



1550 nm毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器

张建伟 张星 周寅利 李惠 王岩冰 陈志明 徐嘉琪 宁永强 王立军

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

Zhang Jian-Wei Zhang Xing Zhou Yin-Li Li Hui Wang Yan-Bing Chen Zhi-Ming Xu Jia-Qi Ning Yong-Qiang Wang Li-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 064204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212132

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132>

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

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, 67(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

垂直腔面发射激光器低温光电特性

Optoelectronic properties of vertical-cavity surface-emitting laser at low temperature

物理学报. 2019, 68(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190427>

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>

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, 67(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

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>

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*

张建伟¹⁾ 张星^{1)2)†} 周寅利¹⁾ 李惠³⁾ 王岩冰²⁾
陈志明³⁾ 徐嘉琪³⁾ 宁永强¹⁾ 王立军¹⁾

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033)

2) (长春中科长光时空光电技术有限公司, 长春 130102)

3) (青岛科技大学, 青岛 266061)

(2021 年 11 月 19 日收到; 2021 年 12 月 1 日收到修改稿)

报道了国内首次实现出光功率达到毫瓦量级的单横模 1550 nm 波段垂直腔面发射半导体激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL). 设计了基于 InAlGaAs 四元量子阱的应变发光区结构; 设计并制备了具有隧穿特性的台面结构, 实现了对载流子空穴的高效注入及横向模式调控; 采用半导体分布式布拉格反射镜与介质反射镜结合的方式制备了 1550 nm VCSEL 的反射镜结构. VCSEL 中心波长位于 1547.6 nm, 工作温度为 15 °C 时最高出光功率可达到 2.6 mW, 最高单模出光功率达到 0.97 mW, 最大边模抑制比达到 35 dB. 随着工作温度增加, 激光器最高出光功率由于发光区增益衰减而降低, 然而 35 °C 下最大出光功率仍然可以达到 1.3 mW. 激光器中心波长随工作电流漂移系数为 0.13 nm/mA, 并且激光波长在单模工作区呈现出非常一致的漂移速度, 在气体探测领域具有很好的应用潜力. 本研究为下一步通过高密度集成获得高功率 1550 nm VCSEL 阵列奠定了基础.

关键词: 垂直腔面发射半导体激光器, 长波长, 单横模, 光通信, 传感探测

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.71.20212132

1 引言

1550 nm 波长的激光具有很广阔的应用前景, 该波长是光纤通信窗口, 在光纤中具有较低的传输色散^[1]; 1550 nm 波长的激光具有高的人眼安全阈值, 不易产生人眼损伤^[2]; 另外, 1550 nm 波长附近还是一氧化碳、硫化氢等气体的特征吸收波长区域^[3]. 发光波长在 1550 nm 的垂直腔面发射半导体激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)

具有低功耗、小体积、表面出光及圆形对称光斑等独特优势, 近年来在低功耗光通信、激光雷达及气体传感等领域的应用研究获得了人们的广泛关注^[4,5], 具有广阔的应用前景. 发光波长在 1550 nm 附近的 VCSEL 必须采用 InP 材料体系作为发光层. 采用 InP 衬底生长的晶格匹配材料具有很低的折射率差值, 因而无法用于制备低吸收损耗、低电阻的分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 结构^[6]. 因此, 目前 1550 nm 波段的 VCSEL 一般采用键合 AlGaAs/GaAs 材料的高性

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB2002401)、国家自然科学基金重大项目 (批准号: 62090060, 61727822)、国家自然科学基金基金 (批准号: 61874117, 11774343, 61804087)、吉林省科技发展计划 (批准号: 20200401006GX) 和山东省自然科学基金 (批准号: ZR2019QF015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

能 DBR 实现光场的垂直振荡方向控制, 然而键合界面的晶格缺陷及空洞严重制约着器件的工作性能 [7,8]. 近年来, 国外研究机构针对 1550 nm 波段 VCSEL 的工作性能提升做了大量研究工作.

早在 2003 年, 慕尼黑工业大学的 Gerhard 等 [9] 就论证了 1550 nm 波段以及更长波段 VCSEL 的材料制备方案及初步实验结果. 2009 年, 慕尼黑工业大学 Müller 等 [10] 报道了采用双面混合 DBR 制备 1550 nm 波段 VCSEL 的结果, 实现室温输出功率为 1 mW. 随后, 瑞士联邦理工学院的 Andrei 等 [11] 利用隧道结台阶实现了横向电流限制, 并通过键合 AlGaAs/GaAs 反射镜, 实现了室温 6.5 mW 的连续激射功率. 为解决 DBR 反射镜对 1550 nm VCSEL 的制约, 2013 年, 美国加州大学伯克利分校的 Connie 研究小组 [12] 引入悬浮式的高对比度光栅反射镜 (high contrast grating, HCG), 实现了 15 °C 下单模功率 2.4 mW. 随后, 采用各种新型反射镜结构替代传统键合反射镜的技术方案被广泛研究报道 [13,14].

近年来, 随着高速通信、气体传感及激光雷达等技术对 1550 nm VCSEL 的迫切需求, 国内也正积极开展 1550 nm VCSEL 的技术攻关, 然而在 1550 nm 波段 VCSEL 领域的研究报道近乎空白, 主要是由于在该波段的材料制备质量和键合工艺水平与国外具有较大差距. 2020 年, 中国科学院半导体研究所 Liu 等 [15] 报道了采用混合镜面反射镜与隧穿结台面结合的 1550 nm VCSEL 方案, 其阈值电流为 20 mA, 激光功率为 7 μ W, 激射谱半高全宽为 3 nm.

本文报道了 1550 nm 毫瓦级单横模 VCSEL 器件的设计和制备. 首先介绍了 1550 nm 波段

VCSEL 的关键结构量子阱、隧穿结及其横模特性的设计结果, 其次对 VCSEL 功率、光谱与单模特性等测试结果进行了描述, 最后总结了 1550 nm 垂直腔面发射半导体激光器的工作.

2 器件结构

图 1 是本文所用的 1550 nm VCSEL 的结构示意图. 该结构主要由上下 DBR、隧穿结注入台面以及量子阱发光区组成. 其中下 DBR 由 30 对 AlGaInA/AlInAs 半导体 DBR 与 CaF₂/Si 介质膜 DBR 材料共同组成; 上 DBR 由 45 对 AlGaInA/AlInAs 半导体 DBR 与介质膜 DBR 材料组成. 发光区由 6 组 6 nm Al_{0.06}Ga_{0.22}InAs 量子阱/8 nm Al_{0.22}Ga_{0.28}InAs 势垒层组成. 量子阱发光区与上、下 DBR 之间有约 2 μ m 厚的 N 型掺杂 InP 导电层, 以便于制备内部接触式的正负电极结构. 为实现高的发光区载流子密度, 采用重掺杂的 n⁺⁺/p⁺⁺ 隧穿结台面结构实现空穴在台面位置的高效注入与横向载流子限制.

VCSEL 的制备工艺流程如下: 采用金属有机化学气相沉积外延设备在 InP 衬底依次生长上半导体 DBR、N 型导电层、发光层及隧穿结结构后, 利用干法刻蚀设备刻蚀出隧穿结台面, 然后再生长导电层及下 DBR 中的半导体 DBR. 之后通过电子束蒸镀设备蒸镀下半导体 DBR 外部的 CaF₂/Si 介质膜 DBR. 制备完成后, 采用电子束蒸金及镀金设备完成金属电极制备, 并采用键合设备将整个结构键合到带有金属化图形的透明金刚石薄片上, 以支撑上 DBR 制备工艺继续进行. 将 InP 衬底采用选择性腐蚀工艺去除后, 继续刻蚀出台面结

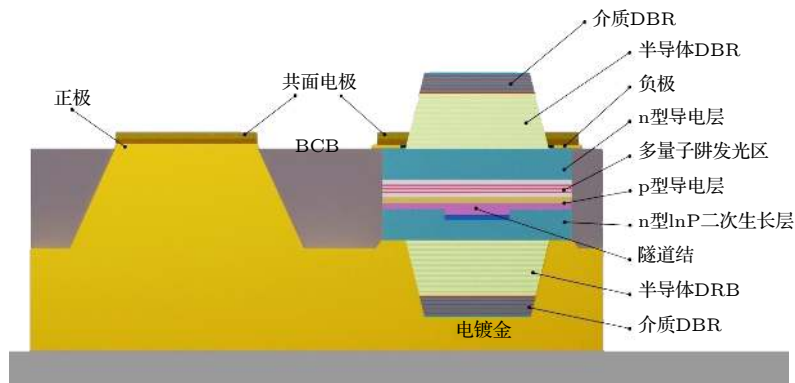


图 1 1550 nm 波段 VCSEL 结构示意图

Fig. 1. Schematic cross-section of 1550 nm VCSEL structure.

构, 填充 BCB 材料并利用电子束蒸镀设备形成金属电极. 最后在上 DBR 上蒸镀介质膜, 完成工艺制备. 为了获取良好的散热效果, VCSEL 的底部电极在工艺过程中被加厚至 20 μm 以上. 激光器台面边缘填充 BCB 材料的主要目的是实现良好的器件支撑, 确保芯片在操作过程中不易产生破损.

3 理论设计

在半导体材料体系中, GaInAsP 与 AlGaInAs 材料均可以作为 1550 nm 波段的发光区材料, 然而 AlGaInAs 具有更高的导带带阶 ($\Delta E_c/\Delta E_g$), 因而对于容易泄漏的载流子电子具有更好的限制效果; AlGaInAs 只有一种 V 族元素, 因而更容易控制材料的生长质量, 有利于实现良好的发光区性能; 同时, 由于 AlGaInAs 量子阱相比 InP 衬底具有张应变效应, 而张应变可以提供更好的能带分离效果与增益水平, 因而 AlGaInAs 是 1550 nm VCSEL 理想的量子阱层材料 [16]. 图 2 是采用的 6 nm $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.22}\text{InAs}$ 量子阱/8 nm $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.28}\text{InAs}$ 势垒层结构发光区量子阱价带的能级分立情况以及增益谱随载流子浓度的变化模拟结果.

采用 Crosslight 软件中的量子阱增益仿真模块计算了发光区量子阱价带能级与增益谱, 如图 2 所示. 图 2(a) 中能带顺序自上往下依次是第一重空穴带 (HH1)、第二重空穴带 (HH2)、第一轻空穴带 (LH1) 与第三重空穴带 (HH3). 价带重空穴带在上, 有利于量子阱在低的电流密度实现粒子数反转. 第一重空穴带与第二重空穴带分离良好, 进一步提高了量子阱对注入载流子的限制能力. 由图 2(b) 中不同载流子浓度下的增益谱可以看出, 随着载流子浓度的增加, 增益谱一直较为平滑, 并没有出现第二子能带光增益. 量子阱增益峰值位置随载流子浓度增加略有蓝移, 这是由于载流子的能带填充效应造成的. 为保证工作时增益峰值波长尽量靠近出光波长, 采用的量子阱增益峰位置设定在 1.53 μm 附近, 比激光波长略短一些. 这是因为 VCSEL 工作时, 其内部具有较严重的热效应, 因而工作时由于温度增加带来增益峰的红移, 从而最终实现增益峰跟目标激光波长较好匹配 [17].

1550 nm 波段采用的 InP 材料结构无法像近红外波段的 GaAs 材料一样通过掺入高 Al 组分, 实现电流限制层的制备 [18], 因而, 目前文献报道多

采用隧穿台面结构实现载流子的横向限制. 载流子的隧穿效应是 1550 nm VCSEL 电流顺利注入的关键. 图 3 是采用 Crosslight 软件设计的重掺杂隧

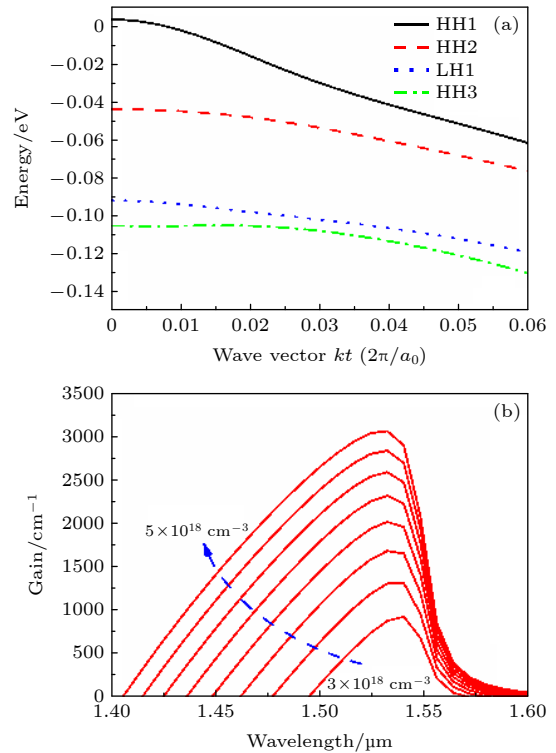


图 2 (a) 6 nm $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.22}\text{InAs}$ 量子阱的价带子能级分布情况; (b) 不同载流子浓度下的增益谱变化情况

Fig. 2. (a) Separation of valence band energy level of 6 nm $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.22}\text{InAs}$ quantum wells; (b) the gain spectra of quantum well under different carrier density.

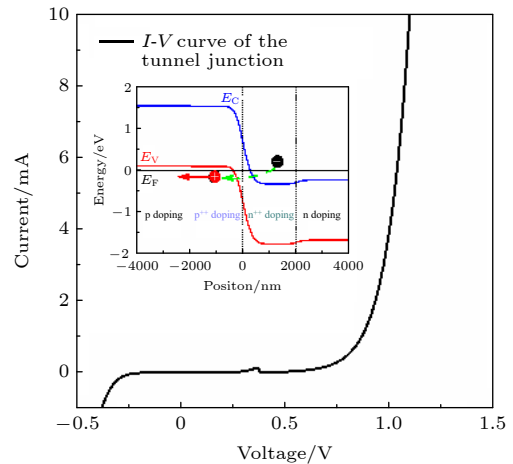


图 3 隧穿结构的电流-电压特性模拟结果, 插图为各隧穿层在 1 V 偏压下的能带结构计算结果及载流子传输过程示意图

Fig. 3. Simulation results of the current-voltage curve of tunneling junction mesa; the insert shows the energy band structure under the bias voltage of 1 V and the schematic of carrier transmission process.

穿结构的电流-电压曲线, 隧穿结台面直径为 $5\ \mu\text{m}$. 由于隧穿结外加反向偏压, 因而在电压小于 $1.5\ \text{V}$ 时几乎没有隧穿电流存在; 而当开启电压超出 $1.5\ \text{V}$, 隧穿电流随着电压增加迅速增长, 电压增长约 $0.5\ \text{V}$ 就可以实现 $10\ \text{mA}$ 的电流注入, 具有很好的隧穿效果.

图 3 插图模拟的隧穿结材料层在外加偏压超过开启电压后的能带结构图. 隧穿结采用 n 型及 p 型重掺杂材料, 界面处重掺杂 n 型层的导带与 p 型层的价带位于同一水平, 因而当电压继续增加, n 型层的载流子电子直接隧穿至 p 型层, 实现电流注入, 而不存在额外的势垒. 这也是隧穿结结构的基本工作原理.

相比近红外波段常采用的氧化限制结构, 隧穿结结构具有很好的单模工作特性. VCSEL 的波导结构属于典型的光纤柱状波导, 其芯层与包层的折射率差值决定了基模与高阶模的分布形式^[19]. 对于隧穿结结构来说, 其芯层与包层的折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff-core}} - n_{\text{eff-cladding}}$ 较小, 更有利于高阶模式的耗散与基模的增强. VCSEL 的 Δn_{eff} 与台面刻蚀深度密切相关. 对于隧穿结台面, 采用 MATLAB 自建的光纤模式模型分析了不同刻蚀深度时 Δn_{eff} 以及其对应的单模区直径变化情况, 如图 4 所示. 可以看出, 随着刻蚀深度增加, Δn_{eff} 变大, 说明刻蚀深度的增加对波导效应有增强效果, 对应的单模工作区直径不断降低. 因而, 刻蚀深度较大时, 对于实现大口径的单模输出是不利的. 为实现 $5\ \mu\text{m}$ 以上的单模工作区直径, 选择刻蚀深度不超过 $100\ \text{nm}$.

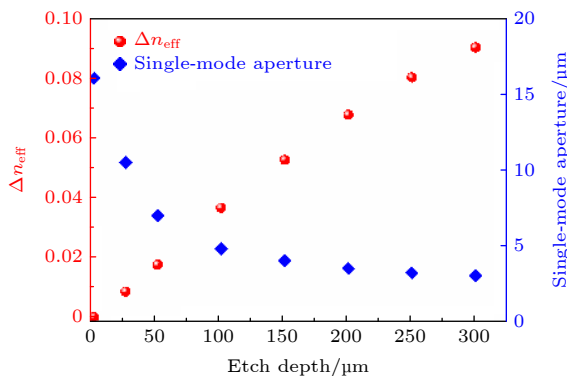


图 4 隧穿结台面刻蚀深度对芯层与包层的折射率差值 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff-core}} - n_{\text{eff-cladding}}$ 以及单模工作区直径的影响

Fig. 4. Calculated Δn_{eff} of $1550\ \text{nm}$ VCSEL and the diameter of single-mode operation changing with the etch depth of mesa structure.

4 实验结果

制备的 $1550\ \text{nm}$ VCSEL 芯片被封装在 TO 管壳中, 其底部装有 TEC 控温及 NTC 测温元件. 通过改变控温系统温度, 测量 VCSEL 在不同工作温度下的功率-电流曲线, 测试结果如图 5 所示. VCSEL 在 $15\ ^\circ\text{C}$ 下的热饱和功率达到 $2.6\ \text{mW}$. 随着工作温度的增加, 最大热饱和功率快速降低, 在 $35\ ^\circ\text{C}$ 下的热饱和功率仍然可以达到 $1.3\ \text{mW}$. VCSEL 的阈值电流随温度的变化趋势呈现出典型的增益——腔模失配型 VCSEL 阈值电流特性^[20]. 当工作温度由 $15\ ^\circ\text{C}$ 增加到 $35\ ^\circ\text{C}$ 后, 热饱和功率有所降低, 阈值电流也随之减小, 由 $15\ ^\circ\text{C}$ 时的 $7.4\ \text{mA}$ 降低到 $35\ ^\circ\text{C}$ 时的 $5.4\ \text{mA}$. 阈值电流随工作温度增加而减小, 是因为设计的增益峰值波长与激光器出光波长相对蓝移, 随着工作温度的增加, 由于增益峰值波长漂移速率比激光器出光波长漂移速率快近一个数量级, 因而在较高温度下实现了增益与激光器工作波长的较好匹配. 当工作温度继续增加至 $55\ ^\circ\text{C}$ 时, 激光器的增益与工作波长匹配度仍然较好, 因而 VCSEL 阈值电流与 $35\ ^\circ\text{C}$ 相比并无明显变化. 随着工作温度继续增加至 $75\ ^\circ\text{C}$, 增益与工作波长出现失配, 阈值电流继续增加. 虽然当工作温度在 $75\ ^\circ\text{C}$ 时 VCSEL 功率急剧下降, 然而其热饱和出光功率仍然可以达到 $0.35\ \text{mW}$.

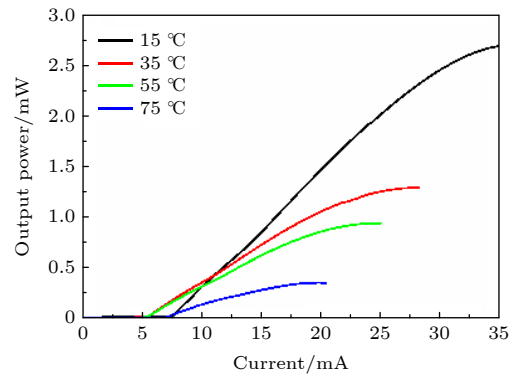


图 5 不同工作温度下 VCSEL 的功率-电流曲线测试结果
Fig. 5. Power-current-characteristics of $1550\ \text{nm}$ VCSEL under different operation temperatures.

图 6(a) 给出了工作温度为 $15\ ^\circ\text{C}$ 时, 采用横河 6370D 高精度光谱仪测得的 VCSEL 在 5.5 , 10 和 $15\ \text{mA}$ 工作电流下的激光光谱. 可以看出, VCSEL 在这 3 个工作电流下的激光光谱主峰模式 (基

模)与次级峰模式(高阶模)的强度差呈现非常好的单模输出特性^[21,22].当工作电流为10 mA时,VCSEL中心波长为1547.58 nm,边模抑制比(side mode suppression ratio, SMSR)达到了33 dB.随着工作电流增加,出光波长出现红移现象,这是因为VCSEL在工作电流增加时内部热效应增强导致的.

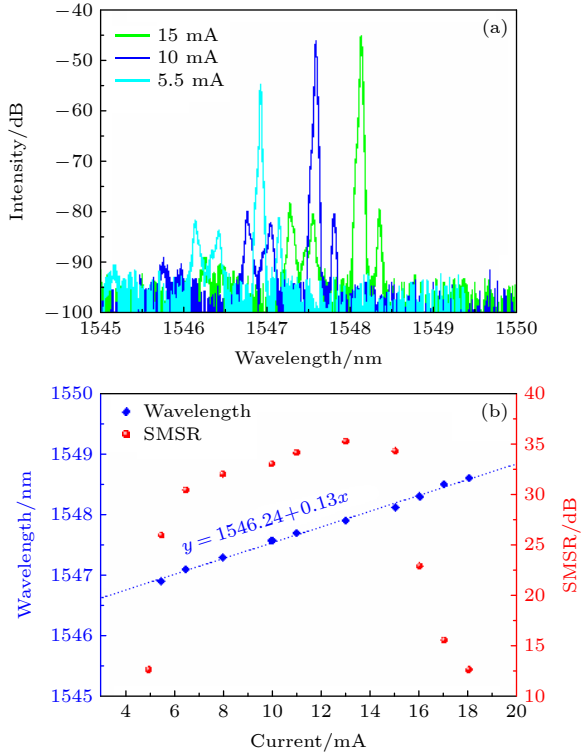


图6 工作温度为15 ℃时, (a) VCSEL在不同电流下的单模激光光谱, 以及 (b) 出光波长与SMSR随工作电流的变化关系

Fig. 6. (a) Single-mode spectra of 1550 nm VCSEL for various bias currents; (b) the wavelength and SMSR versus the operation current. The operation temperature is 15 ℃.

VCSEL出光波长与SMSR随工作电流的变化情况如图6(b)所示.当工作电流增加时,VCSEL的出光波长出现红移.从图6(b)可以看出,VCSEL的出光波长随工作电流呈近似线性变化,波长漂移速率为0.13 nm/℃.VCSEL的SMSR参数随工作电流呈现明显波动.工作电流在阈值电流附近($I = 5.5$ mA)时,由于VCSEL尚未正常激射,因而其SMSR较低,仅有13 dB.随着工作电流增加,SMSR快速增加.当工作电流为13 mA时,VCSEL的SMSR达到最大值35.2 dB.随着工作电流超出15 mA,VCSEL的SMSR快速下降.当工作电流为16 mA时,VCSEL的SMSR降至22.9 dB,

与文献[21]中单模VCSEL的结果对比,此时的SMSR仍高于20 dB,可以认为VCSEL的激光光谱仍然保持着较好的单模状态.根据图5中的功率-电流曲线,此时对应的VCSEL激光器单模出光功率为0.97 mW.此后随着工作电流继续增加,SMSR数值降至20 dB以下,激光器为多模工作.更高工作电流下VCSEL单模性变差的主要原因是大电流下VCSEL有源区内有更为严重的热积累.由于VCSEL为类似光纤模式的波导模型,在大电流下,中心区域高的工作温度使得VCSEL轴向折射率梯度进一步增加,由此引起激光器对高阶模式的导引效应增强,这使得VCSEL的高阶模式在大电流下更容易激射.

5 结论

本文报道了1550 nm波长的VCSEL研制结果.采用高增益发光区量子阱与隧穿结台面结构,实现了2.6 mW的最大出光功率.与国内其他单位报道相比,在1550 nm波段VCSEL研究中首次突破毫瓦级的激光功率水平;对VCSEL的单模性进行了测试,证实其最大单模出光功率可以达到0.97 mW,此时工作电流为16 mA.由于大电流下VCSEL内部热效应严重,高阶模式波导效应增强,因而更高工作电流下VCSEL的SMSR数值急剧下降.VCSEL的波长随工作电流有很好的线性变化,波长随电流漂移速率为0.13 nm/mA,这在气体传感所需的稳定波长调谐方面将会有很好的应用效果.本文1550 nm VCSEL单元器件的结果为下一步通过阵列集成获得高功率1550 nm VCSEL奠定了基础.高功率1550 nm波段VCSEL对于解决现阶段激光雷达的人眼安全问题具有重要意义.

参考文献

- [1] Kamau P, Ming M, Timothy B G, Christian N, Enno R, Markus O, Monroy I T 2011 *J. Opt. Commun. Netw* **3** 399
- [2] Boucher J F, Callahan J J 2011 *Proceedings of Defense, Security, and Sensing SPIE Orlando, United States, April 25-29, 2011* p80390B1
- [3] Nicolas D, Sébastien C 2002 *Prog. Energ. Combust.* **28** 107
- [4] Hofmann W, Muller M, Nadtochiy A, Meltzer C, Mutig A, Bohm G, Rosskopf J, Binberg D, Amann M C, Chang-Hasnain C 2009 *Opt. Express* **17** 17547
- [5] Dalila E, Michael Y, Hung K C, Sam S K, Neelanjan B, Sam C, Ghulam H, Mike H, Chris C 2020 *Proceedings of SPIE*

- OPTO* San Francisco, California, United States, February 1-6, 2020 p113000R
- [6] Ralph J, Virgil B, Jim T, Bo-Su C, David M, James O, Tzu-Yu W, Jin K, Ho-Ki K, Jae-Hyun R, Gyoungwon P, Edie K, Helen C, Mike R, Terry M, Joe G 2003 *Proceedings of Integrated Optoelectronics Devices SPIE* San Jose, CA, United States, January 25-31, 2003 p4994
- [7] Michael M, Werner H, Tobias G, Markus H, Philip W, Robin D N, Enno R, Gerhard B, Dieter B, Markus-Christian A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 1158
- [8] Syrbu A, Mircea A, Mereuta A, Caliman A, Berseth C A, Suruceanu G, Iakovlev V, Achtenhagen M, Rudra A, Kapon E 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1230
- [9] Gerhard B, Markus O, Robert S, Juergen R, Christian L, Markus M, Fabian K, Felix M, Ralf M, Markus-Christian A 2003 *J. Cryst. Growth.* **251** 748
- [10] Müller M, Hofmann W, Böhm G, Amann M C 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1615
- [11] Caliman A, Mereuta A, Suruceanu G, Iakovlev V, Sirbu A, Kapon E 2011 *Opt. Express* **19** 16996
- [12] Yi R, Yang W J, Christopher C, Michael C Y H, Philip W, Salman K, Mohammad R C, Morteza Z, Alan E W, Connie J C H 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **19** 1701311
- [13] Priyanka G, Mohit S, Ananya J, Monika K, Somendra P S, Nikita S, Gurjit K 2016 *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques(ICEEOT)*, Chennai, India, March 3-5, 2016 p4220
- [14] Zhao D, Yang H, Chuwongin S, Seo J H, Ma Z, Zhou W 2012 *IEEE Photonics. J.* **4** 2169
- [15] LIU L J, WU Y D, WANG Y, WANG L L, An J M, ZHAO Y W 2020 *J. Infrared Millim. Waves* **39**(4) 397
- [16] Dalila E, Valdimir I, Alexei S, Grigore S, Zlatco M, Andrei C, Alexandru M, Elyahou K 2014 *Opt. Express* **22** 32180
- [17] Zhang J Y, Zhang J W, Zeng Y G, Zhang J, Ning Y Q, Zhang X, Qin L, Liu Y, Wang L J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 054204 (in Chinese) [张继业, 张建伟, 曾玉刚, 张俊, 宁永强, 张星, 秦莉, 刘云, 王立军 2020 *物理学报* **69** 054204]
- [18] Weng W C, Kent D C, Mary H C, Kevin L L, Hadley G R 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **33** 1810
- [19] Hadley G R 1995 *Opt. Lett.* **20** 1483
- [20] Zhang J W, Zhang X, Zhu H B, Zhang J, Ning Y Q, Qin L, Wang L J 2015 *Opt. Express* **23** 14763
- [21] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, Kicherer M, Riedl M C, Ebeling K J 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 939
- [22] Nikolay N L, James A L, Jorg R K, Vitaly A S, Dieter B, Philip M, Gerrit F, Alexey S P, Denis M, Gerard K, Adrian A, Leonid Y K, Sergey A B, Innokenty I N, Nikolay A M, Christoph C, Ronald F 2012 *Proceedings of SPIE OPTO* San Francisco, California, United States, January 21-26, 2012 p82760K

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

Zhang Jian-Wei¹⁾ Zhang Xing^{1)2)†} Zhou Yin-Li¹⁾ Li Hui³⁾
Wang Yan-Bing²⁾ Chen Zhi-Ming³⁾ Xu Jia-Qi³⁾
Ning Yong-Qiang¹⁾ Wang Li-Jun¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*Ace Photonics Co. Ltd., Changchun 130102, China*)

3) (*Qingdao University of science and technology, Qingdao 266061, China*)

(Received 19 November 2021; revised manuscript received 1 December 2021)

Abstract

We report on a 1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with single mode power of 0.97 mW. The quaternary AlGaInAs quantum well is designed to improve the gain level in an active region. The mesa structure with tunneling capability is designed and fabricated to achieve the efficient carrier injection and the transverse mode guiding. The distributed Bragg reflector (DBR) mirror of 1550 nm VCSEL consists of the semiconductor DBR and outer dielectric DBR. The central wavelength of VCSEL is 1547.6 nm. The maximum output power of 2.6 mW is achieved at 15 °C, and the maximum single-mode output power is 0.97 mW. The side mode suppression ratio (SMSR) can reach more than 35 dB. The maximum output power decreases with operation temperature increasing. However, the maximum output power of more than 1.3 mW is also gained at 35 °C. The shift coefficient of the central wavelength varying with the operation current is 0.13 nm/mA. And the wavelength shows a stable shift with the operation current in the single-mode working region, which indicates the application possibility in the field of gas detection.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, long wavelength, single-mode operation, optical communication, sensing and detection

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 84.40.Ua

DOI: [10.7498/aps.71.20212132](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB2002401), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62090060, 61727822), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61874117, 11774343, 61804087), the Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan, China (Grant No. 20200401006GX), and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2019QF015).

† Corresponding author. E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn