%, 最大斜率效率仍大于 4.3 W/A, 展示出较好的温度特性.

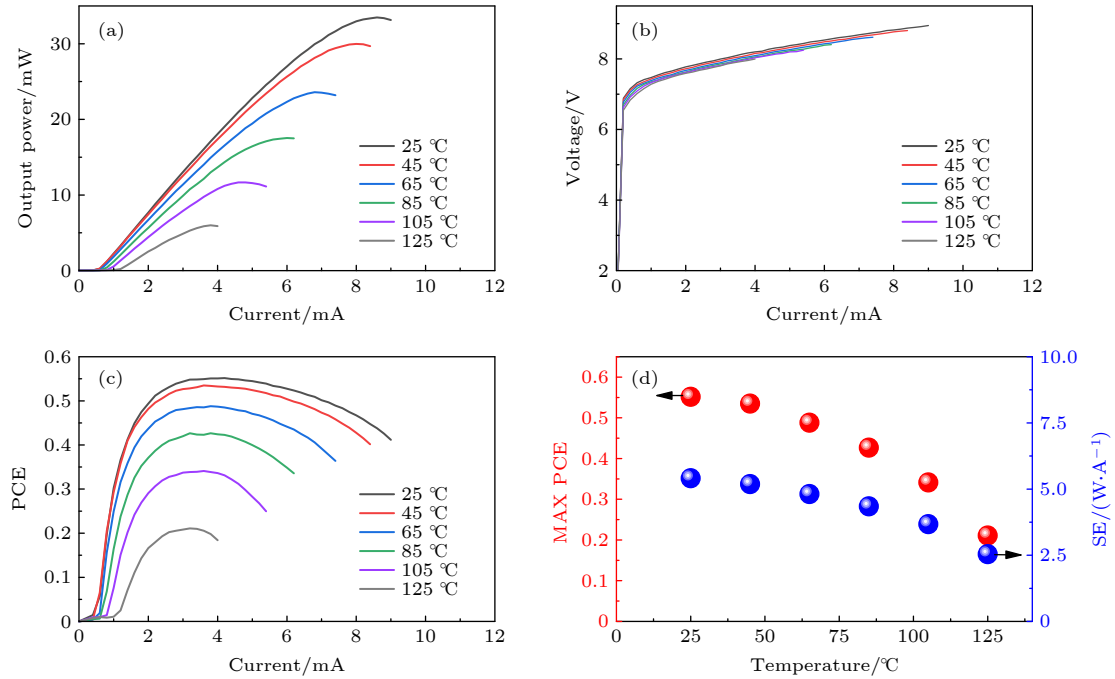


图 4 氧化孔径 8 μm 的 5 结 VCSEL 在不同温度下的测试结果 (a) L - I 曲线; (b) V - I 曲线; (c) PCE- I 曲线; (d) 最大 PCE 和 SE 随温度的变化

Fig. 4. Measured results of 5-junction VCSEL with 8 μm oxide aperture under CW condition at different temperatures: (a) L - I curves; (b) V - I curves; (c) PCE- I curves; (d) max PCE and SE versus temperature.

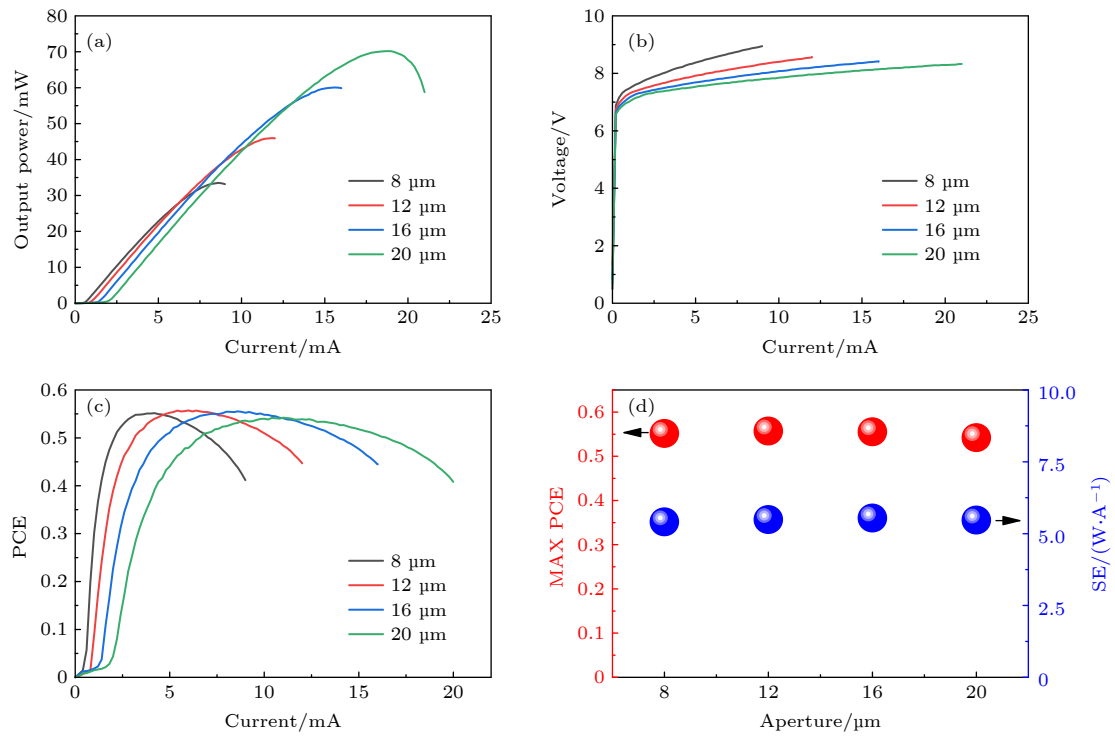


图 5 不同氧化孔径 5 结 VCSEL 器件在室温下 (a) L - I 曲线; (b) V - I 曲线; (c) PCE- I 曲线; (d) 最大 PCE 和 SE 随孔径的变化

Fig. 5. Measured results of 5-junction VCSELs with different oxide apertures under CW condition at room temperature: (a) L - I curves; (b) V - I curves; (c) PCE- I curves; (d) max PCE and SE versus oxide aperture.

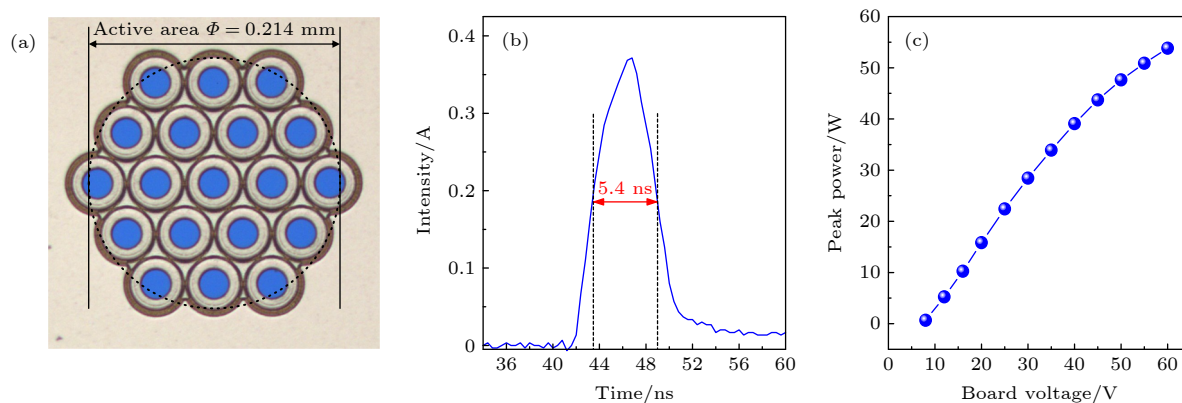


图 6 (a) 制备的 19 单元 5 结 VCSEL 阵列的俯视图和尺寸示意图; (b) 驱动板电压为 25 V 下阵列的光功率响应曲线; (c) 19 单元阵列的峰值输出功率随驱动板电压的变化

Fig. 6. (a) Structure and size diagram of the fabricated 19-element 5-junction VCSEL array; (b) the optical power response curve of the array at driving circuit board voltage of 25 V; (c) peak output power of the array versus circuit board driving voltage.

此外, 在 CW 条件下测试了不同孔径的 5 结级联 VCSEL 单管的光电特性, 如图 5 所示. 从图 5(a) 所示的 $L-I$ 曲线可以发现, 随着氧化孔径从 $8\ \mu\text{m}$ 增大到 $20\ \mu\text{m}$, 器件的阈值从 $0.6\ \text{mA}$ 增大到 $2\ \text{mA}$; 器件的最大功率从 $33.5\ \text{mW}$ 增大到 $70.2\ \text{mW}$. 从图 5(a) 中还可以看出, 孔径越大, 器件的热翻转电流越大, 这是因为大孔径器件的有源区面积更大, 电流密度更低. 随着孔径增大, 器件的最大 PCE 没有发生明显变化, 如图 5(c) 所示. 我们将不同孔径器件的最大 PCE 和最大 SE 提取到图 5(d) 中, 可以发现, 所有器件的最大斜率效率均大于 $5.4\ \text{W/A}$, 最大 PCE 均大于 54% , 展示出很好的性能均一性.

最后, 制备了 19 单元 5 结 VCSEL 阵列, 单元氧化孔径为 $20\ \mu\text{m}$, 制备得到的实际阵列及其尺寸如图 6(a) 所示. 整个阵列有源区的直径为 $0.214\ \text{mm}$, 阵列的总发光面积为 $0.036\ \text{mm}^2$. 测试了该 19 单元 VCSEL 阵列在窄脉冲条件下 (脉冲宽度 $5.4\ \text{ns}$, 占空比 0.019%) 不同驱动电路板电压下的峰值输出功率. 图 6(b) 是驱动电路板电压为 $25\ \text{V}$ 下测得的阵列光功率响应曲线, 可以看出, 脉冲宽度 (半高全宽) 为 $5.4\ \text{ns}$. 图 6(c) 展示了 19 单元阵列的峰值输出功率随驱动板电压的变化, 可以发现, 峰值功率随着驱动板电压先线性增大后趋近饱和, 测得的最大峰值功率达到 $58.3\ \text{W}$, 对应的最大峰值功率密度为 $1.62\ \text{kW/mm}^2$. 这种高峰值功率、高功率密度的多结级联 VCSEL 阵列在中远距离激光雷达的应用中具有诱人的应用前景.

4 结 论

设计并制备了 5 结级联 $905\ \text{nm}$ VCSEL 及其阵列, CW 条件下不同孔径的器件最大斜率效率均大于 $5.4\ \text{W/A}$, 最大 PCE 均大于 54% . 窄脉冲条件下测试得到的 19 单元 5 结 VCSEL 阵列的最大峰值功率达到 $58.3\ \text{W}$, 峰值功率密度为 $1.62\ \text{kW/mm}^2$. 相对于单结 VCSEL, 5 结级联 VCSEL 在输出功率、斜率效率及功率转换效率等性能上具有较大的优势. 下一步我们会继续增加 VCSEL 的结数, 以获得更高的功率密度. 另外, 也需要解决多结 VCSEL 的散热问题, 提高器件的可靠性.

参考文献

- [1] Schwarz B 2010 *Nat. Photonics* **4** 7
- [2] Kirkpatrick K 2018 *Commun. ACM* **61** 6
- [3] Kim J S, Yun S J, Seol D J, Park H J, Kim Y S 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 12
- [4] Warren M E 2019 *IEEE Symposium on VLSI Circuits* Kyoto, Japan, June 9–14, 2019 pC254–C255
- [5] Seurin J F, Zhou D L, Xu G Y, Miglo A, Li D Z, Chen T, Guo B M, Ghosh C 2016 *Proc. SPIE: Conference on Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XX* San Francisco, CA, February 17–18, 2016 p97660D
- [6] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, Kan Q, Briere G, Chen P P, Zhao Z Z, Delga A, Ren H R, Chen H D, Xu C, Genevet P 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 125
- [7] Cheng C H, Shen C C, Kao H Y, et al. 2018 *Opto-Electron. Adv.* **1** 3
- [8] Chang-Hasnain C J 2019 *IEEE 24th Microoptics Conference (MOC)* Toyama, Japan, November 17–20, 2019 p18
- [9] Larsson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 6
- [10] Liu A, Wolf P, Lott J A, et al. 2019 *Photonics Res.* **7** 2
- [11] Koyama F 2014 *Opt. Rev.* **21** 6

- [12] Miller M, Grabherr M, King R, et al. 2001 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **7** 2
- [13] Knodl T, Straub A, Golling M, Michalzic R, Ebeling K J 2001 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13** 9
- [14] Müller M, Philippens M, Grönninger G, et al. 2007 *Int. Soc. Opt. Photonics* 2007 p6456
- [15] Boucher J F, Vilokinen V, Rainbow P 2009 *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 2009 p74800K
- [16] Kotaki Y, Uchiyama S, Iga K 1984 16 th (1984 International) *Conference on Solid State Devices and Materials* Kobe, Japan, August 30–September 1, 1984 p133
- [17] Schmid W, Wiedenmann D, Grabherr M, Jager R, Michalzic R, Ebeling K J 1998 *Electron. Lett.* **34** 6
- [18] Knodl T, Golling M, Straub A, Ebeling K J 2001 *Electron. Lett.* **37** 1
- [19] Kim J K, Hall E, Nakagawa S, Huntington A, Coldren L A 2000 *IEEE 17th International Semiconductor Laser Conf.* 2000 p155
- [20] Pan G, Xun M, Zhao Z, et al. 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 9
- [21] Xun M, Pan G, Zhao Z Z, et al. 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 6

Multi-junction cascade 905 nm vertical cavity surface emitting lasers with high power density*

Pan Guan-Zhong Xun Meng[†] Zhao Zhuang-Zhuang Sun Yun
Jiang Wen-Jing Zhou Jing-Tao Wu De-Xin

(*Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(Received 6 May 2022; revised manuscript received 23 June 2022)

Abstract

Aiming at three-dimensional (3D) sensing applications such as LiDAR, high power density five-junction cascaded vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) with 905 nm wavelength are designed and fabricated. The maximum power conversion efficiency is 55.2% for an individual VCSEL emitter with 8 μm oxide aperture. And the maximum slope efficiency of the device is 5.4 W/A, which is approximately 5 times that of traditional single-junction VCSEL with the same aperture. Under the condition of narrow pulse (pulse width 5.4 ns, duty cycle 0.019%) injection, the peak output power of 19-element array (20 μm oxidation aperture for each element) reaches 58.3 W, and the corresponding power density is as high as 1.62 kW/mm². The devices with various apertures (8–20 μm) are characterized. The results show that the maximum slope efficiencies of all these devices are greater than 5.4 W/A and the maximum PCE is higher than 54%. These high-performance VCSEL devices can be used as ideal light sources for 3D sensing applications such as LiDAR.

Keywords: 905 nm vertical cavity surface emitting lasers, multi-junction cascade, high power density, 3-dimensional sensing

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

DOI: 10.7498/aps.71.20220888

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62104251, 62174178), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. BX20200358, 2021M703442), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant No. ZDBS-LYJSC031), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2022115).

[†] Corresponding author. E-mail: xunmeng@ime.ac.cn

高功率密度多结级联905 nm垂直腔面发射激光器

潘冠中 荀孟 赵壮壮 孙昀 蒋文静 周静涛 吴德馨

Multi-junction cascade 905nm vertical cavity surface emitting lasers with high power density

Pan Guan-Zhong Xun Meng Zhao Zhuang-Zhuang Sun Yun Jiang Wen-Jing Zhou Jing-Tao Wu De-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 204203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220888

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220888>

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

高功率转换效率905 nm垂直腔面发射激光器的设计与制备

Design and fabrication of 905 nm vertical cavity surface emitting laser with high power conversion efficiency

物理学报. 2021, 70(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210043>

795 nm高温高功率垂直腔面发射激光器及原子陀螺仪应用

795-nm high-temperature and high-power operating vertical-cavity surface-emitting laser and application in atomic gyroscope

物理学报. 2022, 71(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212422>

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, 67(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

1550 nm毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器

1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser with single-mode power of milliwatts

物理学报. 2022, 71(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132>

高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

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

物理学报. 2019, 68(6): 064207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>