

椭圆氧化孔径垂直腔面发射激光器的偏振特性

谢中华^{1,2}, 渠红伟^{2,3*}, 周旭彦^{2,3}, 张建心^{2,4}, 隋佳桐^{1,2}, 孟凡胜^{2,3}, 官凯^{1,2}, 郑妹茵^{1,2}, 王海玲^{2,3}, 王宇飞^{2,3}, 齐爱谊^{2,3}¹曲阜师范大学物理工程学院, 山东 济宁 273165;²潍坊先进光电芯片研究院, 山东 潍坊 261000;³中国科学院半导体研究所固态光电信息技术实验室, 北京 100083;⁴潍坊大学物理与电子信息学院, 山东 潍坊 261061

摘要 为了改善用于铷原子钟的 795 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的偏振稳定性, 研究了不同氧化孔径和椭圆度对 VCSEL 偏振性能的影响。利用 COMSOL Multiphysics 的波动光学频域模块模拟了不同氧化孔径对有源区谐振光强的影响。结果表明, 当氧化孔径为 3.5~4.0 μm 时, 有源区的谐振强度最高。采用可实时观察的湿法氧化系统, 研究了氧化温度对氧化速率和氧化孔椭圆度的影响。随着注入电流的增加, 三种不同椭圆氧化孔的 VCSEL 表现出不同的模式特性、偏振特性和偏振角旋转特性。测试结果表明, 带有长轴径为 3.7 μm 、椭圆度为 1.7 的椭圆氧化孔的 VCSEL 性能最佳。在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下, 当注入电流为 1.5 mA 时, 输出功率为 0.86 mW, 激光波长为 795.4 nm, 边模抑制比 (SMSR) 为 43 dB, 线宽为 65 MHz, 正交偏振抑制比 (OPSR) 为 23.8 dB。在 0.6~2.7 mA 的范围内, VCSEL 的主偏振方向保持不变。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 氧化孔径; 湿法氧化; 正交偏振抑制比; 窄线宽

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231130

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有低阈值电流、单模、低功耗和高可靠性等优点, 被广泛应用于通信^[1]、传感^[2-3]和激光雷达等领域, 也是原子钟、原子磁力计、原子陀螺仪等量子精密测量仪器的理想光源^[4-6]。VCSEL 通常采用氧化限制结构进行模式调控, 实现电光限制^[7-8]。常规圆形氧化孔的 VCSEL 具有轴对称的结构, 偏振方向沿 $[110]$ 和 $[\bar{1}10]$ 两个晶向^[9], 较难实现对两个正交方向的偏振调控, 易出现随电流增加偏振不稳定现象^[10]。VCSEL 在芯片级原子钟等领域中的应用, 要求其具有稳定的偏振方向和高偏振抑制比^[11]。通过控制湿法氧化工艺的温度、气体压强等氧化条件, 能够制作具有非轴对称外形的氧化孔^[12], 利用非轴对称结构对 VCSEL 偏振模式进行调控, 可实现 VCSEL 激发单方向偏振的偏振光^[13]。利用表面光栅可调控 VCSEL 偏振特性。2013 年, Miah 等^[14]报道了表面光栅 VCSEL, 在衬底温度高达 80 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下, 主偏振模和抑制偏振模之间的峰值差达 25 dB; 他们还研究了表面光栅的纵向位置对阈值电流

的影响。2018 年, Liu 等^[15]利用位移 Talbot 光刻技术, 改进了表面光栅 VCSEL 的制作工艺, 实现了偏振稳定单模 894 nm VCSEL, 80 $^{\circ}\text{C}$ 下正交偏振抑制比 (OPSR) 为 30 dB。2020 年, 阚强团队报道了表面集成光栅结构的 894 nm VCSEL, 研究了不同光栅参数对偏振光损失的影响, 优化了表面光栅的参数, 使该结构 VCSEL 在 4 mA 下仍然能够保持 31 dB 的偏振比^[16]。表面光栅方式会明显增加成本和器件制作难度, 而制备非对称氧化孔的方式较容易实现。2018 年, 俄罗斯 Ioffe 实验室采用内嵌接触式菱形氧化孔的 895 nm VCSEL, 引入了非对称增益, 单模功率超过 1 mW, 偏振抑制比超过 20 dB, 线宽为 50 MHz, 工作温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ ^[17]。2018 年, Zhang 等^[18-19]利用非对称氧化方式, 制备了非对称氧化孔两垂直晶向孔径为 2.0 $\mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$ 的 VCSEL, 其正交偏振抑制比大于 20 dB, 边模抑制比大于 25 dB。2023 年, Xie 等^[20]发现三角形氧化孔可以优化 VCSEL 的模式选择和偏振选择, 制备了边模抑制比 (SMSR) 大于 20 dB、OPSR 为 10 dB 的器件。

本文采用 COMSOL Multiphysics 的波动光学频

收稿日期: 2023-08-22; 修回日期: 2023-11-03; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 山东省重点研发计划 (2022CXGC02104)、山东省重点研究开发计划 (2023ZLYS03)、广东省重点领域研究开发项目 (2020B090922003)

通信作者: *quhw@semi.ac.cn

域模块模拟了氧化孔径对有源区谐振光强的影响,为 VCSEL 椭圆形氧化孔长轴径大小的优化设计提供理论指导。本文采用可实时观察的湿法氧化系统,通过控制湿法氧化工艺的温度、气体压强等氧化参数,研究了氧化炉温度对氧化速率和椭圆度的影响。采用圆形台面制备了不同氧化孔长轴径和椭圆度的三种 VCSEL,并对其模式特性、偏振特性和偏振角旋转特性进行了分析研究。测试结果表明,椭圆氧化孔长轴直径为 $3.72\ \mu\text{m}$,椭圆度为 1.7 的 VCSEL 性能最佳,在 $85\ ^\circ\text{C}$ 条件下,在 $0.9\sim 2.7\ \text{mA}$ 的电流区间内,实现了高于 20 dB 的 OPSR 和高于 36 dB 的 SMSR。本文还测试并分析了三种椭圆氧化孔 VCSEL 的主偏振方向随电流变化的现象。其中, $3.72\ \mu\text{m}$ 长轴径氧化孔 VCSEL 的偏振方向在 $0.34\sim 2.70\ \text{mA}$ 区间不变。

2 二维模拟和椭圆氧化孔 VCSEL 的制备

2.1 二维模拟

利用 COMSOL Multiphysics 中的波动光学频域模块,对 $795\ \text{nm}$ VCSEL 进行了二维冷腔模拟,模拟平面为椭圆氧化孔长轴径($[110]$ 晶向)切面,VCSEL 偏振方向为椭圆短轴方向($[\bar{1}\bar{1}0]$ 晶向)^[21],模拟得到 $5\ \mu\text{m}$ 氧化孔径。当输入电磁波的频率为 $377.1\ \text{THz}$ 时,VCSEL 出光方向的光场分布和内部光场分布如图 1 所示。从图 1 可以看出,器件内部和出光方向的光场分布都相对纵向轴对称,光场主要分布在 VCSEL 有源区附近,且有源区中心点的光场强度最强。器件内部最大光场强度比出光方向的最大光场强度高一个数量级。

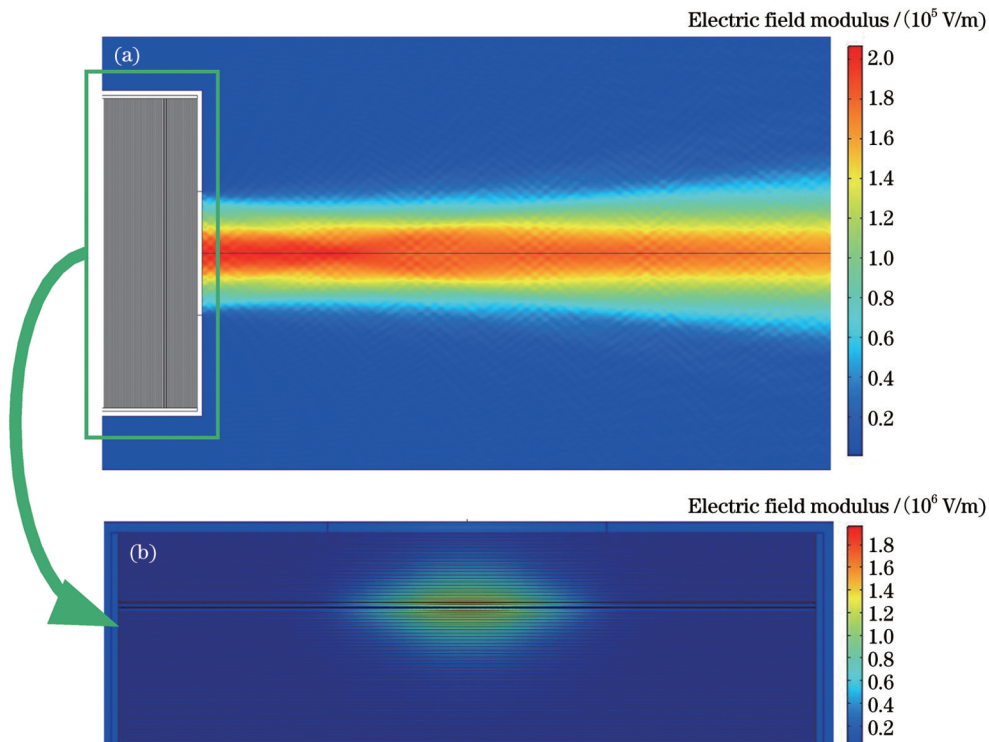


图 1 二维模型和其光场分布。(a)出光光场分布;(b)内部光场分布

Fig. 1 2D model and its light field distributions. (a) Distribution of outgoing light field; (b) internal light field distribution

接下来模拟不同氧化孔径下有源区光场强度的频谱特性。模拟得到了 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 氧化孔径下有源区中心的谐振强度频谱分布,如图 2 所示。VCSEL 冷腔的模拟结果表现的是谐振腔对波长的选择性和谐振能力。

图 2 中每条曲线峰值点的波长与孔径的关系如图 3(a)所示,随着氧化孔径的减小,谐振峰值波长蓝移。谐振曲线峰值点的谐振强度与氧化孔径的关系如图 3(b)所示,当氧化孔径为 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 时,谐振强度较大。据此推测,将 VCSEL 椭圆氧化孔长轴径设置在这一范围内,短轴径小于这一范围,使两正交方向有较大的谐振强度差,可达到控制偏振和模式选择的

目的。

2.2 椭圆氧化孔 VCSEL 的制备

VCSEL 的制备采用标准制备工艺流程。在外延片表面制作 Ti/Pt/Au 环形金属作为 P 型电极,接着生长 Si_3N_4 作为保护层;通过电感耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀设备刻蚀出台面结构,暴露出氧化层;进行湿法氧化,形成椭圆形氧化孔;采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 法沉积 Si_3N_4 介质膜作为绝缘膜和增透膜,光刻形成电流注入窗口;电镀制作 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 P 型电极;将衬底减薄抛光至 $130\ \mu\text{m}$,真空蒸镀 AuGeNi/Au 形成 N 型电极;在高温氮气环境下

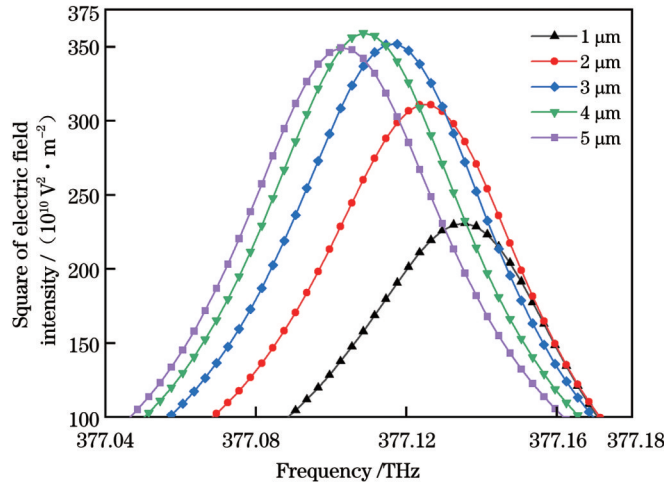


图 2 不同氧化孔径下有源区的谐振强度

Fig. 2 Resonance intensities in active region under different oxide apertures

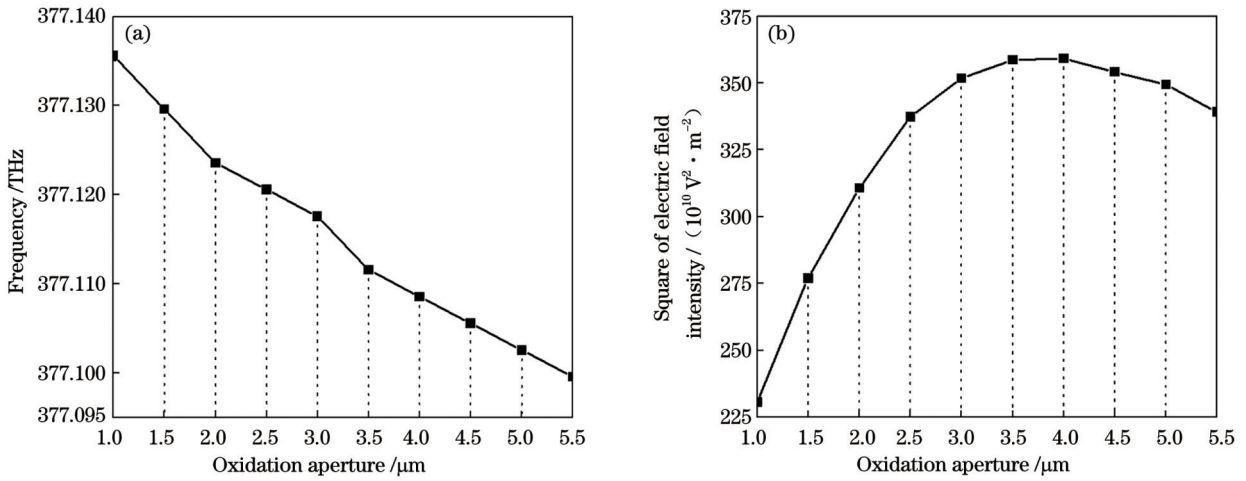


图 3 不同氧化孔径下的谐振光谱特征。(a)谐振频率;(b)谐振光强

Fig. 3 Resonance spectral characteristics under different oxide apertures. (a) Resonant frequency; (b) resonant light intensity

合金形成良好的欧姆接触。

其中湿法氧化采用的是在线监测氧化炉,利用圆形台面制备椭圆形氧化孔。氧化参数是:氮气流量 1 L/min,水流量 80 g/h,反应室压力 500 mbar(1 bar=10⁵ Pa)。图 4 为不同氧化温度下氧化孔径随时间的变化曲线。在 415、420、425 °C 三个温度下,计算得到氧化速度(氧化孔半径减小的速度)分别为 0.24、0.28、0.37 μm/min。

利用湿法氧化设备的红外摄像头拍摄图片,并进行数据处理。图 5(a)为红外摄像头拍摄的图片,截取其中一个氧化孔[图 5(b)],并转化为红绿蓝(RGB)颜色矩阵[图 5(c)]。利用颜色矩阵提取氧化孔外形,观察颜色矩阵中的数值大小[图 5(c)],选择数值变化较大的区域矩阵元,取其矩阵位置作为坐标点,进行椭圆拟合。拟合选取的坐标点和椭圆拟合效果如图 5(d)所示。在图 5(c)中,椭圆氧化孔的长轴径方向与晶向[110]相同,短轴方向与晶向[1-10]方向相同^[22]。

通过上述方法,得到氧化孔椭圆长轴径与椭圆度

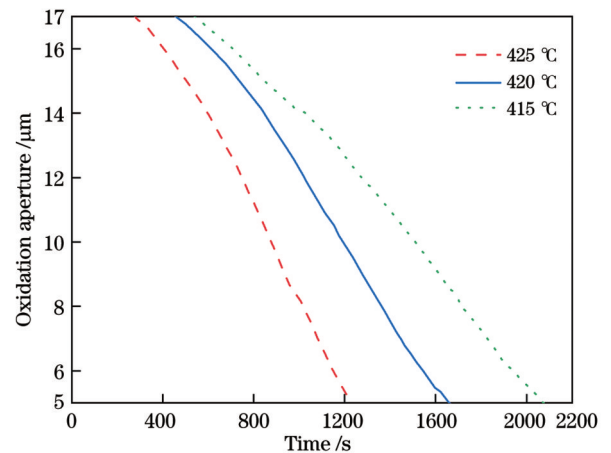


图 4 不同温度条件下氧化孔径和时间的关系

Fig. 4 Relationship between oxidation aperture and time under different temperature conditions

的关系,进行非线性拟合,结果如图 6 所示。在相同氧化温度下,随着椭圆氧化孔长轴径的减小,椭圆度增大。对于不同的氧化温度,氧化孔为 4 μm 后椭圆度达

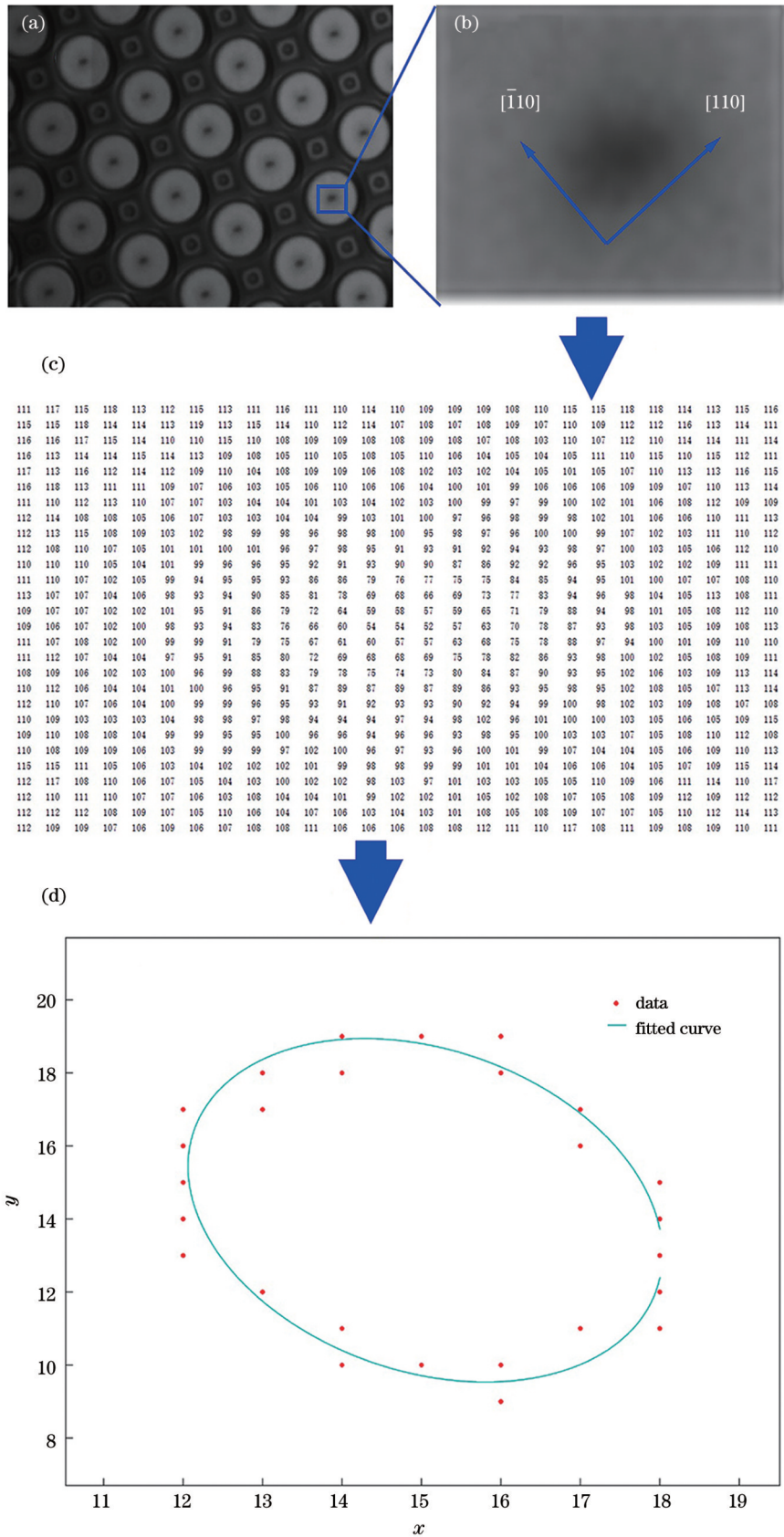


图 5 氧化孔图像处理。(a)红外摄像头拍摄的氧化孔;(b)氧化孔放大图;(c)图像的颜色矩阵;(d)拟合得到的椭圆
Fig. 5 Image processing of oxidation apertures. (a) Oxidation apertures captured by infrared cameras; (b) enlarged view of oxidation aperture; (c) color matrix of image; (d) ellipse obtained by fitting

到 1.4 以上,其中 420 °C 下氧化获得最大的椭圆度。最 圆度的三种 VCSEL,分别用 D1、D2 和 D3 表示。三种 VCSEL 氧化孔的椭圆长轴径分别为 2.5、3.7、4.7 μm,

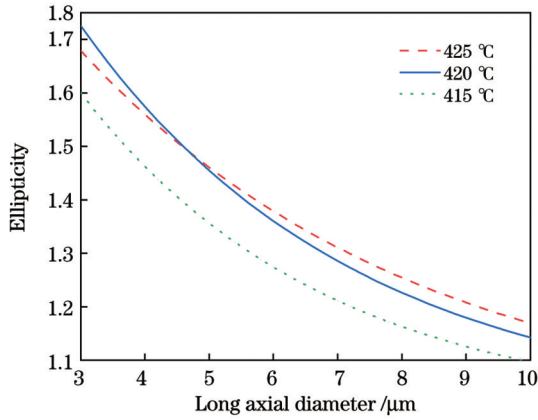


图6 不同温度下氧化孔椭圆度和其长轴径关系的非线性拟合图

Fig. 6 Nonlinear fitting diagram of relationship between ellipticity of oxidation aperture and its long axial diameter at different temperatures

相应的椭圆度分别 2.3、1.7、1.4。

3 性能测试

3.1 功率-电流-电压曲线测试与分析

图 7 为三种 VCSEL 在 25、45、65、85 °C 条件下的功率-电流-电压 ($P-I-V$) 曲线。从图 7 可见,随着氧化

孔径的增大,阈值电流增大;在相同注入电流下,输出功率增加,串联电阻下降,电压降低。在 25 °C 条件下, D1、D2 和 D3 的阈值电流分别为 0.33、0.36、0.46 mA。在 3 mA 注入电流下,输出功率分别 1.4、2.2、2.6 mW,电压分别为 2.70、2.33、2.11 V。随着温度的升高,三种器件的阈值电流减小,输出功率降低,电压略有降低。在 85 °C 下, D1、D2 和 D3 的阈值电流分别为 0.32、0.34、0.41 mA,输出功率分别 0.8、1.7、2.2 mW,电压分别为 2.62、2.24、2.03 V。氧化孔径越小,串联电阻越大,热饱和现象越严重。随着温度的升高,器件会更早出现热饱和现象,如 D1 器件在 25 °C 和 45 °C 下未出现饱和现象,但在 65 °C 下在 3 mA 左右出现饱和现象,在 85 °C 下在 2.7 mA 左右出现饱和现象,该器件不适合高温工作。而对于 D3 器件,在 85 °C 下在 3 mA 左右未出现热饱和现象。

表 1 为 1.5 mA 注入电流下,三种 VCSEL 器件在 25 °C 和 85 °C 下的性能参数。对比发现,随着温度的升高,三种器件的输出功率均减小,氧化孔径越大,减小幅度越小,高温特性越好。D2 在 25 °C 和 85 °C 下的输出功率分别为 1.01 mW 和 0.86 mW,下降了 14.85%。对于 D3,在 25 °C 和 85 °C 下输出功率分别为 1.05 mW 和 0.98 mW,下降了 6.67%。在 85 °C 时,在 1.5 mA 电

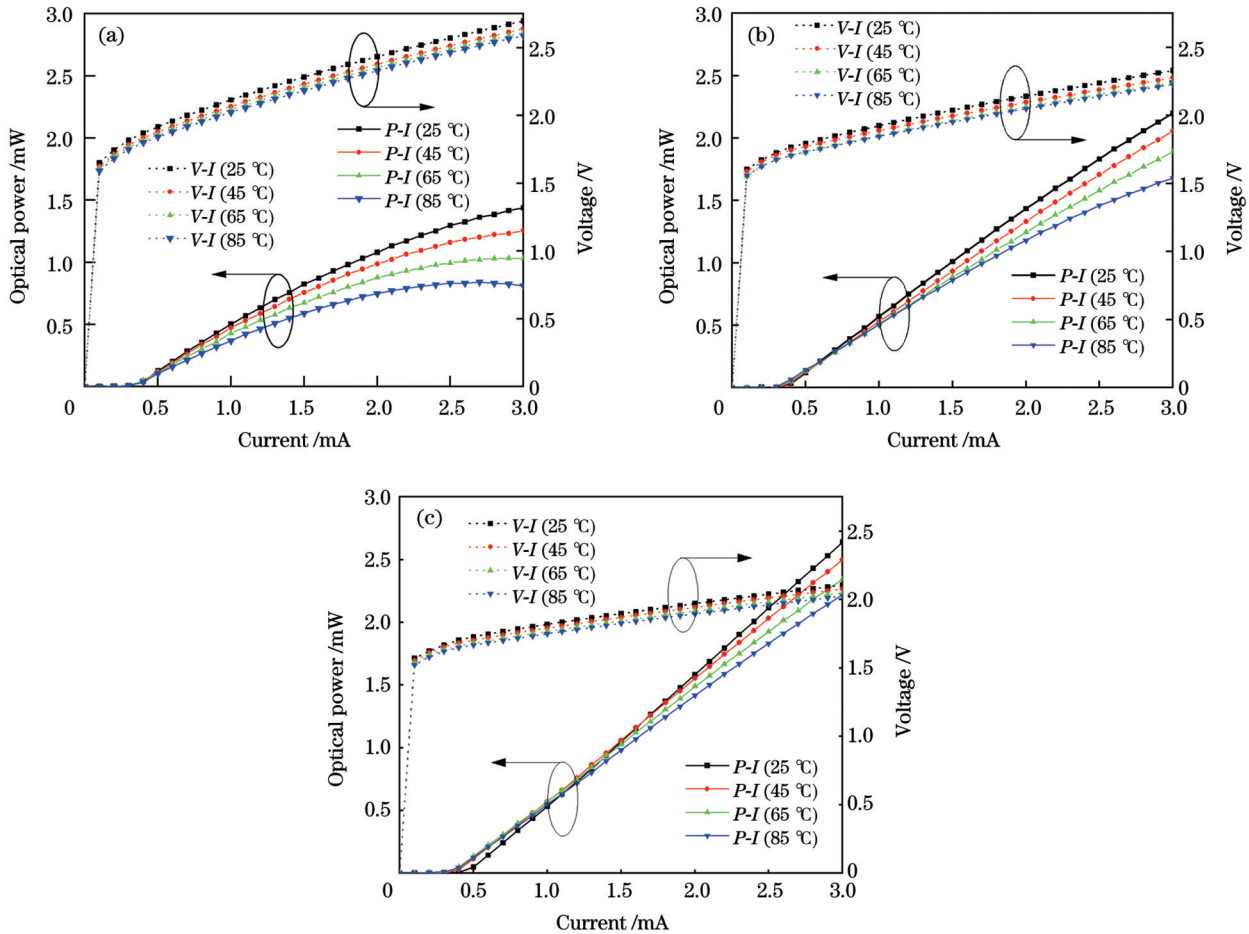


图7 不同 VCSEL 器件的 $P-I-V$ 曲线。(a) D1; (b) D2; (c) D3

Fig. 7 $P-I-V$ curves of different VCSEL devices. (a) D1; (b) D2; (c) D3

表 1 VCSEL 的性能参数对比(电流为 1.5 mA)

Table 1 Comparison of VCSEL performance parameters (current of 1.5 mA)

VCSEL	Output optical power /mW		Wavelength / nm		Threshold current /mA	
	25 °C	85 °C	25 °C	85 °C	25 °C	85 °C
D1	0.82	0.59	792.05	795.18	0.33	0.32
D2	1.01	0.86	792.27	795.40	0.36	0.34
D3	1.05	0.98	792.27	795.35	0.46	0.41

流下, D1、D2 和 D3 三种 VCSEL 的波长为 795.18、794.40、795.35 nm, 均满足铷原子钟波长要求[(795±0.5)nm]。

3.2 光谱测试与分析

SMSR 和 OPR 的测量方式示意图如图 8 所示。SMSR 的测量方法如下: 将 VCSEL 输出的光直接耦合到光纤中, 然后将光纤另一端连接光谱仪, 测得 VCSEL 发射波长和边模抑制比。OPSR 的测量方法如下: 将偏振片和光功率计依次放置在 VCSEL 出光方向的光路上, 旋转偏振片, 当功率计显示最小值(或最大值)时, 在任意方向上再次旋转偏振片 90°, 记录功率计显示的最大值(或最小值)及最大值与最小值的比值, 通过计算得到 OPSR(计算方法见文献[20])。

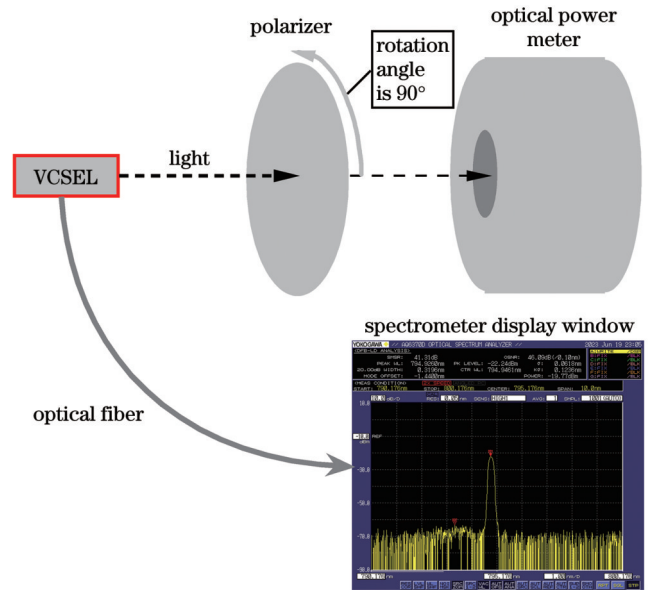


图 8 SMSR 和 OPSR 的测试方式示意图

Fig. 8 Schematic of testing methods for SMSR and OPSR

采用光谱仪对三种 VCSEL 在不同电流下的光谱特性进行了测试, 图 9 为 85 °C 时三种 VCSEL 在不同电流下的光谱图。随着孔径的变大, VCSEL 开始出现多模时的电流变小。D1 在 3 mA 以下都能保持单模工作, D3 在 1.5 mA 时开始出现多模工作的现象。适当减小氧化孔径有助于改善单模特性。

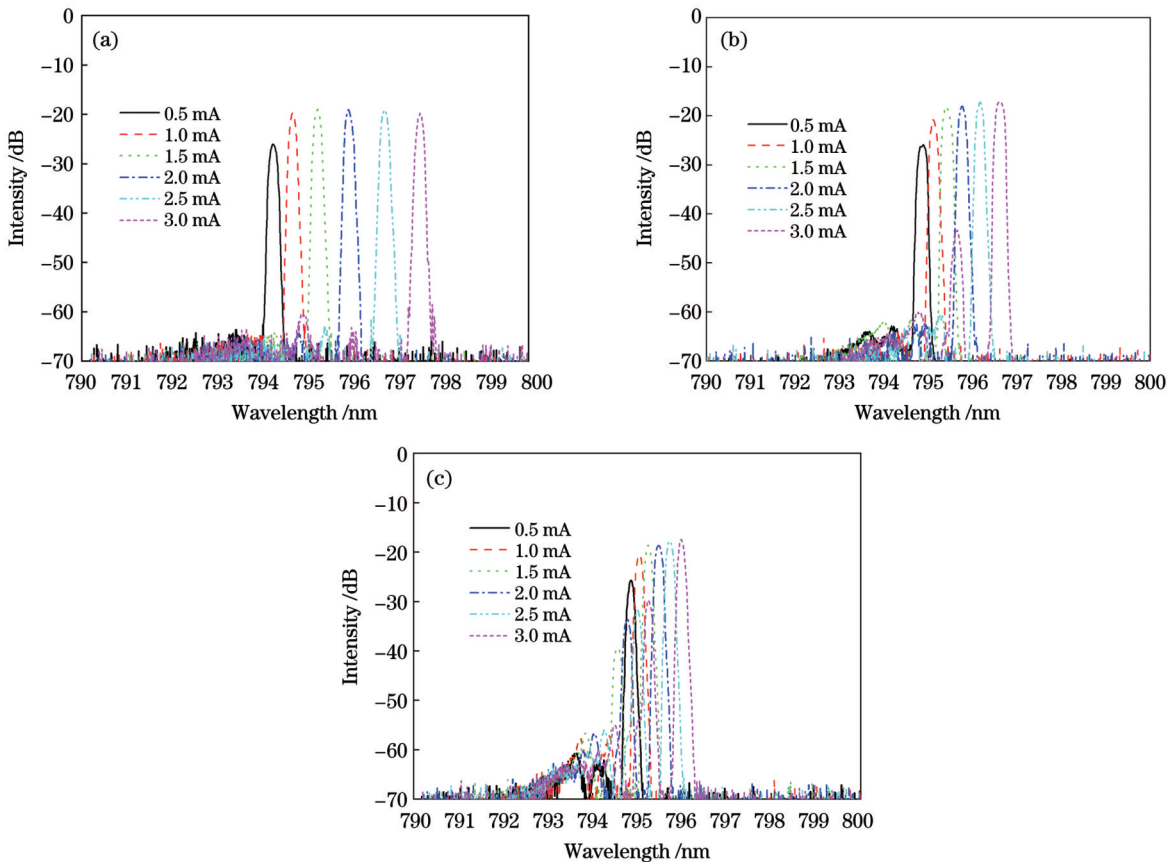


图 9 不同 VCSEL 器件的光谱测试结果。(a) D1; (b) D2; (c) D3

Fig. 9 Spectral testing results of different VCSEL devices. (a) D1; (b) D2; (c) D3

在 85 °C 条件下对三种 VCSEL 进行测试。波长电流漂移图如图 10 所示,对比三种 VCSEL 在 0.6 mA 电流下的波长,随着孔径的减小,波长蓝移,与模拟结果[图 3(a)]相似。测得 D1、D2 和 D3 的波长电流漂移(每 mA 电流导致的波长变化)分别为 1.11、0.66、0.44 nm/mA。在高电流密度下,器件的发热量增加,芯部温度高于包层温度,与冷腔情况相比,有效折射率增加^[23]。孔径越小,这一现象越严重,相应的波长电流漂移也越大。

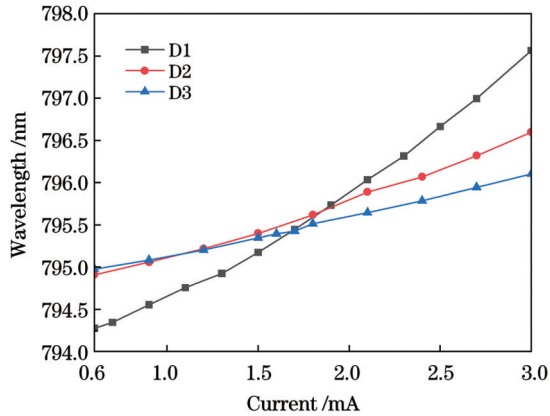


图 10 波长漂移图
Fig. 10 Wavelength drift

图 11 和图 12 分别展现了三种 VCSEL 的 SMSR 和 OPSR 随电流的变化。对于 D1,当电流从 0.6 mA 增大到 3.0 mA 时, SMSR 均大于 37 dB,当电流从 1.7 mA 增大到 3.0 mA 时, OPSR 均大于 23 dB。对于 D2,当电流从 0.6 mA 增大到 2.7 mA 时, SMSR 均大于 36 dB,当电流从 1.2 mA 增大到 2.7 mA 时, OPSR 均大于 23 dB,当电流大于 2.7 mA 时性能快速下降。对于 D3,电流大于 1.2 mA 时器件开始多模工作, SMSR 从 34 dB 快速下降 15 dB 以下, OPSR 从 20 dB 快速下降到 5 dB 以下。对比三种器件,由于 D1 的氧化孔径过小,高温特性较差, D3 的氧化孔径过大,模式和偏振特性随电流的增大恶化严重。综上所述, D2 性能最优。

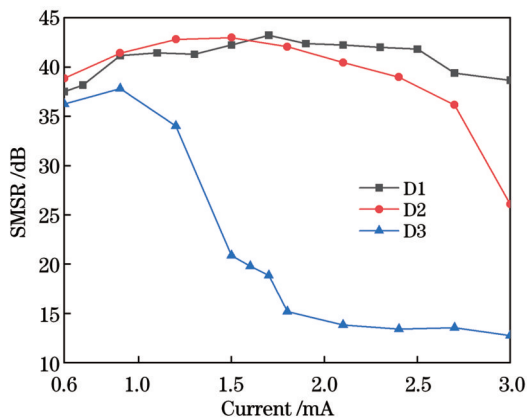


图 11 SMSR 测试结果
Fig. 11 SMSR test results

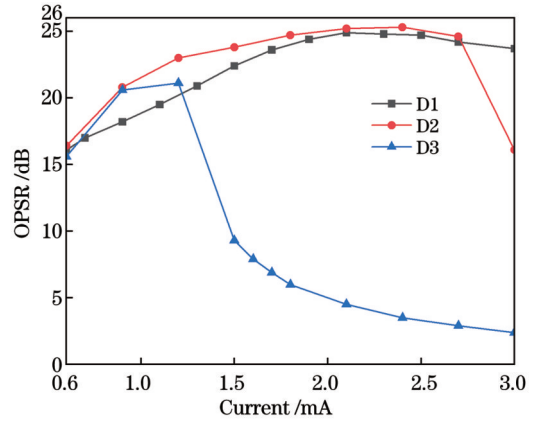


图 12 OPSR 测试结果
Fig. 12 OPSR test results

测试 D2 在温度 85 °C、电流 1.5 mA 下的线宽。测试使用扫描式法布里-珀罗干涉仪,其自由频谱范围为 1.5 GHz,线宽分辨率为 7.5 MHz,满足此类 VCSEL 的线宽测试要求。测得干涉峰的半峰全宽为 109 μ s (图 13),经过换算得其线宽为 65 MHz。

在偏振测试过程中,三种 VCSEL 的主偏振方向(偏振片在功率计显示最大时的透光偏振方向)都出现了随电流变化的单向旋转(以出光方向为轴逆时针旋转)现象。旋转的角度随电流的变化如图 14 所示(将 0.6 mA 下的主偏振方向角定义为 0°),其中 D3 在电流达到 1.7 mA 时开始出现椭圆偏振光长轴角度的旋转。D2 在电流达到 2.7 mA 时开始出现这一现象。D1 在电流为 0.6~3.0 mA 时持续旋转,总旋转角度为 24°。

椭圆偏振光垂直光传播方向的振动矢量的轨迹在偏振面上的投影为一个椭圆,这个椭圆的长轴与投影面坐标轴的夹角^[24](ϕ)满足

$$\tan(2\phi) = \tan(2\alpha) \cos \delta, \quad (1)$$

式中: α 为椭圆偏振光的两正交方向平面电磁波电场合振幅的倾斜角; δ 为两电磁波的相位差。因此,依照式(1),猜测存在两种引起主偏振方向角度变化的因素。第一种是随着电流的增大,VCSEL 两个偏振模式之间的强度比发生变化,也就是 α 角发生变化。第二种是在电流增大时,VCSEL 两正交方向偏振光之间的相位差发生变化。D2 和 D3 发生角度偏转时的电流值大于等于出现 SMSR 性能下降时的电流值,此时两者都处在多模激发状态(图 9)。随着电流的增大, SMSR 下降, VCSEL 的高阶横模增强,高阶横模会更倾向于激发与基模偏振方向正交的极化偏振^[25],使两个偏振模式之间的光强度比发生变化。因此 D2 和 D3 的角度偏转可以用第一种因素解释。图 14 中 D2 和 D3 都有角度不变的电流区间,第二种因素不适用。

D1 器件在 0.6~3.0 mA 电流区间存在主偏振方向旋转的现象,且单向旋转角度达 24°。D1 器件在 0.5~

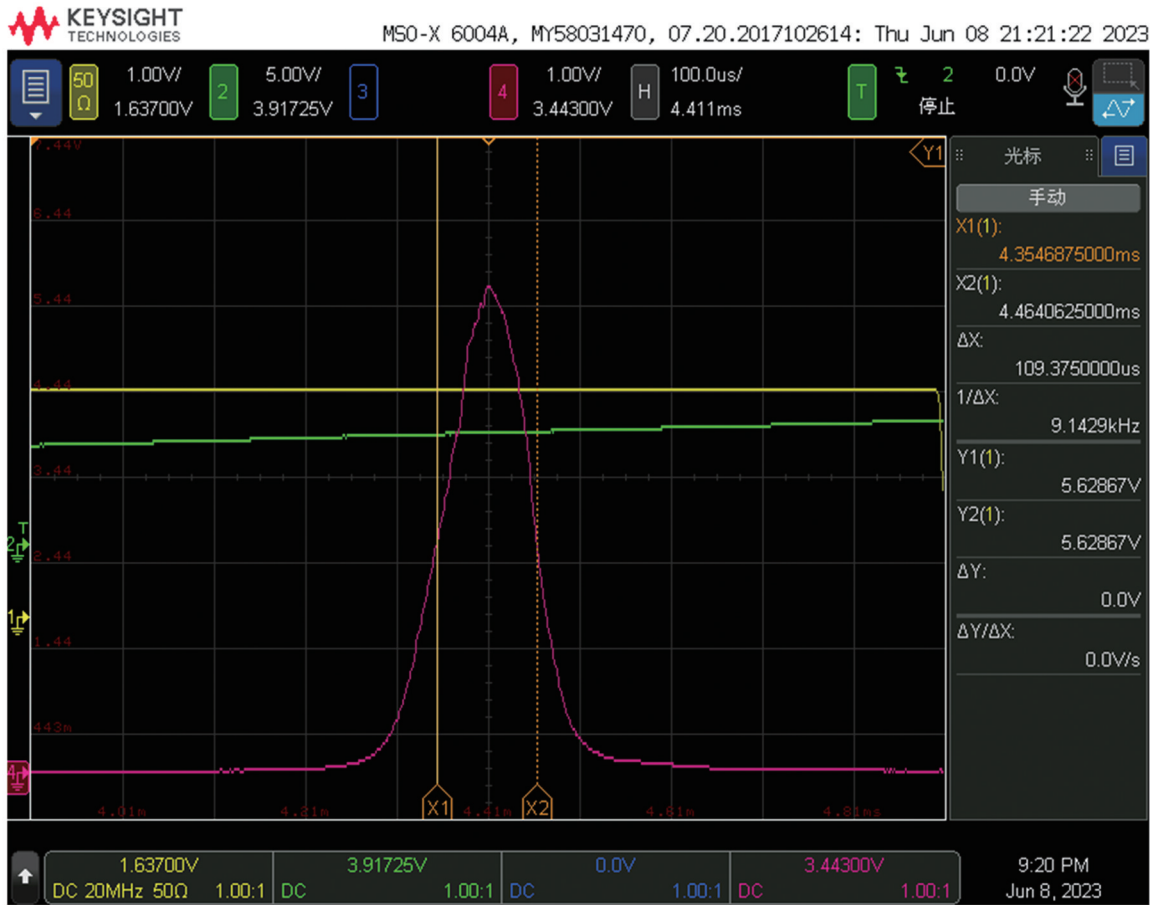


图 13 D2 在 85 °C、1.5 mA 下的线宽

Fig. 13 Line width of D2 at 85 °C and 1.5 mA

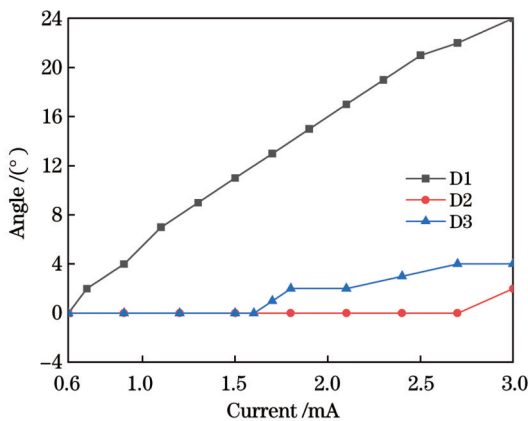


图 14 主偏振方向角的旋转情况

Fig. 14 Rotation of main polarization direction angle

3.0 mA 电流区间都保持单模工作 [图 9 (a)], 且在 1.7~3.0 mA 电流范围内, OPSR 基本不变, 如图 12 所示, 此时方向角继续线性偏转, 受第一因素的影响较小。D1 器件的氧化孔较小, 受电流密度增大、温度升高和氧化孔附近应力的影响, 氧化孔附近的折射率更容易出现改变的现象, 从而引起相位改变。根据式 (1) 计算, 在 0.6~3.0 mA 电流区间, D1 器件的 OPSR 从 15 dB 变化到 25 dB。同时考虑到两个偏振方向的最大相位变化, 计算 ψ 角的可取值范围为 0~10°, 与测试

得到的角度变化规律不符。分析认为, 受第一因素和第二因素的同时影响, ψ 的变化无法大于 20°。因此, 上文的两种影响因素都不能用于解释 D1 的角度旋转。推测 D1 器件本身单一模式的线偏振光发生了角度偏转, 后续将进一步分析这种现象的机理。

4 结 论

通过调节湿法氧化工艺, 制作了三种椭圆氧化孔 VCSEL, 并利用椭圆拟合颜色矩阵位置坐标的方法得到了三种氧化孔的长轴径和椭圆度。P-I-V 曲线的测试结果表现了这三种孔径对 VCSEL 光电转换性能的影响。光谱的测试和分析结果表明, 氧化孔长轴径与模拟推测结果相符合的 VCSEL, 具有较高的 OPSR 和 SMSR、稳定的偏振角度及较大的高性能电流区间。这一研究为稳定 795 nm VCSEL 的偏振提供了一种设计思路。还对三种器件在 0.6~3.0 mA 下的主偏振方向角旋转情况进行了测试和理论分析, 其中小孔径 VCSEL 是基模的偏振方向角发生旋转, 与另外两种 VCSEL 由多模引起的角度旋转不同。

参 考 文 献

- [1] 吕家纲, 李伟, 戚宇轩, 等. 可调谐垂直腔面发射激光器支撑结构优化设计[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0114003.

- Lü J G, Li W, Qi Y X, et al. Design optimization of mechanical support structures in tunable vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0114003.
- [2] 潘智鹏, 李伟, 吕家纲, 等. 940 nm VCSEL 中 DBR 的反射特性分析[J]. *中国激光*, 2023, 50(7): 0701007.
Pan Z P, Li W, Lü J G, et al. Reflection characteristics analysis of DBR in 940 nm VCSEL[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(7): 0701007.
- [3] 颜伟年, 王秋华, 周亨杰, 等. 氧化限制结构 940 nm 垂直腔面发射激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 1514003.
Yan W N, Wang Q H, Zhou H J, et al. Oxide-confined 940 nm vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1514003.
- [4] 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 高温工作垂直腔面发射半导体激光器现状与未来(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251201.
Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, et al. Development and future of vertical cavity surface emitting lasers operated at high temperatures (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251201.
- [5] Iga K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1201-1215.
- [6] Higuchi A, Naito H, Torii K, et al. High power density vertical-cavity surface-emitting lasers with ion implanted isolated current aperture[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4206-4212.
- [7] 潘智鹏, 李伟, 戚宇轩, 等. 光子晶体垂直腔面发射激光器的设计分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1414002.
Pan Z P, Li W, Qi Y X, et al. Design and analysis of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1414002.
- [8] 聂语葳, 李伟, 吕家纲, 等. 氧化限制型 795 nm 垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2024, 51(6): 0601004.
Nie Y W, Li W, Lü J G, et al. Oxidation-limited 795 nm vertical cavity surface emission laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(6): 0601004.
- [9] van Exter M P, Jansen van Doorn A K, Woerdman J P. Electro-optic effect and birefringence in semiconductor vertical-cavity lasers [J]. *Physical Review A*, 1997, 56(1): 845-853.
- [10] Geib K, Peake G, Wendt J, et al. VCSEL polarization control for chip-scale atomic clocks[EB/OL]. [2023-05-08]. <https://www.osti.gov/biblio/902214/>.
- [11] Kitching J, Knappe S, Vukicevic M, et al. A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(6): 1313-1317.
- [12] Geib K, Choquette K, Hou H, et al. Fabrication issues of oxide-confined VCSELs[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3003: 69-74.
- [13] 刘莹莹. 垂直腔面发射激光器的偏振控制及两模面发射激光器的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019: 11-27.
- Liu Y Y. Study on polarization control of vertical-cavity surface-emitting lasers and two-modes VCSEL[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 11-27.
- [14] Miah M J, Al-Samaneh A, Kern A, et al. Fabrication and characterization of low-threshold polarization-stable VCSELs for Cs-based miniaturized atomic clocks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1701410.
- [15] Liu Y Y, Zhang X, Huang Y W, et al. OPSR enhancement of high-temperature operating shallow-surface grating VCSELs[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4486-4490.
- [16] Li M, Wang Q H, Qiu P P, et al. 894nm high orthogonal polarization suppression ratio vertical cavity surface emitting laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11300: 113000W.
- [17] Maleev N A, Blokhin S A, Bobrov M A, et al. Laser source for a compact nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, 9(3): 177-182.
- [18] Zhang J Y, Zhang J W, Zhang X, et al. Polarization-controlled and single-transverse-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with eye-shaped oxide aperture[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(12): 120309.
- [19] Zhang J Y, Zhang J W, Zhang X, et al. Asymmetric oxide apertures of vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by unsymmetrical wet oxidation and its polarization control[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106948.
- [20] Xie X Y, Li J, Qiu X L, et al. Mode characteristics of VCSELs with different shape and size oxidation apertures[J]. *Chinese Physics B*, 2023, 32(4): 044206.
- [21] Bobrov M A, Maleev N A, Blokhin S A, et al. Polarization characteristics of 850-nm vertical-cavity surface-emitting lasers with intracavity contacts and a rhomboidal oxide current aperture [J]. *Semiconductors*, 2016, 50(10): 1390-1395.
- [22] Ueki N, Nakayama H, Sakurai J, et al. Complete polarization control of 12×8-bit matrix-addressed oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(1A): L33.
- [23] Ledentsov N N, Shchukin V A, Kalosha V P, et al. Anti-waveguiding vertical-cavity surface-emitting laser at 850 nm: from concept to advances in high-speed data transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 445-453.
- [24] 张以谟. 现代应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 1043-1056.
Zhang Y M. *Contemporary applied optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 1043-1056.
- [25] Chang-Hasnain C J, Harbison J P, Florez L T, et al. Polarisation characteristics of quantum well vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(2): 163-165.

Polarization Characteristics of Vertical Cavity Surface Emitting Laser with Elliptical Oxidation Aperture

Xie Zhonghua^{1,2}, Qu Hongwei^{2,3*}, Zhou Xuyan^{2,3}, Zhang Jianxin^{2,4}, Sui Jiatong^{1,2}, Meng Fansheng^{2,3}, Gong Kai^{1,2}, Zheng Meiyin^{1,2}, Wang Hailing^{2,3}, Wang Yufei^{2,3}, Qi Aiyi^{2,3}

¹*School of Physics and Physical Engineering, Qufu Normal University, Jining 273165, Shandong, China;*

²*Weifang Academy of Advanced Opto-Electronic Circuits, Weifang 261000, Shandong, China;*

³*Laboratory of Solid State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*

⁴*School of Physics and Electronic Information, Weifang University, Weifang 261061, Shandong, China*

Abstract

Objective A 795 nm vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) has the advantages of a low threshold current, single-mode operation, a low power consumption, and high temperature and reliability. It is an ideal light source for quantum precision measurement in devices such as atomic clocks, atomic magnetometers, and atomic gyroscopes. A VCSEL typically uses oxidation limiting structures for mode regulation to achieve electro-optic confinement. A VCSEL with conventional circular oxide apertures has an axisymmetric structure, making it difficult to achieve polarization control in two orthogonal directions and prone to polarization instability with increasing current. The application of a VCSEL in a device such as a chip-level atomic clock requires it to have a stable polarization direction and high polarization suppression ratio. Asymmetric oxidation apertures are introduced to improve the polarization stability of the 795 nm VCSEL used for rubidium atomic clocks. Controlling the oxidation conditions such as the temperature and gas pressure in the wet oxidation process makes it possible to fabricate VCSELs with different oxidation rates and ellipticity values for their apertures and analyze the effects of these on the polarization performance, which assists in achieving a low threshold and high polarization output.

Methods A two-dimensional cold-cavity simulation of a 795 nm VCSEL is conducted using the fluctuation optical frequency domain module in COMSOL Multiphysics, and the effects of different oxidation apertures on the resonant light intensity in the active region are simulated. The influence of the oxidation furnace temperature on the oxidation rate and ellipticity is studied using a real-time monitoring wet oxidation system and controlling oxidation parameters such as the temperature and gas pressure in the wet oxidation process. The ellipticity and aperture parameters are obtained by the ellipse fitting of the captured oxidation aperture images. Three types of VCSELs with different long-axis diameters and ellipticity values are prepared using a circular table. The power-current-voltage (P - I - V) curves, mode characteristics, line widths, polarization characteristics, and polarization angle rotation characteristics of the three devices are tested and analyzed.

Results and Discussions The influence of the oxidation furnace temperature on the oxidation rate and ellipticity is determined by using the real-time monitoring wet oxidation system and controlling oxidation parameters such as the temperature and gas pressure in the wet oxidation process. Three types of VCSELs with different long-axis diameters and ellipticity values are prepared using a circular tabletop, and their mode characteristics, polarization characteristics, and polarization angle rotation characteristics are analyzed and studied. The experimental results show that a VCSEL with elliptical oxidation holes with a long-axis diameter of 3.7 μm and ellipticity of 1.7 has the best performance (Fig. 7). At 85 $^{\circ}\text{C}$, with an injection current of 1.5 mA, the output power is 0.86 mW, laser wavelength is 795.4 nm, side mode suppression ratio (SMSR) is 43 dB, line width is 65 MHz (Fig. 13), and orthogonal polarization suppression ratio (OPSR) is 23.8 dB. The VCSEL remains unchanged in the main polarization direction within the range of 0.6–2.7 mA. According to the test results, the three types of VCSELs with different major-axis diameters and ellipticity values show different unidirectional rotation values for the main polarization direction angle with an increase in current (Fig. 14).

Conclusions In order to improve the polarization stability of the 795 nm VCSEL used for Rb atomic clocks, this study discusses the effects of different oxidation apertures and ellipticity values on the polarization performance of a VCSEL. The influence of different oxide apertures on the resonant light intensity in the active region is simulated using the fluctuation optical frequency domain module of COMSOL Multiphysics. The results show that the highest resonance intensity in the active region is obtained when the oxidation aperture is 3.5–4.0 μm . The real-time monitoring wet oxidation system is used to study the effects of the oxidation furnace temperature on the oxidation rate and ellipticity. As the injection current increases, the three types of elliptical oxidation aperture VCSELs exhibit different mode characteristics, polarization characteristics, and polarization angle rotation values. The test results indicate that the VCSEL with an elliptical oxidation aperture with a long-axis diameter of 3.7 μm and an ellipticity of 1.7 has the best performance. At 85 $^{\circ}\text{C}$, with an injection current of 1.5 mA, the output power is 0.86 mW, laser wavelength is 795.4 nm, SMSR is 43 dB, line width is 65 MHz, and OPSR is 23.8 dB. The main polarization direction of the VCSEL remains unchanged within the range of 0.6–2.7 mA.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting lasers; oxidation aperture; wet oxidation; orthogonal polarization suppression ratio; narrow linewidth