

专题: 半导体物理与器件

平面长腔 GaN 基垂直腔面发射激光器的 器件制备与测试表征*

朱壮壮¹⁾ 冯美鑫^{1)2)†} 李传杰¹⁾ 张书明¹⁾²⁾ 孙钱^{1)2)‡} 杨辉¹⁾²⁾

1) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 半导体显示材料与芯片重点实验室, 苏州 215123)

2) (中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026)

(2026 年 1 月 14 日收到; 2026 年 2 月 11 日收到修改稿)

氮化镓 (GaN) 基垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 因其低功耗、小发散角、圆形光束以及易于构建高密度二维阵列等优势, 在新型显示和可见光通信等领域展现出巨大应用潜力. 本文采用金属键合与激光剥离工艺制备了基于双介质布拉格反射镜的平面型 GaN 基长腔 VCSEL 器件, 室温连续电流注入下表现出良好的热稳定性, 实测热阻仅为 349.9 K/W. 在光泵浦测试下, 器件在 435.7 nm 处出现明显的激射峰, 半高宽约为 0.45 nm. 在脉冲电注入测试下, 随着注入电流的增大, 器件的发光光谱由多纵模逐渐演化为单纵模输出. 其中, 器件的阈值电流密度主要分布在 45.3—107.9 kA/cm² 之间, 激射光谱的半高宽约为 1 nm, 并呈现轻微不对称性. 进一步的远场测量表明光斑具有明显的双瓣结构, 从侧面证实了电泵浦激射光谱中存在高阶横模叠加的特征.

关键词: 氮化镓, 垂直腔面发射激光器, 长腔散热, 电注入激射**DOI:** 10.7498/aps.75.20260069**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260069

1 引言

氮化镓 (GaN) 材料具有宽禁带、直接带隙、高发光效率等优点, 是制作紫外到可见光波段半导体激光器的理想材料. GaN 基垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是一种垂直于衬底面出射的半导体激光器, 可将有源区产生的光子限制在极小体积内形成高强度共振. 该类激光器具有单模输出、低功耗、小发散角、圆形光斑以及易于构建高密度二维阵列等优点^[1], 在新型显示、固态照明、高密度光存储、可见光通信等领域展现出广阔的应用前景^[2,3].

自 2008 年 Lu 等^[4] 成功报道了世界上首支电

注入激射的 GaN 基 VCSEL 以来, 包括国内外数十家知名研究机构^[5-9], 以及日本日亚^[10]、索尼^[11]、史丹利^[12] 等国际知名半导体企业, 均致力于 GaN 基半导体 VCSEL 的相关研究. 经过多年发展, GaN 基 VCSEL 成功实现了蓝绿光波段的电注入激射^[9,11], 蓝光单颗芯片的峰值输出光功率达到 23.7 mW^[12], 绿光的输出光功率也达到 1.5 mW 以上^[10]. 然而与已成功实现商业化的 GaAs 基 VCSEL 相比, GaN 基 VCSEL 的发展起步较晚且进展缓慢, 迄今仍未实现商业化应用. 截至目前, 电注入 GaN 基 VCSEL 的峰值电光转换效率 (WPE) 仅为 26%^[7], 仍远低于 GaAs 基近红外 VCSEL 的 74%^[13]. 除 Lu 等^[4] 外, 目前国内仅有 Zhang 等^[14-17]

* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFB3612200, 2024YFB3612201)、国家自然科学基金 (批准号: 62404241, 62304242, U24A20300, U25A20490, 62174174, 62274177, 62275263, 62325406, 62374172, 62304240)、中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2022323, 2022324)、江苏省重点研发计划 (批准号: BG2024019, BE2023018-2)、江苏省基础研究计划 (批准号: BK20240126) 和苏州市科技计划 (批准号: SYC2022089, ZXL2024379, ZXL2024376, ZXL2025308) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mxfeng2011@sinano.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: qsm2011@sinano.ac.cn

报道了 GaN 基蓝绿光 VCSEL 的电注入激励, 该团队联合 Liu 等^[9,18] 通过采用 InGaN 量子点有源区、双介质分布式布拉格反射镜 (DBR) 及高导热基板等方案, 率先实现绿光 VCSEL 的室温连续电注入激励, 并创下 GaN 基 VCSEL 的国际最低阈值电流密度记录。

近些年来, 在众多 GaN 基 VCSEL 的研究方案中, 采用双介质 DBR 的长腔结构被认为是实现高性能器件的关键技术路径之一^[19-21]. 其主要原因在于, 长腔结构的纵模间隔更小, 可在介质 DBR 更宽的全反射带宽内 (>100 nm) 实现稳定且高品质的光学振荡. 同时, 长腔结构还能有效利用 GaN 较高的热导率 (~ 170 W/mK) 进行横向热传导, 从而降低器件热阻, 延长使用寿命. Mei 等^[22] 通过仿真分析发现, 将腔长从 $1\ \mu\text{m}$ 增至 $6\ \mu\text{m}$ 时, 器件热阻可以降低 44%. Kuramoto 等^[23] 通过将腔长从 5λ 增至 10λ , 有效地改善了器件的散热性能, 将器件的峰值光功率大幅度提升至 $15.7\ \text{mW}$ 以上, WPE 达到 8.9%, 并且器件最高工作温度达到 $110\ ^\circ\text{C}$. 然而, 长谐振腔内的单程增益有限, 且光在腔内往返振荡过程中还会受到电流孔径的影响, 产生较大的光衍射损耗. 尽管该部分损耗会随孔径的增大而降低, 但相应的激励阈值电流也会因注入面积增大而随之升高, 会大幅增大器件的功耗和工作结温, 严重影响器件的性能和可靠性^[24].

本文采用金属键合与激光剥离技术制备了基于双介质 DBR 的平面长腔 VCSEL, 并实现了器件的光泵浦激励和电注入激励. 实验中发现, 随着注入电流的逐渐增大, 器件在模式竞争作用下由多纵模振荡逐渐演化为单纵模输出, 该现象不同于文献^[9,14,15] 中报道的多纵模激励行为, 体现出器件具有良好的模式选择性. 同时, 器件表现出良好的热稳定性, 实测热阻仅为 $349.9\ \text{K/W}$, 为目前已报道的双介质型 VCSEL 器件中的最低值. 上述结果表明, 长腔结构不仅有助于改善模式选择性、优化腔模分布, 同时对器件热管理具有积极作用. 本研究为进一步提升 GaN 基 VCSEL 的性能并推动其实际应用提供了重要的科学依据与参考价值.

2 器件结构及实验制备

如图 1(a) 所示, 本文设计的平面 VCSEL 器件采用双介质 DBR 结构, 设计的中心波长为

$450\ \text{nm}$. 器件主要由 3 部分组成: 上下两侧是具有不同周期数的高反射率介质 DBR, 中间是光学厚度约为波长整数倍的谐振腔. 光子在上下反射镜之间往返传播, 形成稳定的驻波分布, 并在穿过有源区时获得增益. 由于有源区厚度通常较薄 ($<100\ \text{nm}$), 其单程增益十分有限. 为满足净增益大于腔损耗的激励条件, 谐振腔两端需采用高反射率的反射镜以降低镜面损耗, 其反射率通常要求超过 99%. 本文使用的 p 侧和 n 侧 DBR 均由周期性交替排布的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 组成, 其反射率通过紫外-可见分光光度计 (LAMBDA 750) 测量, 结果如图 1(b) 所示, 均可达到 99.5% 以上. 插图给出了利用扫描电子显微镜 (SEM) 获取的电子束沉积 DBR 结构的截面形貌, 展现出了良好的周期性和清晰分明的界面.

另外, 由于介质 DBR 不具备导电性, GaN 基 VCSEL 在实现电注入时必须采用腔内接触结构电极, 使注入电流绕过介质 DBR 并注入谐振腔内的电流限制孔径. 该孔径可以将电流限制在较小的横向区域内, 实现较高的电流密度, 并提高有源区的载流子注入效率. 目前, 在 p-GaN 表面沉积铟锡氧化物 (ITO) 透明导电层是实现电流均匀注入与扩展的常用方法. 然而, ITO 在短波长范围内具有较强的光吸收特性, 容易引入较大的腔内光学损耗. 为了降低 ITO 层的光吸收损耗, 本文在 ITO 与 p 侧 DBR 之间引入了一层厚度为 $35\ \text{nm}$ 的 Ta_2O_5 移相层, 使 $30\ \text{nm}$ 厚的 ITO 薄层位于光场波节位置, 波节位置的光场强度最小, 可以有效抑制 ITO 引起的光吸收损耗, 如图 1(c) 所示.

为了进一步降低阈值电流, 还需提高激光器的增益. 增益效率不仅取决于载流子注入水平, 还与有源区在谐振腔中相对于光学驻波场的空间位置密切相关. 当有源区位于驻波场波腹处时, 光场强度最大, 可获得最大光学增益; 而靠近波节位置时, 光场强度最小, 难以有效提供增益. 因此, 在 VCSEL 结构设计中需精确调控有源区的位置, 我们设计量子阱有源区与 ITO 层之间为 $17.5\ \text{nm}$ 厚的 p-AlGaIn 电子阻挡层和约 $63\ \text{nm}$ 厚的 p-GaN 层, 可以使有源区与驻波波腹实现最佳对准, 以提升光学增益, 降低阈值电流, 如图 1(c) 所示.

本文研究的 III 族氮化物外延结构采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 系统在 2 英寸 *c* 面 (0001) 蓝宝石衬底上生长. 自下而上依次包括: $30\ \text{nm}$ GaN 成核层、 $2\ \mu\text{m}$ 未掺杂 GaN 层、 $5.6\ \mu\text{m}$

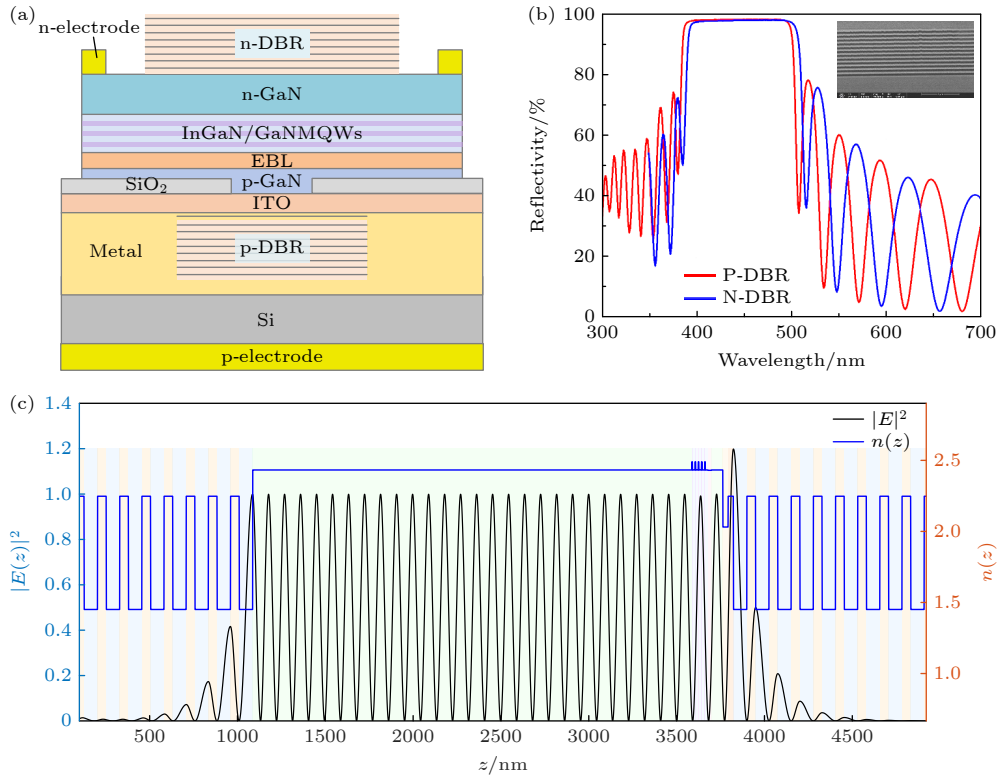


图 1 基于双介质 DBR 型平面 VCSEL 的结构设计 (a) VCSEL 结构示意图; (b) p 侧和 n 侧 DBR 反射率测试结果, 插图为 DBR 沉积后的 SEM 截面形貌; (c) 利用传输矩阵计算的腔内电场强度分布

Fig. 1. Schematic design of the planar VCSEL with dual-dielectric DBRs: (a) Schematic illustration of the VCSEL structure; (b) measured reflectivities of the p-side and n-side DBRs, the inset shows the cross-sectional SEM image of the deposited DBR structure; (c) intracavity electric-field intensity distribution calculated by using the transfer-matrix method.

n-GaN 层, 以及由 5 个周期的 3.3 nm InGaN 量子阱和 15 nm GaN 势垒层组成的 InGaN/GaN 多量子阱 (MQWs) 有源区; 其上为 17.5 nm p-AlGaIn 电子阻挡层 (EBL)、53 nm p-GaN 层和 10 nm p⁺⁺-GaN 层。器件的制备流程如图 2 所示。在 p-GaN 层上先利用光刻和电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀制备出约 30 nm 高的圆形凸起 p-GaN 台面, 作为电流注入孔径。在孔径以外区域采用电感耦合等离子体化学气相沉积 (ICPCVD) 设备生长相同厚度的 SiO₂ 绝缘层, 使样品表面呈平面结构。其上采用磁控溅射沉积 ITO 作为横向扩展与注入电极, 退火后与 p⁺⁺-GaN 形成良好的欧姆接触。在 ITO 表面通过光刻和电子束蒸镀等制备图形化 p 侧介质 DBR, 使其完全覆盖电流注入孔径。完成 p 侧结构后, 将样品与 Si 基板进行金属键合, 并采用激光剥离技术 (LLO) 去除蓝宝石衬底。衬底移除后, 利用 ICP 刻蚀和化学机械抛光 (CMP) 将 GaN 减薄至目标厚度 (7 μm 和 4 μm), 同时通过 ICP 刻蚀实现单元器件之间的分离与绝缘。在完成 n 侧电极的沉积以及 10.5 对介质 DBR 的制备后, 对器件进

行翻转并减薄 Si 基板, 随后在 Si 基板背面沉积欧姆接触电极, 最终完成整个器件的制备流程。

经过激光剥离后, 外延结构的截面形貌如图 3(a) 所示。为了进一步降低 n-GaN 表面的粗糙度, 还需对其进行化学机械抛光处理与 BOE 溶液清洗, 器件表面粗糙度可降低至 0.34 nm, 接近外延生长的 GaN 材料表面粗糙度, 如图 3(b) 所示。制备完成后的器件在直流驱动条件下呈现出稳定的发光特性, 其发光图像如图 3(c) 所示。

3 测量结果与讨论

所有器件的表征均在室温条件下进行, 测试装置如图 4(a) 所示。在开展电学测试之前, 我们使用 355 nm 激光对器件进行光泵浦实验。实验过程中, 激光经透镜聚焦后照射在器件表面, 器件发出的光由透镜与光纤收集并传输至光谱仪, 用于获取其发光光谱。如图 4(b) 所示, 随着光泵浦功率逐渐提升, 原本在增益区间 (420—460 nm) 内较为平坦的自发辐射光谱中出现了两个明显的窄带激光峰

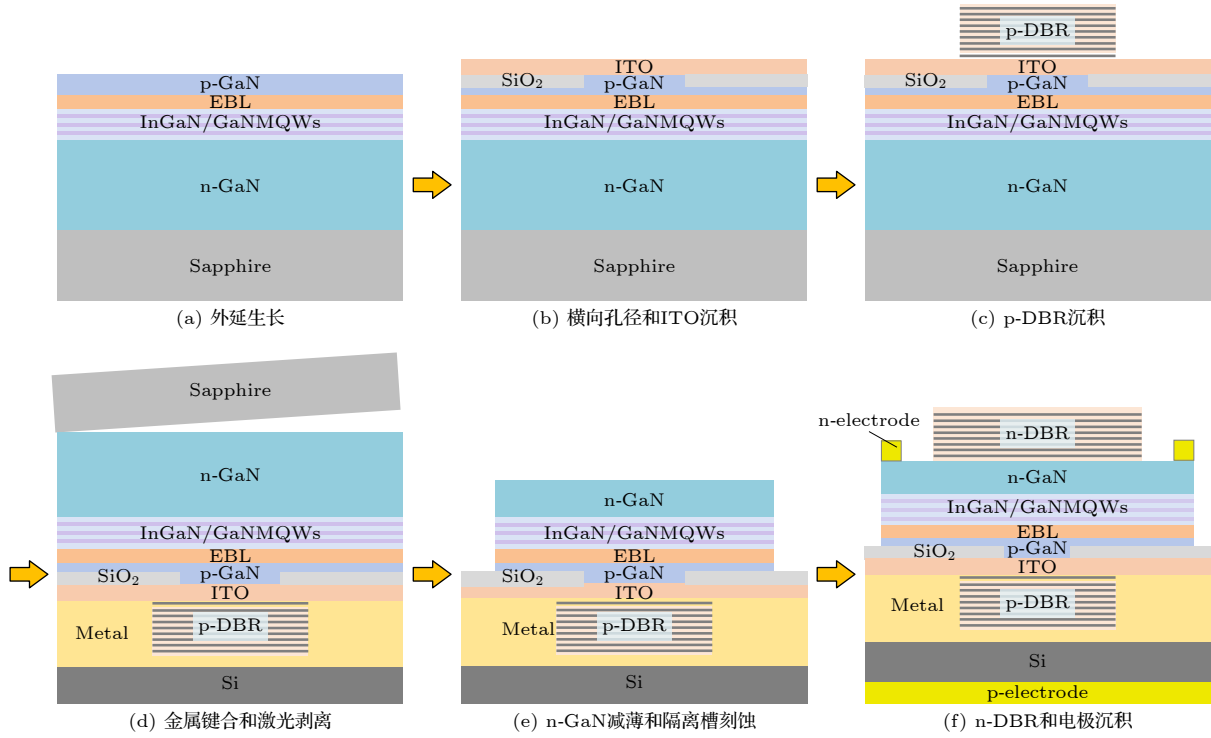


图 2 平面双介质 DBR 型 VCSEL 的制备流程图 (MQWs: 多量子阱, EBL: 电子阻挡层)

Fig. 2. Fabrication process flow of the planar VCSEL with dual-dielectric DBRs (MQWs: Multiple quantum wells, EBL: Electron blocking layer).

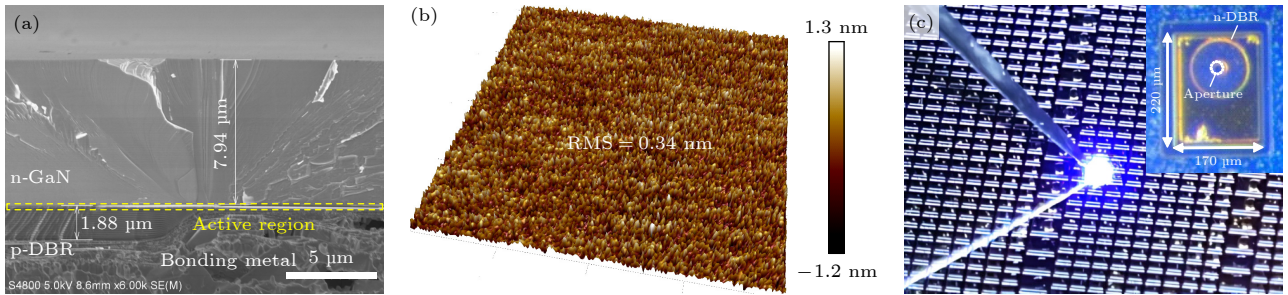


图 3 平面 VCSEL 器件制备与表征图 (a) 激光剥离后的 SEM 截面形貌; (b) 化学机械抛光后的表面粗糙度; (c) 直流驱动下器件的发光图像, 插图为器件在高倍物镜下的俯视图

Fig. 3. Fabrication and characterization of the as-fabricated planar VCSEL device: (a) Cross-sectional SEM image after laser lift-off; (b) surface roughness after chemical mechanical polishing; (c) electroluminescence image of the device under direct current operation, the inset shows the top-view images under a high-magnification objective.

(429.7 nm 和 435.7 nm). 其中, 435.7 nm 处的峰值强度最高, 其谱线半高宽约为 0.45 nm. 随着光泵浦功率的进一步提高, 这两个激射峰的峰值强度持续增强并最终由双峰演化为单峰, 表明器件在光激发条件下实现了增益放大和模式选择, 最终实现单纵模激射.

器件的电流-电压 ($I-V$) 特性由直流电源 (Keithley 2450) 进行测量. 器件的电致发光光谱和光输出功率分别通过光谱仪 (Ocean Optics HR 4000) 和光功率计 (Thorlabs PM121D) 进行采集. 近场

光斑图像则由一套光学放大系统及电荷耦合器件 (CCD) 相机组成的系统测量, 以便更直观地观察器件的发光分布特性. 在探针台上施加连续直流电信号后, 器件的电致发光 (EL) 光谱呈现出明显的多纵模振荡特征, 如图 4(c) 所示. 从图 4(d) 中 $P-I-V$ 测试结果可以看出, 输出光强度随着注入电流的增大近似线性增长, 说明器件在测试范围内仍以自发辐射过程为主, 属于共振型 LED 的发光特性. 随着电流的继续增大, 输出光功率持续上升, 直至热累积使器件性能开始下降, 仍未出现明显的阈值

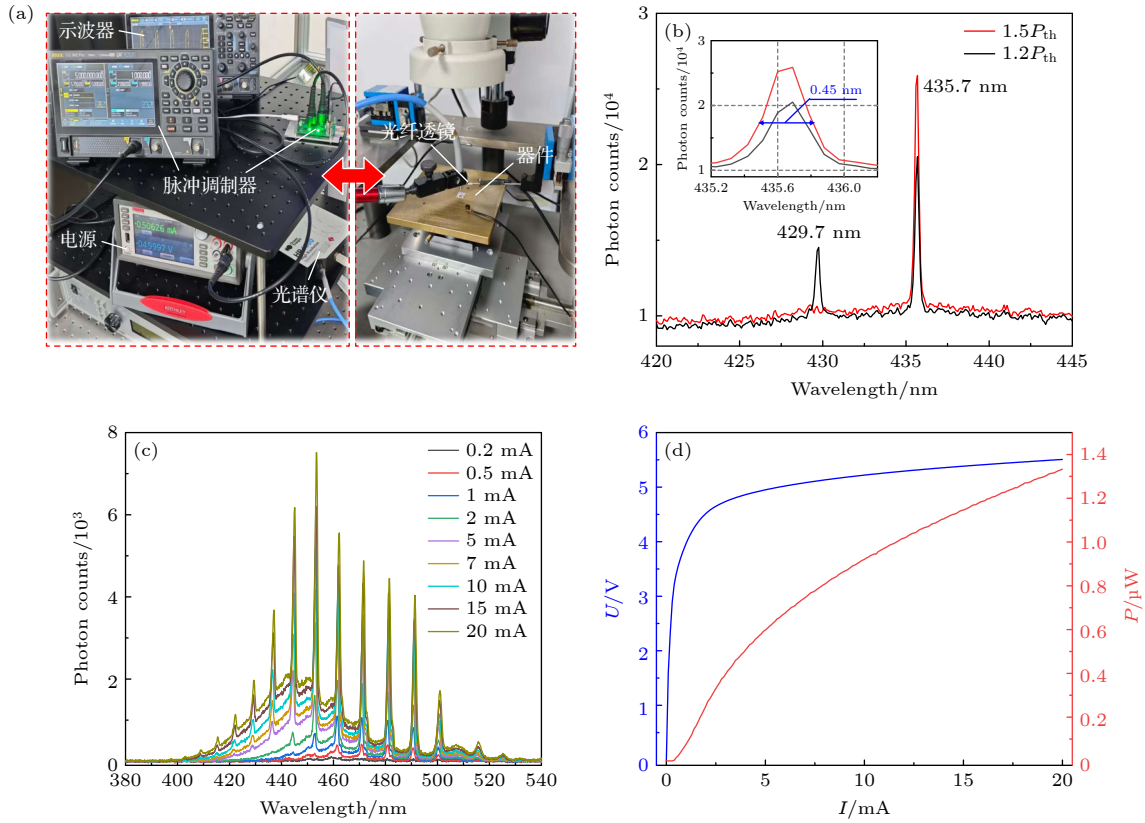


图 4 器件的测试装置及结果 (a) 脉冲电流测试装置; (b) 光泵浦下的激光光谱 (插图为放大后的光谱, P_{th} 为光泵浦阈值); (c) 连续电流注入下的发光光谱; (d) 连续电流注入下的 $P-I-V$ 曲线

Fig. 4. Experimental setup and characterization results of the as-fabricated device: (a) Schematic of the measurement setup; (b) laser spectrum under optical pumping, the inset shows the enlarged spectrum, P_{th} represents optical pumping threshold; (c) emission spectra under continuous-wave current injection; (d) $P-I-V$ characteristics under direct current operation.

特征. 对采集的光谱数据进行多峰拟合后, 中心主模为 453.4 nm, 光谱半高宽约为 0.9 nm. 同时, 纵模间隔约为 8.6 nm, 对应腔长为 4.1 μm ($\sim 23\lambda$).

考虑到连续电流注入会引起一定的热累积, 实验中也观测到光谱随注入电流增加而发生逐渐红移, 如图 5(a) 所示. 在测试过程中, 器件放置在半导体制冷器上来进行精准控温. 当温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 升至 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 发光光谱红移量为 0.63 nm, 经线性拟合得到的红移速率 ($\Delta\lambda/\Delta T$) 约 0.0165 nm/K, 如图 5(b) 所示. 随着注入电功率从 4.7 mW (1 mA) 增至 114.4 mW (20 mA) 时, 光谱红移量为 0.63 nm, 如图 5(c) 所示. 由此计算得到的红移速率 ($\Delta\lambda/\Delta P$) 约为 5.7 nm/W. 该数值越小, 说明器件热阻越低. 而器件的热阻可参考以下公式计算得出 [22]:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\Delta\lambda/\Delta P}{\Delta\lambda/\Delta T}. \quad (1)$$

我们在实验中对不同电流注入孔径 (8 μm , 10 μm , 12 μm , 15 μm) 器件的热阻进行计算, 其对应结果分别为 897.7, 607.3, 553.4, 349.9 K/W,

如图 5(d) 所示. 由于利用化学机械抛光的方式在降低整面粗糙度的过程中可控性较差, 会导致实际腔长偏离预期值 (7 μm 和 4 μm). 我们对同一批制备的不同腔长器件进行对比后可以发现, 实际腔长为 6.9 μm 的器件热阻值明显低于腔长为 4.1 μm 的器件, 最低可达 278.4 K/W. 上述结果表明, 随着孔径增大, 器件热阻呈下降趋势, 与文献 [25] 报道的仿真结果一致. 孔径放大使热源在横向上更为分散, 散热面积随之增大; 腔长增大则扩展了纵向散热区域, 均有助于提升散热效率. 如图 5(d) 中插图所示, 器件在超过 50 mA 的直流注入 (对应的电流密度约为 28.3 kA/cm^2) 下仍能稳定工作, 进一步说明其良好的结构稳定性与热可靠性.

为了进一步验证器件在电激励条件下的发光特性, 采用脉冲电源对其进行测试. 脉冲参数设定为: 重复频率 5 kHz、脉宽 200 ns, 对应占空比约 0.1%. 以电流孔径为 15 μm 的器件为例, 如图 6(a) 所示, 在较低注入电流下, 其电致发光光谱主要表现为多纵模振荡. 随着电流的继续增大, 增益区间

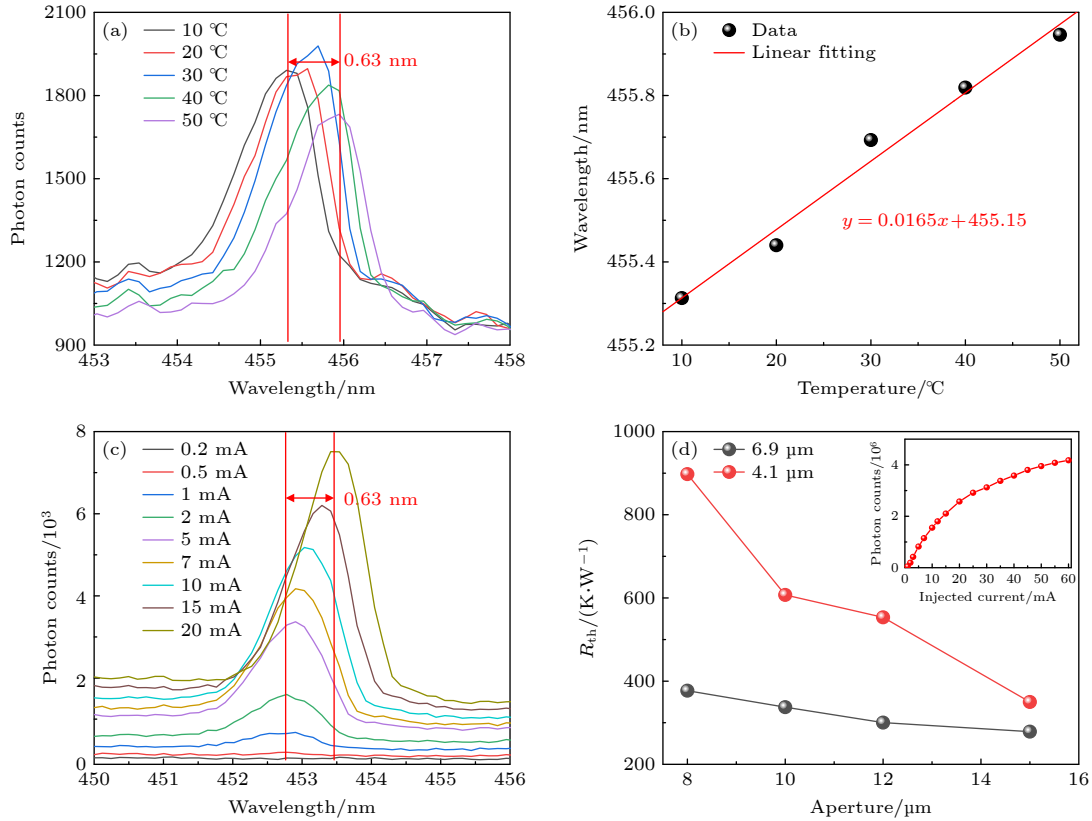


图 5 器件的热阻测试 (a) 不同温度下的发光光谱; (b) 光谱峰值波长随温度红移的线性拟合结果; (c) 不同注入电流下的光谱; (d) VCSEL 的电流注入孔径与热阻之间的关系曲线 (插图为不同电流下的光谱积分)

Fig. 5. Thermal resistance characterization of the device: (a) Redshift of the emission spectra at various temperatures; (b) linear fitting of the temperature-dependent spectra; (c) spectra under various injection currents; (d) relationship between the measured thermal resistance and current-injected aperture of the as-fabricated VCSEL devices (the inset shows the integrated spectra at different injection currents).

内的纵模增强速率明显高于其他纵模, 呈现明显的模式选择效应. 当注入电流超过 80 mA 后, 位于 441 nm 附近的纵模强度迅速提升, 而其余纵模仍保持在相对稳定的振荡水平, 表明该模式在大电流条件下通过模式竞争获得了更高的净增益. 将测试光谱积分后得到的 P - I 曲线结果如图 6(b) 所示, 可清晰观察到光功率曲线的拐点, 进一步验证器件在电脉冲注入条件下实现了受激辐射. 此时阈值电流约为 80 mA 左右, 其对应的电流密度约为 45.3 kA/cm^2 . 如图 6(b) 插图所示, 对器件在激射状态下的偏振度进行测量, 结果表明其偏振度最高可达 97.8%. 在激射状态下, 光谱的最小半高宽 (FWHM) 约为 1 nm. 受所用光谱仪分辨率 (采样步长 0.125 nm, 采样范围 200—660 nm) 的限制, 该值可能略高于器件的真实线宽. 同时, 从图 6(c), (d) 中不同电流下的激射光谱中可以看到, 谱线具有一定的不对称特征, 且出现多个峰值. 我们推测, 这可能与高阶模式参与振荡以及模式间存在竞争

有关, 从而导致主模一侧出现光谱侧向拉伸或多峰结构^[26].

对比图 7(a), (b) 可以发现, 器件在激射前后其出光强度呈现显著差异: 激射后光强大幅提升, 出光角度明显收窄, 且具有典型的空间相干增强特征. 从插图中的近场光斑可以看出, 在 0.2 mA 连续电流注入条件下, p 侧 DBR 的电流孔径中心出现明显亮点, 光斑呈对称分布; 而在进入激射状态后发光区域几乎填满整个 n 侧 DBR, 光斑形状呈现一定程度的不对称性, 并可在光斑边缘区域观察到局部干涉条纹. 为进一步分析器件的远场发光特性, 利用平面反射镜将输出光束偏折 45° 后进行测量. 为提升测量信号强度, 适当增大了注入电流. 经功率计测试, 器件的峰值输出功率可超过 0.2 mW. 如图 7(c) 所示, 在距离出光孔约 30 cm 处能够清晰观察到器件的远场光斑, 其直径约为 3 cm. 根据光斑尺寸与传播距离计算, 器件的发散角约为 8.6° . 该数值相较于典型平面结构 VCSEL

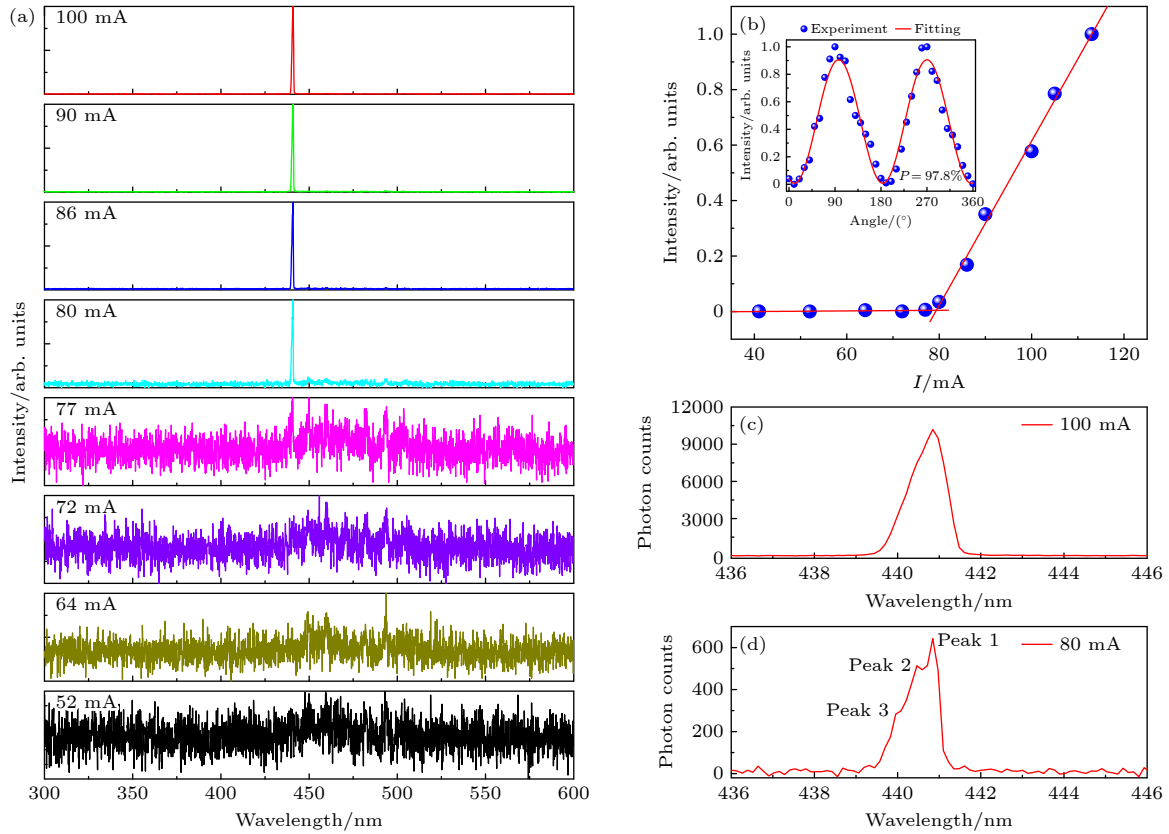


图6 脉冲电流下 GaN 基 VCSEL(电流注入孔径为 $15\ \mu\text{m}$) 的激光特性 (a) 不同电流下的光谱; (b) P - I 测试结果 (插图为偏振度测试结果); (c), (d) 不同注入电流下的激光光谱

Fig. 6. Lasing characteristics of a GaN-based VCSEL under pulsed current (with a current injection aperture of $15\ \mu\text{m}$): (a) Emission spectrum at various currents; (b) P - I characteristics (the inset shows the results of polarization test); (c), (d) lasing spectra at different currents.

略大, 主要归因于高阶模式的更强发散特性. 结合采集到的远场光斑图样可以进一步发现, 部分光斑呈现明显的双瓣结构, 对应于一阶横模的典型分布特征. 较大的电流注入孔径能够支持更多的高阶模式, 其对应的激光阈值电流也相对更高. 当注入电流增大时, 孔径区域内电流密度分布趋于不均匀, 高阶横模与局部高电流密度区域的空间重叠增强, 导致其模式增益提升, 使其更容易占据主导地位并实现激光^[27,28]. 因此, 激光光谱中出现的不对称性很可能源自高阶横模参与振荡及其与基模之间的竞争效应.

如图 8(a),(b) 所示, 对于孔径为 $12\ \mu\text{m}$ 的器件, 在将注入电流提升至较高水平 (约 $122\ \text{mA}$) 时才能观察到明显的激光峰. 经拟合分析, 其激光阈值电流约为 $120\ \text{mA}$, 对应的阈值电流密度约为 $106.1\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 显著高于 $15\ \mu\text{m}$ 孔径器件的阈值电流密度. 拟合后的光谱半高宽约为 $0.97\ \text{nm}$, 远场光斑也呈现出明显的双瓣结构; 另外, 在电流超过 $200\ \text{mA}$ 后, 器件输出功率出现明显下降. 根据

文献^[24,29]报道, 不同孔径 VCSEL 器件的激光阈值电流通常随孔径减小而降低, 但其阈值电流密度应保持在相近范围内. 为验证这一规律, 对同一批次中激光的器件进行统计分析. 如图 8(c), (d) 所示, 电流孔径为 $12\ \mu\text{m}$ 的器件, 其阈值电流密度主要分布在 52.2 — $107.9\ \text{kA}/\text{cm}^2$ 区间内; 而电流孔径为 $15\ \mu\text{m}$ 的器件, 其阈值电流密度主要分布在 45.3 — $96.2\ \text{kA}/\text{cm}^2$ 区间内. 尽管应力的存在导致器件阈值电流密度的分布范围表现出较大的波动, 但从最低值来看, $12\ \mu\text{m}$ 与 $15\ \mu\text{m}$ 器件的阈值电流密度基本相当. 然而, $12\ \mu\text{m}$ 器件的阈值电流密度仍相对提高了 $6.9\ \text{kA}/\text{cm}^2$. 进一步比较平均值可知, $12\ \mu\text{m}$ 器件的阈值电流密度平均值为 $84.3\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 明显高于 $15\ \mu\text{m}$ 器件的 $66.6\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 整体提高了约 $17.7\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 上述结果在一定程度上反映了应力作用下器件制备的均匀性及稳定性差异. 因此, 我们认为随着孔径减小至 $12\ \mu\text{m}$ 及以下, 长腔 VCSEL 器件的激光阈值明显升高, 从而使得实现稳定激光变得更加困难.

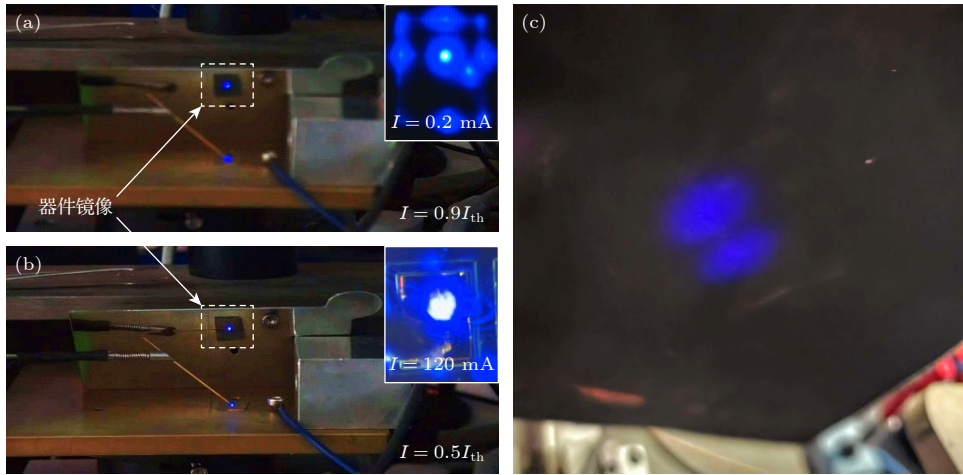


图 7 脉冲电流下 GaN 基 VCSEL(电流注入孔径为 $15\ \mu\text{m}$) 的近场/远场光斑 (a) 激光前(插图为在 $0.2\ \text{mA}$ 连续电流注入下的近场光斑图像); (b) 激光后(插图为在 $120\ \text{mA}$ 脉冲电流注入下, 激光后的近场光斑图像); (c) 激光后的远场光斑图像

Fig. 7. Near-field and far-field patterns of the as-fabricated GaN-based VCSEL under pulsed current operation (current injection aperture: $15\ \mu\text{m}$): (a) Before lasing, the inset shows the near-field pattern under a $0.2\ \text{mA}$ continuous-wave current injection; (b) after lasing, the inset shows the near-field pattern under a $120\ \text{mA}$ pulsed current injection; (c) far-field pattern after lasing.

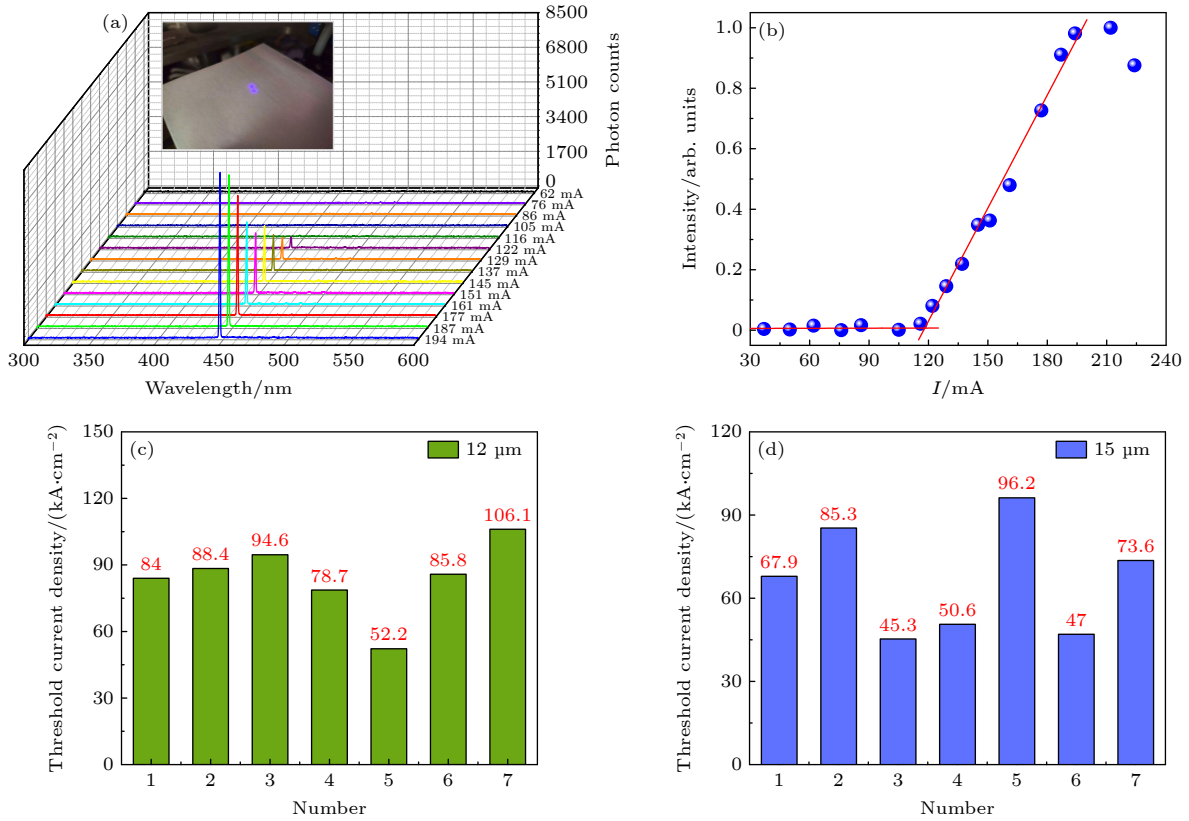


图 8 脉冲电流下 GaN 基 VCSEL(电流注入孔径为 $12\ \mu\text{m}$) 的激光特性 (a) 发光光谱(插图为远场光斑图); (b) P - I 测试结果; (c), (d) 不同孔径器件的阈值电流密度统计结果(电流注入孔径分别为 $12\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$)

Fig. 8. Lasing characteristics of a GaN-based VCSEL under pulsed current (with a current injection aperture of $12\ \mu\text{m}$): (a) Emission spectrum at various currents, the inset shows the far-field pattern; (b) P - I characteristics; (c), (d) statistical distribution of lasing threshold currents with different current injection apertures (with current injection apertures of $12\ \mu\text{m}$ and $15\ \mu\text{m}$, respectively).

结合实验制备过程及器件所表现出的较高激光阈值进行分析, 我们认为, 孔径为 $12\ \mu\text{m}$ 及以下的器件激光阈值电流密度较高, 并非仅由孔径减小

引起的光衍射损耗差异所致, 而更可能源于制备过程中引入的对准工艺误差、移相层厚度偏差以及 DBR 尺寸偏小等因素的共同影响. 移相层厚度的

偏差会引起腔内驻波分布的偏移,使量子阱偏离理想的波腹位置、ITO层偏离设计的波节位置,从而导致有效光学增益降低、吸收损耗增大.另外,尽管减小DBR的尺寸有利于提升器件的散热性能,但有限的DBR尺寸会显著放大对准偏差的影响.有源区、电流注入孔与上下DBR之间的横向偏移会降低光场与增益区的重叠效率,从而增大腔内损耗并提高激射阈值.同时,小孔径器件在制备过程中更易受到刻蚀粗糙度、孔径侧壁缺陷等因素的影响,从而引入额外的散射损耗.后续工作将通过优化孔径设计、DBR尺寸及器件制备工艺,降低附加光学损耗,从而有效降低阈值电流密度,为实现小孔径长腔VCSEL器件在连续电流注入条件下的稳定激射奠定基础.

4 结 论

本文采用金属键合与激光剥离工艺制备了基于双介质布拉格反射镜的平面型GaN基长腔VCSEL结构,成功实现了光泵浦激射与电注入脉冲激射.在光泵浦测试下,器件在435.7 nm处出现明显的激射峰,半高宽约0.45 nm.在电注入脉冲测试下,随着注入电流的增大,器件的发光光谱由多纵模逐渐演化为单纵模输出,显示出良好的模式选择性.其中,器件的阈值电流密度集中分布在45.3—107.9 kA/cm²之间,激射光谱的半高宽约1 nm,并呈现轻微不对称性.进一步的远场光斑测量表明,部分光斑具有明显的双瓣结构,从侧面证实了电泵浦激射光谱中存在高阶横模叠加的特征.此外,器件还展示出良好的热稳定性,器件热阻仅为349.9 K/W,器件在超过50 mA连续电流注入下仍能稳定工作.实验结果表明,该器件结构具备可进一步优化的可靠物理基础,为提升GaN基VCSEL的电光性能、降低激射阈值以及推进实用化奠定了重要实验依据和工艺支撑.

感谢中国科学院苏州纳米所纳米加工平台、测试分析平台及纳米真空互联实验平台Nano-X等提供的技术支持.感谢深圳市大族半导体装备科技有限公司汤海民先生在激光剥离项目实施过程中提供的技术支持.

参考文献

- [1] Yu H C, Zheng Z W, Mei Y, et al. 2018 *Prog. Quantum Electron.* **57** 1
- [2] Primerov N, Jobson C, Rios J, et al. 2024 *Proc. SPIE* **12913** p129130P
- [3] Chao B, Gopakumar M, Choi S, Wetzstein G 2023 *Opt. Lett.* **48** 4041
- [4] Lu T C, Kao C C, Kuo H C, Huang G S, Wang S C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 141102
- [5] Palmquist N C, Kearns J A, Gee S, et al. 2024 *Appl. Phys. Express* **17** 016504
- [6] ElAfandy R T, Kang J H, Li B, Kim T K, Kwak J S, Han J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 011101
- [7] Watanabe R, Kobayashi K, Yanagawa M, et al. 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 131107
- [8] Mishkat-Ul-Masabih S, Aragon A, Monavarian M, Luk T S, Feezell D 2020 *Proc. SPIE* **11280** p112800I
- [9] Mei Y, Weng G E, Zhang B P, et al. 2017 *Light: Sci. Appl.* **6** e16199
- [10] Terao K, Nagai H, Morita D, Masui S, Yanamoto T, Nagahama S 2021 *Proc. SPIE* **11686** p116860E
- [11] Hamaguchi T, Nakajima H, Tanaka M, et al. 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 044004
- [12] Kuramoto M, Kobayashi S, Akagi T, Tazawa K, Tanaka H, Takeuchi T 2020 *Appl. Phys. Express* **13** 082005
- [13] Xiao Y, Wang J, Liu H, Miao P, Gou Y, Zhang Z, Deng G, Zhou S 2024 *Light: Sci. Appl.* **13** 60
- [14] Yang T R, Xu H, Mei Y, Xu R B, Zhang B P, Ying L Y 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 151 (in Chinese) [杨天瑞, 徐欢, 梅洋, 许荣彬, 张保平, 应磊莹 2020 *中国激光* **47** 151]
- [15] Ying L Y, Mei Y, Zhang B P 2021 *J. Xiamen Univ. (Nat. Sci.)* **60** 472 (in Chinese) [应磊莹, 梅洋, 张保平 2021 *厦门大学学报(自然科学版)* **60** 472]
- [16] Wang Y C, Xia Y B, Tian A Q, Liu J P, Geng X B, Ying L Y, Mei Y, Zhang B P 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 173305
- [17] Wang Y K, Zheng Z M, Long H, Mei Y, Zhang B P 2022 *Acta Photon. Sin.* **51** 0251203 (in Chinese) [王玉坤, 郑重明, 龙浩, 梅洋, 张保平 2022 *光子学报* **51** 0251203]
- [18] [Yang T, Chen Y H, Wang Y C, Ou W, Ying L Y, Mei Y, Tian A Q, Liu J P, Guo H C, Zhang B P 2023 *Nano-Micro Lett.* **15** 223
- [19] Hamaguchi T 2023 *Photonics* **10** 470
- [20] Shi L, Yang T, Wang Y C, Ma L L, Ying L Y, Mei Y, Zhang B P 2025 *Chin. J. Lasers* **52** 0501011 (in Chinese) [石磊, 杨涛, 王亚超, 马立龙, 应磊莹, 梅洋, 张保平 2025 *中国激光* **52** 0501011]
- [21] Ito M, Hamaguchi T, Makino T, et al. 2023 *Appl. Phys. Express* **16** 012006
- [22] Mei Y, Xu R B, Xu H, Ying L Y, Zheng Z W, Zhang B P, Li M, Zhang J 2018 *Semicond. Sci. Technol.* **33** 015016
- [23] Kuramoto M, Kobayashi S, Akagi T, Tazawa K, Tanaka K, Saito T, Takeuchi T 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 112101
- [24] Hamaguchi T, Tanaka M, Mitomo J, et al. 2018 *Sci. Rep.* **8** 10350
- [25] Mishkat-Ul-Masabih S, Leonard J, Cohen D, Nakamura S, Feezell D 2017 *Phys. Status Solidi A* **214** 1600819
- [26] Mei Y, Chen Y H, Ying L Y, Zheng Z W, Long H, Zhang B P 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 2895
- [27] Yang H, Guo X, Guan B L, Wang T X, Shen G D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2959 (in Chinese) [杨浩, 郭霞, 关宝璐, 王同喜, 沈光地 2008 *物理学报* **57** 2959]
- [28] Guan B L, Liu X, Jiang X W, Liu C, Xu C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164203 (in Chinese) [关宝璐, 刘欣, 江孝伟, 刘储, 徐晨 2015 *物理学报* **64** 164203]
- [29] Hamaguchi T, Tanaka M, Nakajima H 2019 *Jpn. J. Appl. Phys.* **58** SC0806

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Device fabrication and performance characterization of planar long-cavity GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers*ZHU Zhuangzhuang¹⁾ FENG Meixin^{1)2)†} LI Chuanjie¹⁾
ZHANG Shuming¹⁾²⁾ SUN Qian^{1)2)‡} YANG Hui¹⁾²⁾1) (*Key Laboratory of Semiconductor Display Materials and Chips,**Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*)2) (*School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 14 January 2026; revised manuscript received 11 February 2026)

Abstract

Gallium nitride (GaN)-based vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) have attracted considerable attention owing to their low power consumption, small beam divergence, circular beam profiles, and compatibility with high-density two-dimensional arrays. These advantages make them highly promising candidates for the applications of laser projection, retinal scanning, and visible light communication. In this work, a long-cavity planar GaN-based VCSEL incorporating dual dielectric distributed Bragg reflectors was fabricated using metal bonding and laser lift-off processes. Current confinement apertures with diameters of 12 and 15 μm were employed to mitigate the increased diffraction loss associated with the extended cavity length. Benefiting from the superior heat dissipation capability of the long-cavity structure and the larger current aperture, the device exhibited excellent thermal stability under continuous-wave current injection at room temperature, with a measured thermal resistance of 349.9 K/W, representing the lowest value reported to date. Under optical pumping, a pronounced lasing peak was observed at 435.7 nm, with a full width at half maximum of approximately 0.45 nm. Under pulsed electrical injection, the emission spectrum gradually evolved from multiple longitudinal modes to single-mode operation as the injection current increased. The threshold current densities ranged from 45.3 to 107.9 kA/cm². The lasing spectrum exhibited a full width at half maximum of about 1 nm with slight asymmetry. Further far-field pattern measurements revealed distinct double-lobed beam profiles, indirectly confirming the presence of higher-order transverse mode superposition in the electrically pumped lasing spectrum. These results demonstrate that the proposed long-cavity device architecture constitutes an effective strategy for thermal management and diffraction-loss reduction, thereby providing a viable pathway toward the realization of high-performance GaN-based VCSELs with enhanced efficiency, stability, and practical applicability.

Keywords: gallium nitride, vertical-cavity surface-emitting laser, long-cavity heat dissipation, electrically injected lasing

DOI: [10.7498/aps.75.20260069](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260069)CSTR: [32037.14.aps.75.20260069](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260069)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2024YFB3612200, 2024YFB3612201), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62404241, 62304242, U24A20300, U25A20490, 62174174, 62274177, 62275263, 62325406, 62374172, 62304240), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. 2022323, 2022324), the Key R&D Program of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BG2024019, BE2023018-2), the Basic Research Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20240126), and the Suzhou Science and Technology Program, China (Grant Nos. SYC2022089, ZXL2024379, ZXL2024376, ZXL2025308).

† Corresponding author. E-mail: mxheng2011@sinano.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: qsun2011@sinano.ac.cn

平面长腔GaN基垂直腔面发射激光器的器件制备与测试表征

朱壮壮 冯美鑫 李传杰 张书明 孙钱 杨辉

Device fabrication and performance characterization of planar long-cavity GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers

ZHU Zhuangzhuang FENG Meixin LI Chuanjie ZHANG Shuming SUN Qian YANG Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080401 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260069

CSTR: 32037.14.aps.75.20260069

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260069>

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

940 nm 垂直腔面发射激光器单管器件的设计与制备

Design and fabrication of 940 nm vertical cavity surface emitting laser single-emitter device

物理学报. 2023, 72(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230297>

高功率垂直腔面发射激光器阵列热特性

Thermal characteristics of high-power vertical cavity surface emitting laser array

物理学报. 2024, 73(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231614>

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>

基于光注入下脉冲电流调制1550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带可调谐光学频率梳

Broadband and tunable optical frequency comb based on 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under pulsed current modulation and optical injection

物理学报. 2023, 72(1): 014207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221709>

基于490 nm垂直外腔面发射激光器的长距离水下激光通信系统

Long-range underwater wireless optical communication system based on 490 nm vertical-external-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2024, 73(17): 174202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240860>

高功率密度多结级联905 nm垂直腔面发射激光器

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

物理学报. 2022, 71(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220888>