

激光与光电子学进展

氧化限制结构 940 nm 垂直腔面发射激光器

颜伟年^{1,2,3}, 王秋华^{1,3}, 周亨杰^{1,3}, 邱平平^{1,3}, 赵玲娟^{1,2,3}, 阚强^{1,2,3*}¹中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;³低维半导体材料与器件北京市重点实验室, 北京 100083

摘要 为研究氧化限制结构孔径对 940 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 特性的影响, 制备了不同氧化孔径的 940 nm VCSEL, 并进行了测试分析。通过 PICS3D 软件对不同量子阱势垒材料的增益进行仿真计算, 选取具有较高有源区材料增益的 InGaAs/AlGaAs 作为量子阱, 并开展了增益-腔模失配设计。在设计优化的基础上, 制备了 6 种氧化孔径的 940 nm VCSEL, 对其光电输出特性进行测试。结果表明: 氧化孔径为 4 μm 的 VCSEL, 室温下斜率效率为 0.93 W/A, 最大功率转换效率为 40.1%; 氧化孔径为 7 μm 的 VCSEL, 室温下最大输出功率为 12.24 mW; 氧化孔径为 2 μm 的 VCSEL, 室温下最大基横模功率为 2.67 mW。该器件在 2 mA 连续驱动电流下, 在 10~80 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内均可实现边模抑制比大于 45 dB 的基横模输出。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 氧化限制结构; 基横模; 孔径

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221703

Oxide-Confined 940 nm Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

Yan Weinian^{1,2,3}, Wang Qiu-hua^{1,3}, Zhou Heng-jie^{1,3}, Qiu Ping-ping^{1,3}, Zhao Ling-juan^{1,2,3}, Kan Qiang^{1,2,3*}¹Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;²College of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Beijing 100083, China

Abstract In order to study the influence of oxide aperture diameter on the characteristics of 940 nm vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), 940 nm VCSELs with varied oxide apertures were fabricated, and then tested for analyzing. The gain of the quantum wells with different candidate barrier materials was simulated by PICS3D software, and InGaAs/AlGaAs was selected because of the higher gain. Moreover, the gain-cavity mode detuning was introduced in the design. On the basis of optimization, 940 nm VCSELs with six oxide apertures were fabricated and their photoelectric output characteristics were tested. The results show that the VCSEL with 4 μm oxide aperture achieves a slope efficiency of 0.93 W/A at room temperature and a maximum power conversion efficiency of 40.1%. For VCSEL with 7 μm oxide aperture, the maximum output power reaches 12.24 mW at room temperature. The VCSEL with 2 μm oxide aperture can operate on the fundamental transverse mode condition with maximum output power of 2.67 mW at room temperature, and maintain the fundamental transverse mode with a side-mode suppression ratio greater than 45 dB at 2 mA continuous injection current, on the working temperature from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting laser; oxide-confined structure; fundamental transverse mode; aperture diameter

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有低阈值、天然

单纵模、低成本、易于二维集成、圆形对称光斑和无腔面损伤阈值 (COMD) 等优点^[1-5], 广泛应用于原子传感^[6]、光纤通信^[7]、三维 (3D) 传感^[8]、照明^[9]、光学开

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-06-16; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (62134008)

通信作者: *kanqiang@semi.ac.cn

关^[10]和泵浦源^[11-12]等领域。940 nm VCSEL 光源由于其红暴现象弱及受太阳光干扰较小等因素,广泛应用于光探测及 3D 传感领域^[13],因此获得高性能 940 nm VCSEL 光源仍是当今科研工作者的研究热点^[14-15]。

2019 年, Khan 等^[16]利用 Zn 扩散结合氧化限制结构成功制备出氧化孔径 8 μm 、基横模功率 6.8 mW 的 940 nm VCSEL。同年,于洪岩等^[13]利用 InGaAs/GaAsP 应变补偿量子阱成功制备出氧化孔径为 8 μm 、6 mA 的连续驱动电流下输出功率为 4.75 mW 的多横模 VCSEL,并分析了其高温工作特性。2020 年,北京邮电大学 Ren 等^[17]利用模式滤波器和半波长谐振腔成功制备出氧化孔径为 6 μm 、基横模功率 1.4 mW 的 VCSEL。2021 年,中国科学院微电子研究所 Xun 等^[18]研究并成功制备了 30 $^{\circ}\text{C}$ 下功率转换效率为 43%、最大输出功率达 210 mW、氧化孔径为 10 μm 的 940 nm VCSEL 阵列。2022 年,中国科学院高能物理研究所的 Wang 等^[19]利用 InGaAs/GaAsP 应变补偿量子阱和氧化限制结构成功制备出氧化孔径为 10 μm 、20 $^{\circ}\text{C}$ 下最大输出功率约为 11 mW、最大电光转换效率为 48% 的 VCSEL。同年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Li 等^[20]利用 8 μm 氧化限制孔结合表面浅浮雕结构成功制备出 92 $^{\circ}\text{C}$ 温度下单模输出功率为 2.02 mW 的 894 nm VCSEL。近期,北京工业大学 VCSEL 团队报道了利用氧化限制型结构成功制备出边模抑制比 (SMSR) 大于 35 dB、基横模功率为 0.75 mW 可用于铯原子钟的 894 nm VCSEL^[21]。这些 VCSEL 都采用氧化限制结构,并选取了不同的氧化孔径尺寸,氧化孔径尺寸对 VCSEL 特性的影响还有待仔细分析。研究氧化限制结构尺寸对 940 nm VCSEL 特性的影响,对于其不同领域的应用具有重要意义。

本文通过 PICS3D (Photonic Integrated Circuit Simulator in 3D) 软件仿真设计,选取具有较高材料增益的 InGaAs/AlGaAs 作为有源区材料,并进行了合理的增益-腔模失配量设计。在设计基础上制备 6 种氧

化限制孔径 (2~7 μm) 的 940 nm VCSEL,对其光电基本特性进行测试,并对 2 μm 氧化孔径 940 nm VCSEL 进行了变温特性的测试与分析。

2 有源区仿真设计

VCSEL 的载流子复合主要在有源区进行,有源区结构直接影响激光器的阈值、内量子效率、微分增益、斜率效率和输出功率等器件性能,因此有源区的仿真设计尤为重要。随着激光器工作温度升高,有源区材料峰值增益波长和腔模发生红移,且有源区材料峰值增益波长红移速率大于腔模,因此为使激光器有源区材料增益峰值波长和腔模在特定的温度和额定工作电流下匹配,本文在设计时加入了 12 nm 增益-腔模失配量 (量子阱峰值增益波长设计为 928 nm)。

根据半导体材料带隙能量和波长匹配关系,采用 InGaAs 作为量子阱材料,利用 PICS3D 软件仿真了 InGaAs 量子阱材料在同一宽度和同一峰值增益波长 (928 nm) 下,势垒材料分别为 GaAs、GaAs_{0.92}P_{0.08} 和 Al_{0.37}Ga_{0.63}As 的有源区材料增益谱,如图 1(a) 所示。这三种势垒结构的 InGaAs 量子阱组分各是 0.155、0.13 和 0.2。从图 1 可以看出,AlGaAs 作为势垒材料的增益最高,因此我们选取 InGaAs/AlGaAs 作为有源区材料。利用 PICS3D 软件仿真了有源区 (5 对 5 nm In_{0.2}Ga_{0.8}As 和 8 nm Al_{0.37}Ga_{0.63}As 交替组成) 不同温度的增益谱 [图 1(b)] 和不同温度下往返相位随波长变化关系 [图 2(a)], 从而获取相位零点的波长即谐振波长。从图 1(b) 可以看出,随着有源区温度的增大,材料增益谱的峰值在下降,增益峰值波长发生红移。谐振波长和增益峰值波长随温度的变化关系图汇总于图 2(b), 图中实线为增益峰值波长的拟合曲线,虚线为谐振波长的拟合曲线。由图 2(b) 可以拟合计算得到谐振波长和峰值增益波长随有源区温度的红移速率分别为 0.043 nm/K 和 0.370 nm/K, 以及二者在有源区温度为 341 K 时匹配, 波长为 940.6 nm, 由此证明, 所设计的增

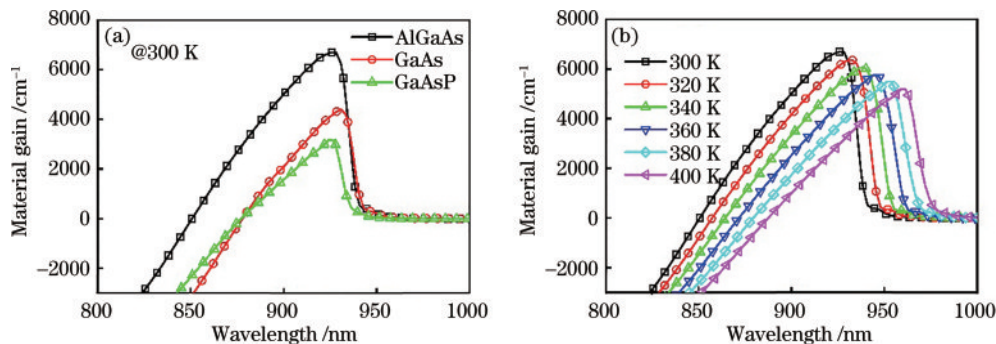


图 1 仿真结果。(a) 300 K 温度下,以 InGaAs 作为量子阱,仿真不同势垒材料对应有源区在载流子浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 下的材料增益谱;(b) 仿真 InGaAs/AlGaAs 有源区在载流子浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 下温度从 300 K 到 400 K 的材料增益谱

Fig. 1 Simulation results. (a) Material gain spectra of different barrier materials corresponding to the active region at a carrier concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at 300 K using InGaAs as a quantum well; (b) simulated material gain spectra of the active region of InGaAs/AlGaAs at a carrier concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at temperatures from 300 K to 400 K

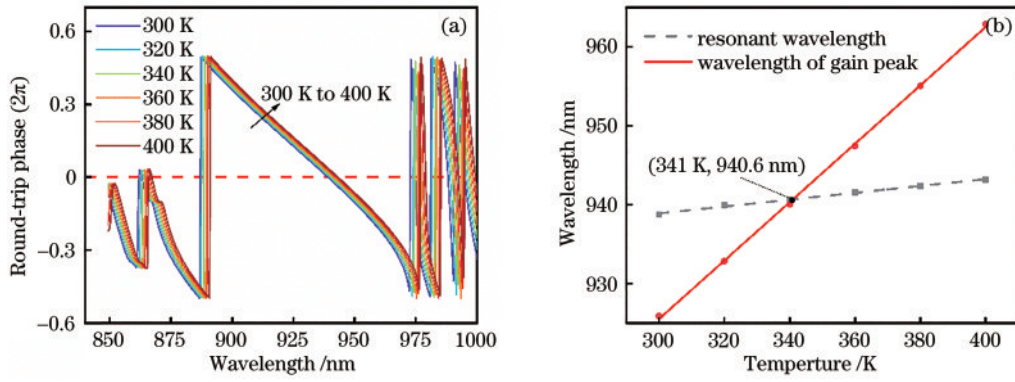


图 2 仿真结果。(a)不同温度下的往返相位分布;(b)不同温度下峰值增益波长和谐振波长随有源区温度变化关系

Fig. 2 Simulation results. (a) Round-trip phase at different temperatures; (b) relationship between peak gain wavelength and resonant wavelength and active region temperature at different temperatures

益-腔模失谐量 12 nm 合理,符合本文设计需求。

3 器件制备与测试分析

3.1 器件制备

VCSEL 器件结构示意图如图 3 所示。底部分布布拉格反射(DBR)和顶部 DBR 分别由 38.5 对掺硅和 19 对掺碳的 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ (46.38 nm)/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$

(54.37 nm) 及介于二者之间 20 nm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 渐变层(其中 Al 组分为 0.12~0.9 或 0.9~0.12)构成。有源区为 5 对 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}$ 压应变量子阱结构,并与两侧的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 限制异质结构层构成 $1-\lambda$ 腔。30 nm AlAs 生长于不掺杂的 $1-\lambda$ 腔上作为氧化限制层。氧化限制结构通过湿法氧化工艺制备,对电流和光场均起到限制作用。

该 VCSEL 器件外延片由 MOCVD 设备生长得到,通过光致发光光谱仪测得外延片的光致发光(PL)谱的峰值位于 928 nm,符合预期。940 nm VCSEL 器件的制备主要包含以下步骤:P 型环形保护电极的制备、生长 SiN_x 保护层、DBR 刻蚀、湿法氧化、钝化、开电极窗口、制作 P 型电极、减薄和制作 N 型电极工艺,具体工艺流程如图 4 所示。制备完成的 940 nm VCSEL 台面和横截面的扫描电子显微镜图像(SEM)分别如图 5(a)、(b)所示,其中图 5(b)为氧化限制孔径为 2 μm VCSEL 器件的截面图。本文成功制备了氧化孔径为 2 μm 、3 μm 、4 μm 、5 μm 、6 μm 、7 μm 共 6 种 940 nm 顶发射 VCSEL,通过红外显微镜观察到的图像如图 5(c)所示。

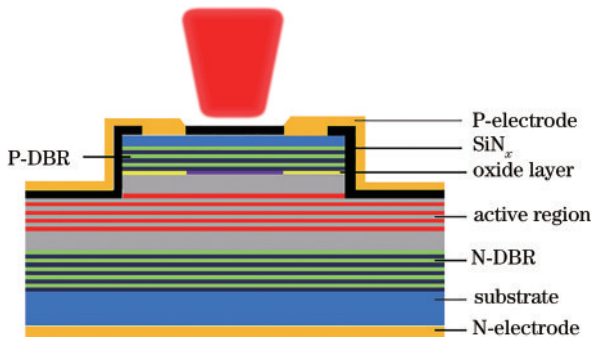


图 3 顶发射 940 nm VCSEL 结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of top-emitting 940 nm VCSEL

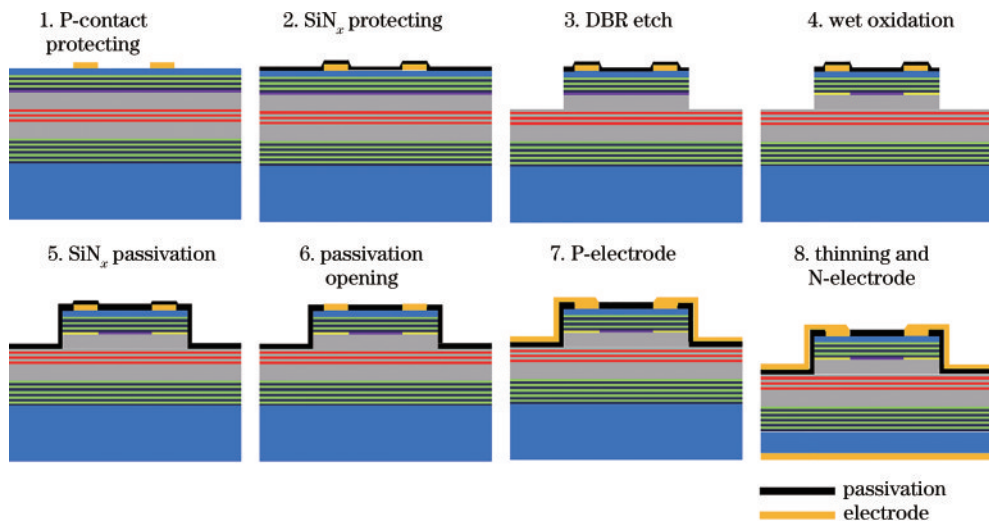


图 4 顶发射 940 nm VCSEL 制备工艺流程图

Fig. 4 Fabrication process flow chart of top-emitting 940 nm VCSEL

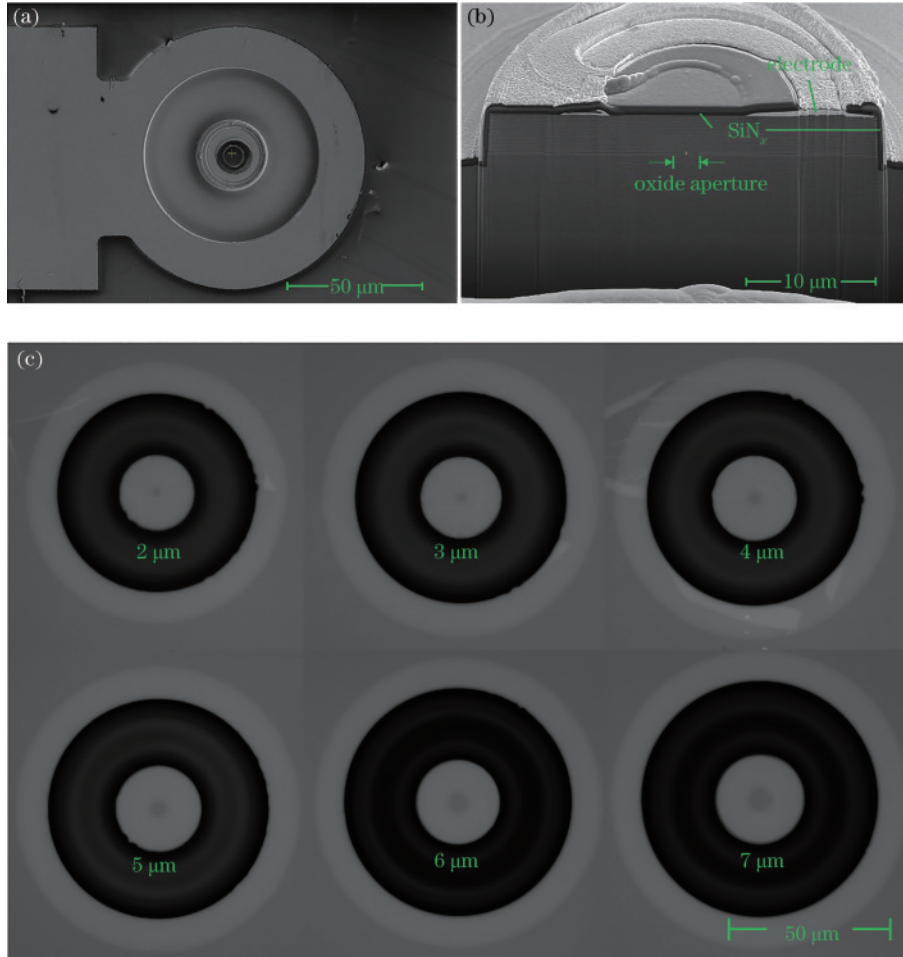


图 5 顶发射 940 nm VCSEL 扫描电子显微镜图像。(a) 器件表面图；(b) 器件截面图；(c) 不同氧化孔径 VCSEL 的红外显微镜图像
Fig. 5 SEM images of top-emitting 940 nm VCSEL. (a) Device surface view; (b) device cross-sectional view; (c) infrared microscopy images of VCSELs with different oxide apertures

3.2 器件测试分析

本文对氧化孔径 2~7 μm 的 VCSEL 进行了光电输出特性测试。图 6 (a) 为室温下不同氧化孔径 VCSEL 的功率-电流-电压 ($P-I-V$) 曲线。并计算绘制不同氧化孔径 VCSEL 的功率转换效率 (PCE) 曲线, 结果如图 6 (b) 所示, 以及相对应的光电输出特性参数如表 1 所

示。结果表明, 在室温下, 随着 VCSEL 氧化孔径的增大, 开启电压没有明显变化 (1.5 V 左右), 阈值电流、最高输出功率和工作电流随之增大。氧化孔径为 4 μm 的器件斜率效率为 0.93 W/A, 最大功率转换效率为 40.1%, 氧化孔径为 7 μm 的器件在 19.30 mA 的连续驱动电流下, 最大输出功率为 12.24 mW。

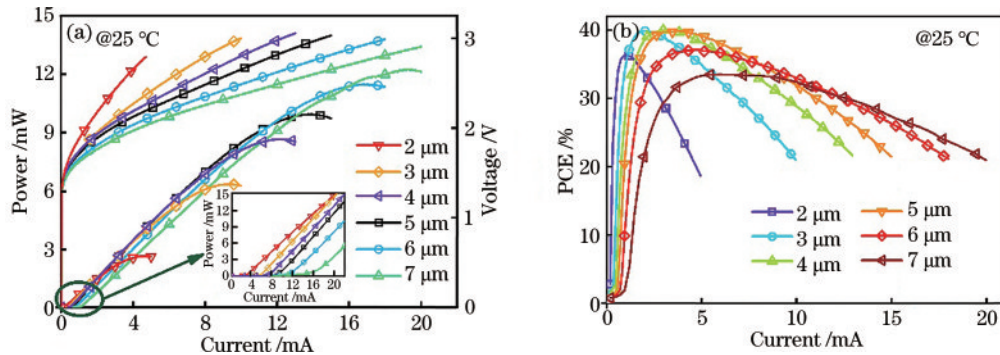


图 6 室温下, 氧化限制尺寸 2~7 μm 的 940 nm VCSEL。(a) $P-I-V$ 测试曲线; (b) PCE 测试曲线
Fig. 6 940 nm VCSEL with oxide-defined apertures of 2~7 μm at room temperature. (a) $P-I-V$ test curves; (b) PCE test curves

室温下, 本文还对不同孔径的 VCSEL 在 3 mA 连续驱动电流下的光谱进行了测试, 如图 7 所示。测试

结果表明, 在 3 mA 的驱动电流下, 随着 VCSEL 氧化限制孔径的增大, 会激发更多模式激射。对于氧化孔

表 1 室温下不同氧化孔径 VCSEL 的光电输出特性参数

Table 1 Photoelectric output characteristics of VCSELs with different oxide-defined apertures at room temperature

Aperture / μm	Threshold current /mA	Threshold current density /($\text{kA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Differential resistance / Ω	Slope efficiency / ($\text{W}\cdot\text{A}^{-1}$)	Maximum output power / ($\text{mW}@$ mA)	Peak value PCE
2	0.19	1.51	287	0.75	2.67@5.00	36.3%@1.02 mA
3	0.38	1.34	148	0.86	6.33@9.20	39.9%@2.02 mA
4	0.50	1.00	109	0.93	8.64@12.14	40.1%@3.10 mA
5	0.64	0.82	91	0.92	9.92@13.94	39.8%@3.34 mA
6	0.80	0.71	82	0.90	11.47@16.84	37.1%@4.66 mA
7	1.15	0.75	66	0.86	12.24@19.30	33.5%@5.95 mA

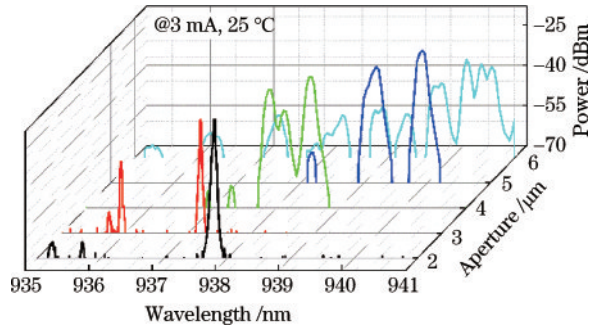
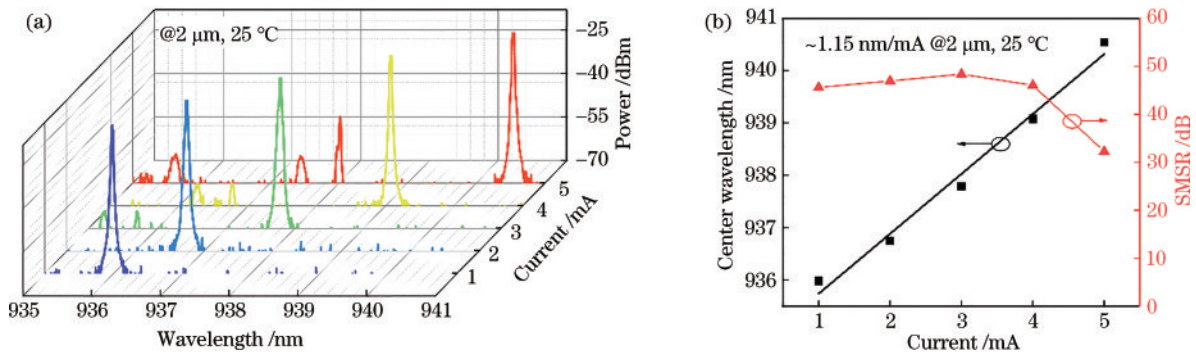


图 7 室温下,不同氧化限制尺寸 940 nm VCSEL 在 3 mA 连续电流驱动下的光谱

Fig. 7 Spectra of 940 nm VCSELs with different oxide-defined apertures driven by 3 mA continuous current at room temperature

径为 2 μm 的 940 nm VCSEL, 3 mA 的电流下为基横模激射, 边模抑制比为 48 dB。因此, 本文针对氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 光电特性进行了更为细致的研究。

室温下, 本文测试了氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 不同注入电流下的光谱, 结果如图 8(a) 所示, 图 8(b) 为该器件不同电流对应的出射光中心波长和边模抑制比。从图 8 可以看出, 室温下在全电流范围内该器件都处于基横模激射, 随着电流的增大, 中心波长近似呈线性关系并发生红移, 电流波长漂移系数为 1.15 nm/mA。当连续驱动电流小于等于 4 mA 时, 器件基横模边模抑制比大于 45 dB, 当连续驱动电流为 5 mA 时, 器件输出的中心波长为 940.5 nm, 边模抑制比为 32 dB, 且此时基横模功率达到最大, 为 2.67 mW。

图 8 氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL。(a) 不同注入电流下的光谱;(b) 不同驱动电流下的中心波长和边模抑制比Fig. 8 940 nm VCSELs with an oxide-defined aperture of 2 μm . (a) Spectra at different injection currents; (b) center wavelength and SMSR at different drive currents

室温下, 本文还对氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 在不同连续驱动电流的远场发散角进行了测试。该器件的远场分布呈圆形对称, 选取其中一个维度的远场强度曲线进行绘制, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 远场发散角随着驱动电流的增大而增大, 1~5 mA 下的 $1/e^2$ 远场发散角分别为 27.3°、28.1°、29.2°、30.5°、31.8°。

除了室温下的光电输出特性, 本文还对氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 不同温度下的输出特性进行了研究。图 10(a)、(b) 分别展示的是氧化孔径为 2 μm 的

940 nm VCSEL 在连续驱动电流为 2 mA 和 5 mA 下的热沉温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 的光谱特性。图 10(c) 为连续驱动电流为 2 mA 和 5 mA 下器件输出中心波长和边模抑制比随热沉温度的变化曲线, 可见中心波长随热沉温度的增大而线性增大, 2 mA 和 5 mA 连续驱动电流下的温度-波长漂移系数分别为 0.0626 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 和 0.0695 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 5 mA 下的波长漂移系数略大于 2 mA, 这主要是由于随着电流的增大, 器件的耗散功率增大。有源区温度^[2]表示为

$$T_{ac} = T_a + R_{th} P_{diss}, \quad (1)$$

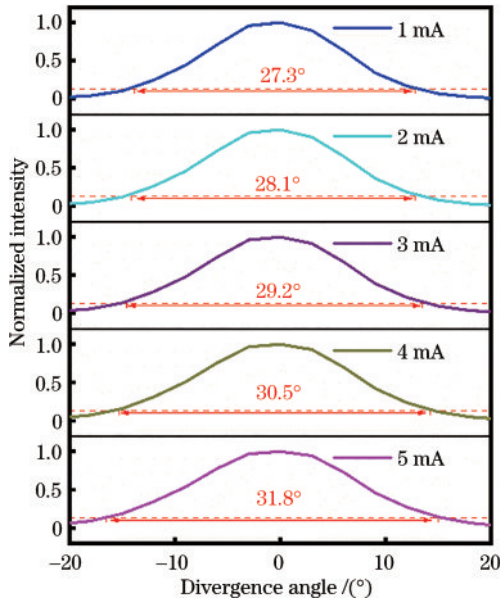


图 9 氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 不同驱动电流下远场发散角测试曲线
 Fig. 9 Far-field divergence angle test curves under different drive currents of 940 nm VCSEL with an oxide-defined aperture of 2 μm

式中: T_{ac} 为有源区温度; T_a 为热沉温度; P_{diss} 为耗散功率。可知较大耗散功率下的有源区温升较大,即在相同热沉温升的情况下,5 mA 电流下有源区温升大于 2 mA,这就导致测试得到的 5 mA 电流下的波长漂移速率大于 2 mA。除此以外,可以发现测试得到的温度-波长漂移速率大于仿真得到的谐振波长漂移速率 0.043 nm/K,这同样可以由式(1)解释:由于测试变量的是热沉温度,仿真变量的是有源区温度,随着热沉温度的增大,器件的热阻和耗散功率均会增大^[22],有源区温升为大于热沉温升,因此出现测试得到的温度-波长漂移系数大于仿真得到的漂移系数的现象。

实验结果表明:连续驱动电流为 2 mA 时,该器件在 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 区间内都为基横模激射,边模抑制比大于 45 dB;连续驱动电流 5 mA 时,器件出射光边模抑制比随着温度的升高而增大,特别地,在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下边模抑制比为 44 dB,基横模输出功率为 1.25 mW。图 10(d)为该器件连续电流驱动下热沉温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 所对应的 P - I 曲线,相应的光电输出特性参数如表 2 所示。结果表明,氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 在热沉温度为 10 $^{\circ}\text{C}$ 时,在 5.11 mA 连续驱动电流下的输出功率为 3.11 mW。

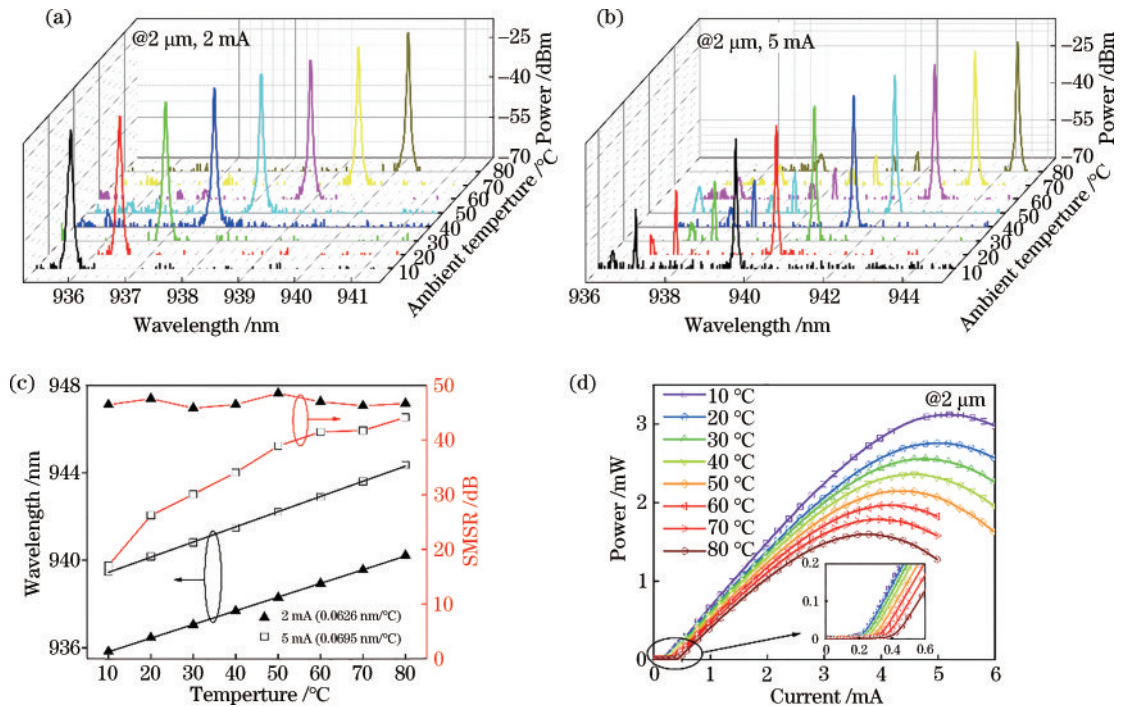


图 10 氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL。(a) 在 2 mA 连续驱动电流下,温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 的光谱测试图;(b) 在 5 mA 连续驱动电流下,热沉温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 的光谱测试图;(c) 在 2 mA 和 5 mA 连续驱动电流下,不同热沉温度下器件出射光的中心波长和边模抑制比;(d) 热沉温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 的 P - I 输出曲线
 Fig. 10 940 nm VCSEL with an oxide-defined aperture of 2 μm . (a) Spectral test plots at 2 mA continuous drive current for temperatures from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$; (b) spectral test plots at 5 mA continuous drive current for heat sink temperatures from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$; (c) excitation center wavelength and SMSR of the device at different heat sink temperatures under 2 mA and 5 mA continuous drive currents; (d) P - I output curves of heat sink temperature from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$

表 2 氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 的温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 范围内光电输出特性参数Table 2 Photoelectric output characteristics of 940 nm VCSEL with an oxide-defined aperture of 2 μm under the temperature ranging from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Threshold current /mA	Slope efficiency /($\text{W}\cdot\text{A}^{-1}$)	Maximum output power /mW	Drive current /mA
10	0.19	0.85	3.11	5.11
20	0.19	0.78	2.76	4.94
30	0.22	0.74	2.57	4.82
40	0.25	0.72	2.35	4.50
50	0.28	0.69	2.15	4.26
60	0.32	0.67	1.96	4.16
70	0.35	0.65	1.79	3.95
80	0.42	0.62	1.59	3.76

4 结 论

本文设计并成功制备了氧化限制结构压应变量子阱 940 nm VCSEL。并对 2~7 μm 氧化孔径 940 nm VCSEL 的光电输出特性和 2 μm 氧化孔径器件的远场发散角及不同温度下的输出特性进行了测试分析。结果表明:氧化孔径为 7 μm 的 VCSEL 室温连续输出功率可达到 12.24 mW;氧化孔径为 4 μm 的 VCSEL,斜率效率为 0.93 W/A,最大功率转换效率为 40.1%;氧化孔径为 2 μm 的 940 nm VCSEL 在全电流范围内都能保持基横模激射,最大基横模功率为 2.67 mW。在 2 mA 驱动电流下,对 2 μm 氧化孔径 940 nm VCSEL 进行变温测试,在 10 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,器件保持基横模输出且边模抑制比大于 45 dB,温度-波长漂移系数为 0.626 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。本文的设计和测试分析为 940 nm VCSEL 的优化提供一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL)[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(10): 2229-2233.
- [2] Wilmsen C W, Temkin H, Coldren A L A. Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, fabrication, characterization, and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [3] Michael P, Robert F, Coppeta R A, et al. Electrical-stress driven oxidation in 940 nm oxide-confined VCSEL [J]. Semiconductor Science and Technology, 2022, 37(1): 015010.
- [4] Michalzic R. VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [5] 王翔媛, 崔碧峰, 李彩芳, 等. 垂直腔面发射激光器横模控制方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700008.
Wang X Y, Cui B F, Li C F, et al. Research progress of transverse mode control for vertical cavity surface emitting lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700008.
- [6] Li M, Wang Q H, Li Y B, et al. A vertical cavity surface emitting laser for CPT atomic clock[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69(6): 316-322.
- [7] Syrbu A, Mereuta A, Iakovlev V, et al. 10 Gbps VCSELs with high single mode output in 1310 nm and 1550 nm wavelength bands[C]//OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [8] Okur S, Scheller M, Seurin J F, et al. High-power VCSEL arrays with customized beam divergence for 3D-sensing applications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10938: 109380F.
- [9] Seurin J F, Xu G Y, Guo B M, et al. Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7952: 79520G.
- [10] 陈建军, 钟祝强, 李林福. 连续可变偏振光注入垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0714003.
Chen J J, Zhong Z Q, Li L F. Characteristics of polarization switching and bistability in vertical-cavity surface-emitting laser subject to continuous variable-polarization optical injection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0714003.
- [11] Hao Y Q, Ma J L, Yan C L, et al. A fundamental mode Nd: GdVO₄ laser pumped by a large aperture 808 nm VCSEL[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055003.
- [12] 项国洪, 贾思琪, 李德鹏, 等. 胶体量子点垂直腔面发射激光器的设计与仿真[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1901005.
Xiang G H, Jia S Q, Li D P, et al. Design and simulation of a colloidal quantum dot vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901005.
- [13] 于洪岩, 尧舜, 张红梅, 等. 940 nm 垂直腔面发射激光器的设计及制备[J]. 物理学报, 2019, 68(6): 064207.
Yu H Y, Yao S, Zhang H M, et al. Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(6): 064207.
- [14] 罗妍, 郝永芹, 晏长岭. 940 nm VCSEL 高折射率对比度亚波长光栅反射镜的设计[J]. 红外与毫米波学报,

- 2021, 40(6): 834-839.
- Luo Y, Hao Y Q, Yan C L. Design of high refractive index contrast subwavelength grating reflector for 940 nm VCSEL[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(6): 834-839.
- [15] Khan Z, Ledentsov N, Chorcho L, et al. Single-mode 940 nm VCSELs with narrow divergence angles and high-power performances for fiber and free-space optical communications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 72095-72101.
- [16] Khan Z, Shih J C, Cheng C L, et al. High-power and highly single-mode Zn-diffusion VCSELs at 940 nm wavelength[C]//2019 IEEE Photonics Conference, September 29-October 3, 2019, San Antonio, TX, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [17] Ren Q H, Wang J, Yang M, et al. Low-threshold, single-transverse-mode, 940-nm vertical-cavity surface-emitting laser with a mode filter and half-wavelength cavity[J]. *Quantum Electronics*, 2020, 50(8): 714-719.
- [18] Xun M, Pan G Z, Zhao Z Z, et al. Analysis of thermal properties of 940-nm vertical cavity surface emitting laser arrays[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(1): 158-163.
- [19] Wang C C, Li C, Wang Z Y. Analysis of optical and thermal properties of 940-nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(7): 438.
- [20] Li X, Zhou Y L, Zhang X, et al. High-power single-mode 894 nm VCSELs operating at high temperature (> 2 mW @ 365 K)[J]. *Applied Physics B*, 2022, 128(1): 16.
- [21] 王秋华, 李明, 邱平平, 等. 894 nm 高温工作氧化限制型基横模 VCSEL 研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 2021G007.
- Wang Q H, Li M, Qiu P P, et al. Study of high-temperature operating oxide-confined 894 nm VCSEL with fundamental transverse mode emission[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 2021G007.
- [22] Qiu P P, Wu B, Fu P, et al. Realization of single-transverse-mode VCSELs incorporating a built-in index guide[J]. *Optics Communications*, 2022, 504: 127450.